



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Júlia Amorim de Araujo

**ANÁLISE DE BACIAS DE DEFLEXÃO COM BASE NO
ENSAIO DA VIGA BENKELMAN NO CAMPUS MORRO DO
CRUZEIRO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO
PRETO**

Ouro Preto

2022

ANÁLISE DE BACIAS DE DEFLEXÃO COM BASE NO ENSAIO DA VIGA
BENKELMAN NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE OURO PRETO

Júlia Amorim de Araujo

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 04/11/2022

Área de concentração: Transportes

Orientadora: Prof^a. D.Sc. Daniela Antunes Lessa – UFOP

Coorientador: M.Sc. Hebert da Consolação Alves – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663a Araujo, Julia Amorim de.

Análise de bacias de deflexão com base no ensaio da Viga Benkelman no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto. [manuscrito] / Julia Amorim de Araujo. - 2022.

63 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Antunes Lessa.

Coorientador: Me. Hebert da Consolação Alves.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Pavimentos de asfalto. 2. Pavimentos de asfalto- Bacias de deflexão. 3. Pavimentos de asfalto - Viga Benkelman. I. Lessa, Daniela Antunes. II. Alves, Hebert da Consolação. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Amorim de Araujo

Análise de bacias de deflexão com base no ensaio da Viga Benkelman no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Aprovada em 04 de novembro de 2022.

Membros da banca

Profª. Drª. Daniela Antunes Lessa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Hebert da Consolação Alves - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Lucas Henrique Vieira - (DF+ Engenharia)

Daniela Antunes Lessa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/11/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Antunes Lessa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/01/2025, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0422500** e o código CRC **DB1654A5**.

Dedico este trabalho principalmente a meus pais e minha irmã, que não mediram esforços para me apoiar durante minha jornada em Ouro Preto. E, diga-se de passagem, que jornada maravilhosa.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho reflete esforço e dedicação de diversas pessoas que foram imprescindíveis em minha trajetória até aqui.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Jussara e Célio, que nunca mediram esforços para me apoiar. À minha irmã, Gabriela: obrigada por estar comigo e não me deixar desistir nos momentos mais difíceis – que não foram poucos. Amo vocês.

Em especial, agradeço a orientação e cuidado da professora Daniela, que abriu as portas que eu precisava na engenharia civil e na infraestrutura de transportes. Você foi de extrema importância na profissional que estou me tornando hoje.

Agradeço também a meu coorientador Hebert, que fez parte de toda minha vivência de pesquisas dentro da UFOP e me fez ver na prática essa minha nova paixão na engenharia. Não tenho palavras para agradecer tudo o que fez por mim durante todos esses anos no laboratório de ferrovias, em especial para este trabalho.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto – LabFer – pelo conhecimento, pesquisas, cafés com pão de queijo e por me mostrar que passar o dia medindo pedras e rompendo corpos de prova pode ser incrível.

Agradeço também à toda minha família, que me apoiou – e me aturou – durante todo o desenvolvimento do presente trabalho. Obrigada por vibrarem minhas vitórias e por estarem comigo nos momentos difíceis.

À UFOP, pelo conhecimento adquirido e pelas oportunidades.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pelo apoio que me foi dado durante minhas pesquisas no LabFer.

Às meninas da República Chocolate com Pimenta, que ficaram mais felizes que eu quando coloquei um caminhão na UFOP. Obrigada pelo acolhimento.

E por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho, em especial ao Vinícius Lanza e Chrystian Ventura. Este trabalho não sairia sem vocês. Obrigada!

RESUMO

A oferta de infraestrutura de transporte está interligada ao processo de desenvolvimento social e econômico, devendo ser parte dos planos de desenvolvimento de um país. De acordo com a pesquisa feita pela Confederação Nacional do Transporte – CNT, em 2021, 65% do transporte brasileiro de cargas e 95% do de pessoas era feito através de rodovias, o que evidencia o desequilíbrio e a importância do modo para o desenvolvimento do Brasil (CNT, 2021). A pesquisa também aponta que aproximadamente 62% da malha rodoviária encontra-se em estado de conservação inadequado, o que afeta diretamente a segurança e os gastos com manutenções. Nesse sentido, torna-se cada vez mais necessária a inovação e o desenvolvimento de um dimensionamento adequado, mais eficiente, menos oneroso e mais harmônico com o meio ambiente. Durante muito tempo no Brasil e no mundo foram utilizadas metodologias empíricas de dimensionamento, ou seja, os pavimentos eram construídos em um contexto de experiências, fruto de testes e validações de teorias e hipóteses. Assim, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar a análise das bacias de deflexão através do ensaio da Viga Benkelman, aparelho deflectométrico que permite a leitura da deformação de um pavimento quando este é submetido a uma carga conhecida, obtidas em um trecho da pista do Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Além disso, buscou-se analisar a estrutura deste pavimento a fim de verificar seu atual comportamento. A partir dos ensaios realizados, foi possível avaliar a funcionalidade do pavimento analisado que, de acordo com os resultados obtidos, carece de alguns cuidados, bem como fomentar pesquisas futuras no próprio ambiente universitário.

Palavras-chaves: Pavimentos asfálticos, bacias de deflexão, Viga Benkelman, análises deflectométricas, Campus Morro do Cruzeiro.

ABSTRACT

The supply of transportation infrastructure is intertwined with the social and economic development process and should be part of a country's development plans. According to the survey conducted by the Confederação Nacional do Transporte - CNT, in 2021, 65% of Brazilian cargo transportation and 95% of people transportation was done through highways, which shows the imbalance and the importance of the mode for the development of Brazil (CNT, 2021). The survey also points out that approximately 62% of the road network is in an inadequate state of repair, which directly affects safety and maintenance costs. In this sense, innovation and the development of an adequate, more efficient, less expensive, and more harmonious sizing with the environment are becoming increasingly necessary. For a long time in Brazil and around the world empirical design methodologies were used, that is, sidewalks were built in a context of experiences, the result of tests and validations of theories and hypotheses. Thus, the present work aims to analyze the deflection basins through the Benkelman Beam test, a deflectometric device that allows the reading of the deformation of a sidewalk when it is subjected to a known load, obtained on a section of the roadway of the Campus Morro do Cruzeiro at the Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. In addition, the structure of this sidewalk was analyzed to verify its current behavior. From the tests performed, it was possible to evaluate the functionality of the analyzed sidewalk that, according to the results obtained, needs some care, as well as encourage future research in the university environment itself.

Keywords: asphalt sidewalks, deflection basins, Benkelman Beam, deflectometric analysis, Campus Morro do Cruzeiro

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/1.000 km ² . Fonte: CNT (2021).....	6
Figura 2 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região Fonte: CNT (2021).	6
Figura 3 – Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (valores em km/1.000 km ²). Fonte: CNT (2021).	7
Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento. Fonte: Balbo (2007).	8
Figura 5 – Sistema de camadas de um pavimento e as tensões solicitantes. Fonte: Albernaz (1997).	9
Figura 6 – Resposta mecânica de pavimentos flexíveis. Fonte: Balbo (2007).	10
Figura 7 – Ilustração das tensões em uma estrutura de pavimento. Fonte: Medina e Motta (2005).	11
Figura 8 – Afundamento de trilha de rodas atribuído somente ao revestimento (a); atribuído às diversas camadas do pavimento (b) Fonte: Bernucci et al. (2010).	12
Figura 9 – Diagrama esquemático do mecanismo de formação de deformação permanente. Fonte: Borges (2014).	13
Figura 10 – Ilustração da região do pavimento quando submetida aos esforços de cargas. Fonte: Nobrega, (2003).	14
Figura 11 – Ilustração de uma bacia de deflexão. Fonte: Pereira (2007).	15
Figura 12 – Retirada de corpos de prova em métodos destrutivos. (a) Sonda rotativa utilizada para a retirada de corpos de prova. Fonte: TCE-GO. (b) Sonda rotatória em utilização. Fonte: Grupo Sanson.	16
Figura 13 – Método semidestrutivo de análise do pavimento. (a) Cone Dinâmico de Penetração. Fonte: Solotest. (b) Equipamento em uso. Fonte: Prongila.....	17
Figura 14 – Fluxograma simplificado das etapas do ensaio. Fonte: Autoria própria.	21

Figura 15 – Localização da Universidade Federal de Ouro Preto e a área de realização do ensaio. Fonte: Elaboração própria a partir do Google Maps.....	22
Figura 16 – Local de realização do ensaio. Fonte: Arquivo pessoal.	23
Figura 17 – Dimensionamento do pavimento da Universidade Federal de Ouro Preto através do software MeDiNa. Fonte: Gontijo (2021).....	24
Figura 18 - Viga Benkelman. Fonte: Arquivo pessoal.	25
Figura 19 – Viga Benkelman em processo de montagem. Fonte: Arquivo pessoal.	25
Figura 20 – Esquema da Viga Benkelman. Fonte: DNER (1994)	26
Figura 21 – Desenho esquemático da aferição da Viga Benkelman. Fonte: DNIT (1994).....	28
Figura 22 – Desenho esquemático do sistema de referência na Viga e no caminhão. Fonte: DNIT (1994)	30
Figura 23 – Demarcação dos pontos de tomada de medida. Fonte: Arquivo pessoal.....	33
Figura 24 – (a) Caminhão posicionado. Fonte: Arquivo pessoal. (b) Vista geral do caminhão com a Viga Benkelman sendo posicionada entre as rodas. Fonte: Arquivo	35
Figura 26 – Diferenciação das faixas externa e interna de tráfego. Fonte: Arquivo pessoal.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de carregamentos e equipamentos utilizados. Fonte: Haas et al., (1994).....	18
Tabela 2 – Localização dos pontos. Fonte: DNIT (1994).....	28
Tabela 3 - Critérios para avaliação estrutural de pavimentos. Fonte: DNIT (1979).	31
Tabela 4 – Leituras do extensômetro em cada ponto de interesse. Fonte: Elaboração própria.	38
Tabela 5 – Medidas de deflexões em cada ponto de interesse. Fonte: Elaboração própria.	39
Tabela 6 – Deflexões por estaca em cada ponto analisado. Fonte: Elaboração própria.	39
Tabela 7 – Raios de curvatura. Fonte: Elaboração própria.....	40
Tabela 8 – Critérios para avaliação estrutural de pavimentos. Fonte: Adaptado de DNIT (1979).....	44

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	4
1.1.1	Objetivos Específicos.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Transporte rodoviário no Brasil.....	5
2.2	Estrutura rodoviária	7
2.3	Principais causas de falhas pavimentares.....	10
2.3.1	Fadiga	10
2.3.2	Carregamentos de tensões elevadas.....	11
2.4	Bacias de deflexão	13
2.5	Métodos de avaliação estrutural.....	15
2.5.1	Métodos destrutivos	15
2.5.2	Métodos semidestrutivos.....	16
2.5.3	Métodos não-destrutivos.....	17
3	Metodologia.....	21
3.1	Descrição área da pesquisa	22
3.2	Dimensionamento do pavimento existente no Campus Morro do Cruzeiro 24	
3.3	Características da Viga Benkelman.....	24
3.4	Ensaio de campo com a Viga Benkelman	26
4	Resultados	38

5	Conclusão	45
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	45
6	Bibliografia	47

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário desempenha um papel importante na sociedade e na economia brasileira, uma vez que se apresenta como a principal alternativa para a movimentação de cargas e pessoas em todo o território. Porém, a conservação e a construção de novas infraestruturas não acompanham a real necessidade do transporte (NEPOMUCENO, 2019). As más condições, ainda segundo Nepomuceno (2019), muitas vezes resultantes de dimensionamentos não adequados, são agravadas principalmente pelas condições climáticas desfavoráveis e pelo tráfego de veículos comerciais com volumes acima do regulamentado, devido à falta de fiscalização.

Assim, evidencia-se a importância da manutenção das infraestruturas existentes, as quais se apresentam por muitas vezes com níveis de deterioração avançados, ultrapassando o tempo de vida útil previsto sem que o reforço estrutural tenha ocorrido. Todo esse contexto ajuda a compreender o fato de o Brasil ocupar a 111ª posição no ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, no quesito de qualidade da infraestrutura rodoviária (SOUZA JUNIOR, 2018). Nesse sentido, para que os pavimentos se mantenham em condições adequadas no longo prazo, é necessária a realização periódica de serviços de manutenção (CNT, 2021) que, entre os anos de 2006 e 2018, custou para a União mais de 68 bilhões de reais (média de 5,23 milhões de reais por ano), tendo em vista apenas as rodovias federais.

A inadequabilidade do estado de conservação de grande parte da infraestrutura rodoviária brasileira deixa evidente a necessidade de investimentos tanto no que diz respeito à recuperação apropriada das rodovias existentes, quanto na aplicação de recursos em novas estradas. Ademais, ressalta-se a necessidade de se incentivar estudos e pesquisas envolvendo novas tecnologias e inovações voltadas aos métodos de dimensionamentos, visando tornar esses processos mais eficientes. Todas essas soluções possibilitam a construção de infraestruturas rodoviárias mais resilientes,

menos onerosas e mais harmônicas com o meio ambiente, atendendo às necessidades dos usuários com qualidade, segurança e conforto, durante toda a vida útil para o qual o pavimento foi projetado.

Os pavimentos são estruturas compostas por camadas sobrepostas, construídas sobre a terraplenagem, destinadas técnica e economicamente, de forma a resistir às solicitações do tráfego e do clima, proporcionando uma melhor experiência do usuário (BERNUCCI et al., 2010). Existem dois tipos de pavimentos mais comumente utilizados: os flexíveis (asfálticos) e os rígidos (concreto-cimento). Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles constituídos por uma menor quantidade de camadas. Estes são associados ao concreto de cimento Portland, cujo revestimento é feito com placas de concreto que podem ser armadas ou não com barras de aço. Os pavimentos asfálticos, mais comuns no país, são constituídos por várias camadas – reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico – que possuem a função de aliviar as tensões sobre as camadas inferiores. No Brasil, o dimensionamento de pavimentos asfálticos está em transição do Método *Califórnia Bearing Ratio* (CBR) para o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

O aperfeiçoamento das metodologias utilizadas para investigação de pavimentos está em constante avanço no Brasil e no mundo, o que contribui para um melhor dimensionamento de novos pavimentos e para a recuperação de outros já existentes. O estudo da deformabilidade elástica tem conquistado cada vez mais espaço como método de avaliação da capacidade estrutural de um pavimento. Tais estudos permitem a avaliação dos deslocamentos no interior da estrutura pavimentar, bem como as tensões geradas devido a cargas exteriores (OLIVEIRA NETO, 2015).

De acordo com Santos (2015), a avaliação do comportamento das estruturas de pavimentos permite melhores avaliações por parte de projetistas, tanto para a identificação de deficiências na estrutura do pavimento como para a definição das espessuras de camadas de reforço. Atualmente, o rápido avanço tecnológico permite a criação e o aperfeiçoamento de diversos equipamentos capazes de determinar as deformações geradas por carregamentos com maior confiabilidade e menor tempo

(OLIVEIRA NETO, 2015), o que resulta em rodovias cada vez mais seguras, confortáveis e funcionais para os usuários.

Desta forma, a fim de incentivar estudos que possibilitem a avaliação e melhoria de estruturas de pavimento, o presente trabalho mostra uma análise realizada no Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto, que avaliou as condições do pavimento através de suas bacias de deflexão utilizando a Viga Benkelman, aparelho deflectométrico que permite a leitura da deformação de um pavimento quando este é submetido a uma carga conhecida.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar as bacias de deflexão de um trecho da Rua Dois, localizada na Universidade Federal de Ouro Preto.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a estrutura existente no Campus Morro do Cruzeiro a partir do ensaio da Viga Benkelman;
- Estudar a viabilidade e possíveis melhorias do pavimento do Campus Morro do Cruzeiro;
- Encontrar a melhor solução para possíveis ajustes na estrutura de pavimento existente, caso necessário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transporte rodoviário no Brasil

O transporte de cargas foi marcado pela Segunda Guerra Mundial, que modificou completamente o modo de transporte de cargas e pessoas no país e no mundo. A alta demanda de materiais de maneira rápida e eficiente mostrou a necessidade da utilização de meios de transporte motorizados e uma infraestrutura que garantisse eficiência e segurança dos usuários (NAKAMURA, 2018). Porém, o Brasil possui dificuldades logísticas significativas devido à vasta extensão de seu território, que concentra 65% dos deslocamentos de carga e 95% de pessoas no modo rodoviário (CNT, 2021), o que explica o grande impacto que esse modal causa na economia do país. A infraestrutura de transportes influencia diretamente no custo do transporte rodoviário, o que gera reflexos negativos sobre os preços que os produtores e consumidores pagam, principalmente os mais distantes dos portos (NAKAMURA, 2018).

De acordo com a 24ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2021), apenas 12,4% das rodovias do Brasil são pavimentadas. A análise da densidade da malha rodoviária pavimentada pode ser realizada a partir de um índice correspondente ao número de quilômetros de infraestrutura disponível por cada 1.000 quilômetros quadrados de área do país. Nesse sentido, quando comparado aos países de extensão territorial semelhante, o Brasil apresenta uma baixa disponibilidade de rodovias pavimentadas (25,1 km/1.000 km²), conforme apresentado na Figura 1 (CNT, 2021).

Ainda, analisando o gráfico da Figura 1, é possível perceber que apesar de sua importância, o modal rodoviário brasileiro possui poucos trechos pavimentados se relacionado a sua extensão territorial. Dessa forma, pode-se afirmar que uma quantidade significativa de viagens ocorre em estradas não pavimentadas, afetando

diretamente nos gastos e na segurança pública. A Figura 2 apresenta o percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região do Brasil.

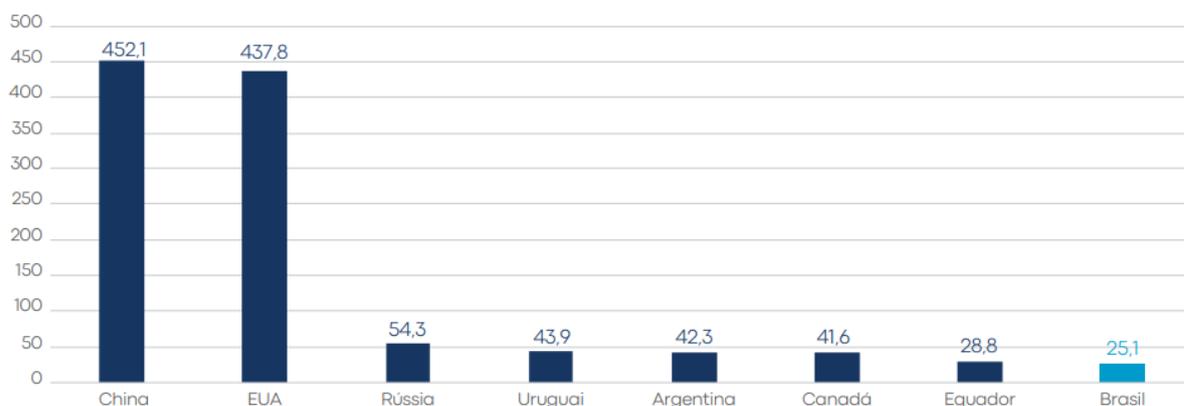


Figura 1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/1.000 km². Fonte: CNT (2021).

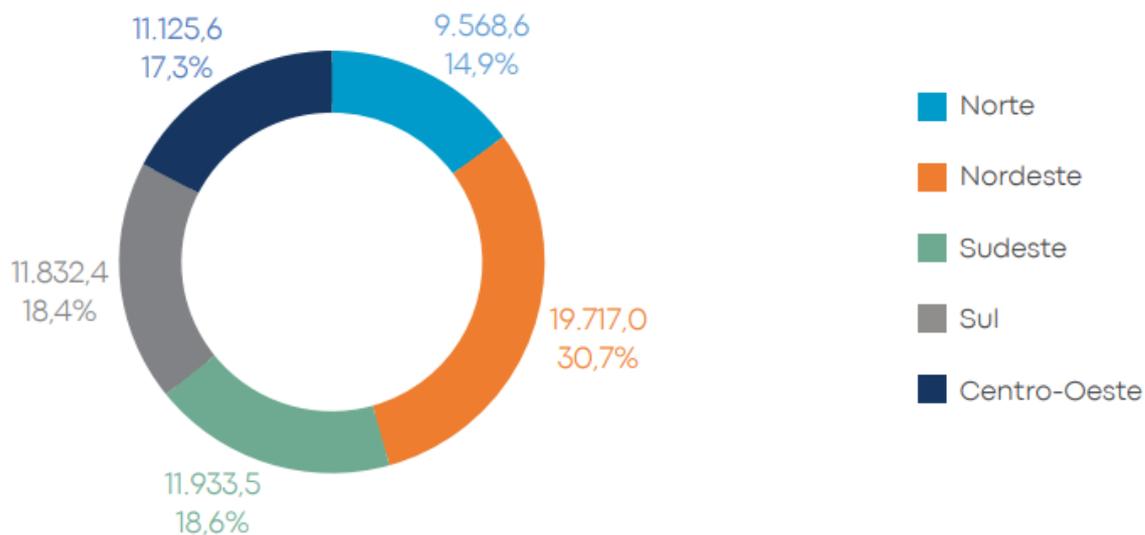


Figura 2 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região (Fonte: CNT (2021)).

De acordo com a Figura 2, é possível perceber que o Nordeste possui a maior porcentagem de rodovias pavimentadas dentre as regiões brasileiras, seguido pelo Sudeste, Sul, Centro-Oeste e Norte, respectivamente. Porém, quando se analisa a

densidade da malha rodoviária é possível perceber que há uma má distribuição do modal rodoviário no país, o que impacta diretamente o potencial de desenvolvimento regional. No que tange à densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região (Figura 3), é possível observar que o Sul é a de maior extensão rodoviária federal pavimentada, quando relacionada à sua área territorial, seguido pelo Sudeste, Nordeste, Centro-Oeste e Norte.

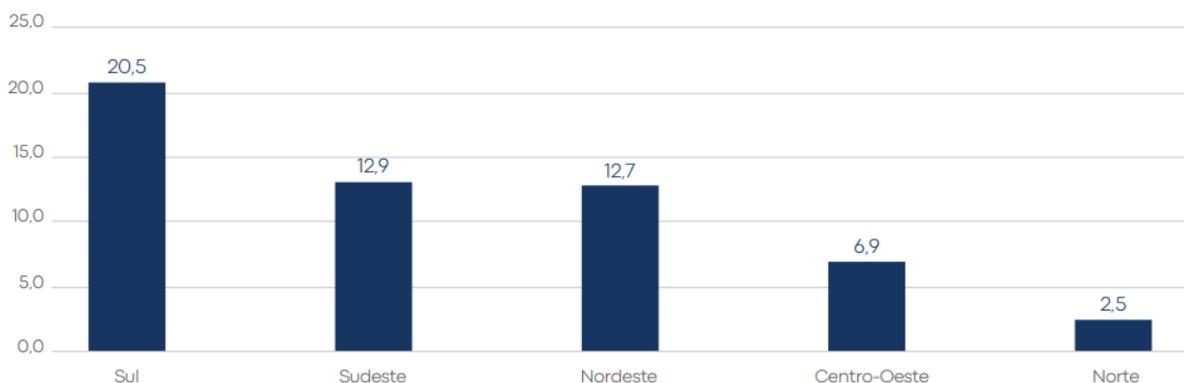


Figura 3 – Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (valores em km/1.000 km²). Fonte: CNT (2021).

Ainda de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2021), as rodovias do país encontram-se em um estado geral de degradação quantitativa e qualitativamente, e apresentam diversas deficiências em seu planejamento, execução e manutenção. Tais deficiências são causadas pelo aumento no fluxo de veículos e pela falta de fiscalização.

Diante desse cenário, é necessária a ampliação dos recursos a fim de minimizar a ineficiência da infraestrutura de transporte do país e, ao mesmo tempo, fomentar a inovação e o desenvolvimento de sistemas de transportes mais eficientes, menos onerosos e mais harmônicos com o meio ambiente.

2.2 Estrutura rodoviária

As rodovias possuem uma estrutura dividida em subgrupos: infraestrutura e superestrutura. De acordo com o DNIT (2010), a infraestrutura rodoviária abrange obras de terraplenagem (i.e., cortes e aterros), sistemas de proteção e drenagem (i.e.,

obras de arte correntes) e obras de arte especiais (i.e., pontes, túneis, passagens, contenções de taludes, entre outros). A superestrutura por sua vez é constituída pelo pavimento, dispositivos de sinalização e obras complementares (DNIT, 2010). O pavimento de uma rodovia é constituído por camadas construídas sobre a superfície pós terraplenagem e possuem a função primária de garantir segurança e conforto sob a perspectiva da engenharia, ou seja, com alta qualidade e baixo custo (SANTANA, 1993).

Os pavimentos rodoviários são classificados basicamente em dois tipos: rígidos e flexíveis (MENDONÇA FILHO, 2018). Os pavimentos rígidos, ou pavimentos de concreto-cimento, possuem como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland. Os pavimentos flexíveis, também conhecidos como pavimentos asfálticos, possuem como revestimento uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al, 2010). Os pavimentos flexíveis, objeto de estudo do presente trabalho, são formados basicamente por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BALBO, 2007), conforme apresentado na Figura 4.

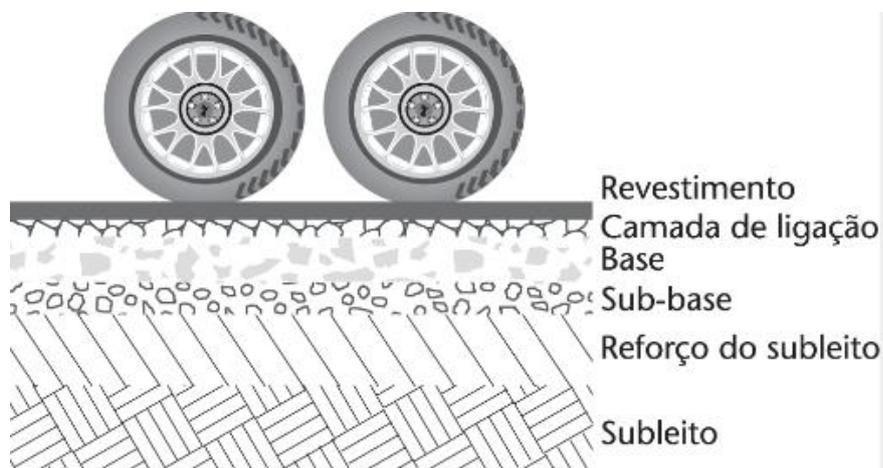


Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento. Fonte: Balbo (2007).

Segundo Balbo (2007), os pavimentos asfálticos estão diretamente expostos a cargas que, ao longo da vida útil da estrutura, acarretarão falhas pavimentares como trincas e fissuras. Os materiais que constituem os pavimentos asfálticos têm a função de atenuar os efeitos das tensões ocasionadas pelo tráfego e, dessa forma, se

mostram fundamentais na absorção dessas cargas, devendo ser compatíveis com sua natureza de maneira a não colapsarem antes do previsto (BALBO, 2007). A Figura 5 ilustra as camadas dos pavimentos e as tensões solicitantes.

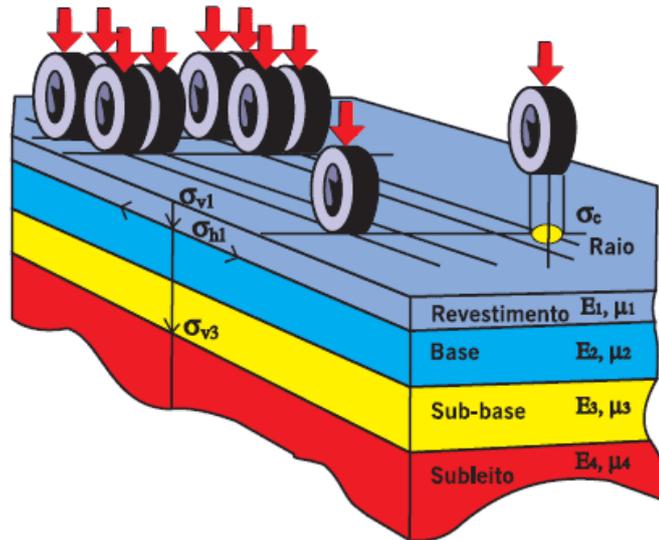


Figura 5 – Sistema de camadas de um pavimento e as tensões solicitantes. Fonte: Albernaz (1997).

Segundo Albernaz (1997), a distribuição dessas cargas nos pavimentos flexíveis se caracteriza por impor um campo de tensões concentrado próximo ao ponto de aplicação da força. Dessa forma, a fim de escolher os materiais adequados e dimensionar suas camadas, é necessário entender como as tensões serão distribuídas (Figura 6).

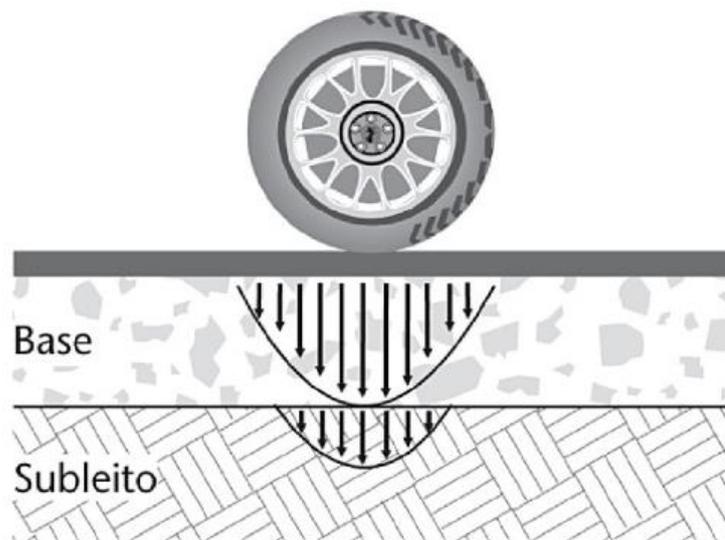


Figura 6 – Resposta mecânica de pavimentos flexíveis. Fonte: Balbo (2007).

2.3 Principais causas de falhas pavimentares

2.3.1 Fadiga

O fenômeno de fadiga é um dos problemas de maior relevância que ocorrem em misturas asfálticas, visto que resulta na degradação dos materiais que compõem o pavimento asfáltico (COLPO, 2014). Ainda de acordo com Colpo (2014), a fadiga é a deterioração estrutural a qual um material está exposto quando submetido a tensões e deformações continuadas, que fazem com que, ao menos em alguns pontos, surjam deformações plásticas também mutáveis com o tempo.

As deformações geradas, por menores que sejam, levam o material a uma degradação progressiva, o que gera o trincamento da estrutura do pavimento, e pode resultar na possível ruptura final após um número determinado de repetições do carregamento (COLPO, 2014). Diversos estudos mostram que a ruptura por fadiga em pavimentos flexíveis relaciona-se com a deformação máxima de tração que ocorre na base da camada asfáltica e propaga-se por essa camada até atingir a superfície (Figura 7).

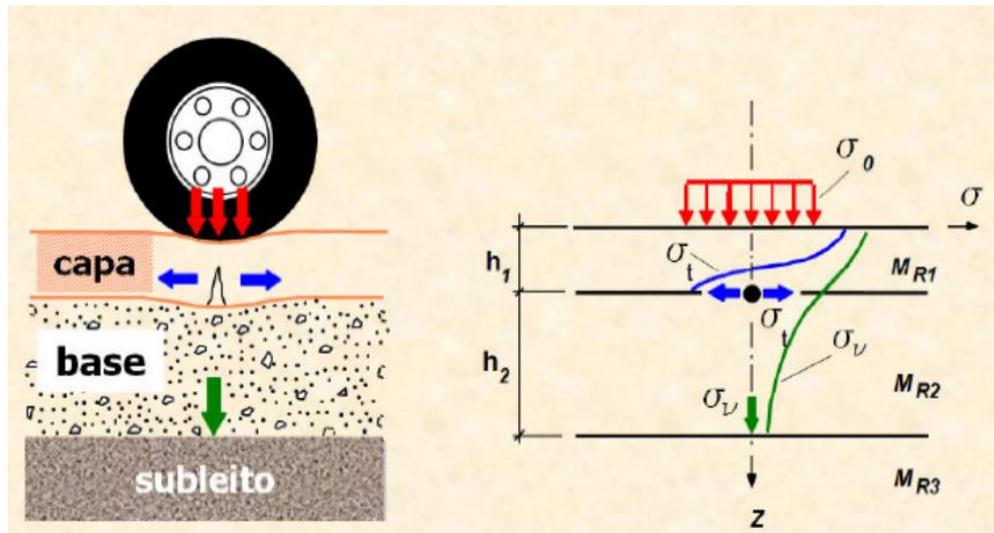


Figura 7 – Ilustração das tensões em uma estrutura de pavimento. Fonte: Medina e Motta (2005).

Estudos realizados por Bernucci et al., (2010) apontam que existem quatro categorias de trincas, as quais são classificadas de acordo com extensão, intensidade e severidade:

1. Longitudinais (curtas ou longas);
2. Transversais (curtas ou longas);
3. Trincas em blocos; e
4. Trincas em couro de jacaré.

Os tipos mais comuns de trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos são as trincas longitudinais curtas, trincas longitudinais longas, trincas em blocos e trincas em couro de jacaré (RIBEIRO, 2017). Dessa forma, faz-se necessário o entendimento e conhecimento da resistência das misturas asfálticas à fadiga, possibilitando o dimensionamento da estrutura de maneira adequada, de modo a encontrar, quando necessário, uma solução funcional em uma obra de recuperação de um pavimento de uma rodovia (COLPO, 2014).

2.3.2 Carregamentos de tensões elevadas

A aplicação de carregamentos de altas tensões nos pavimentos pode causar a deformação permanente, também conhecida como afundamento de trilha de roda. As

deformações permanentes são depressões longitudinais que amplificam com a repetição de cargas impostas pelo tráfego de veículos (MAHMOUD e BAHIA, 2004). O afundamento de trilha pode prejudicar a regularidade da pista, a dinâmica de cargas, a qualidade do rolamento e o custo operacional dos veículos, bem como a segurança dos usuários (PEREIRA, 2007).

De acordo com o Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) as causas gerais das deformações permanentes podem ser associadas com o carregamento ou não. Ainda segundo o DNIT (2006), deformações permanentes associadas ao carregamento podem ocorrer devido a cargas concentradas ou em excesso, carregamentos de longa duração ou estático e/ou grande número de repetições de carga. Quando não associados ao carregamento, pode ocorrer devido um subleito constituído de solo expansivo ou solos compressíveis na fundação do pavimento (DNIT, 2006)

De acordo com Bernucci et al. (2010), a deformação permanente pode ocorrer em qualquer camada da estrutura. A Figura 8 (a) apresenta a ocorrência de afundamento de trilha de roda no revestimento e a Figura 8 (b) indica a ocorrência dessas deformações nas subcamadas da estrutura.

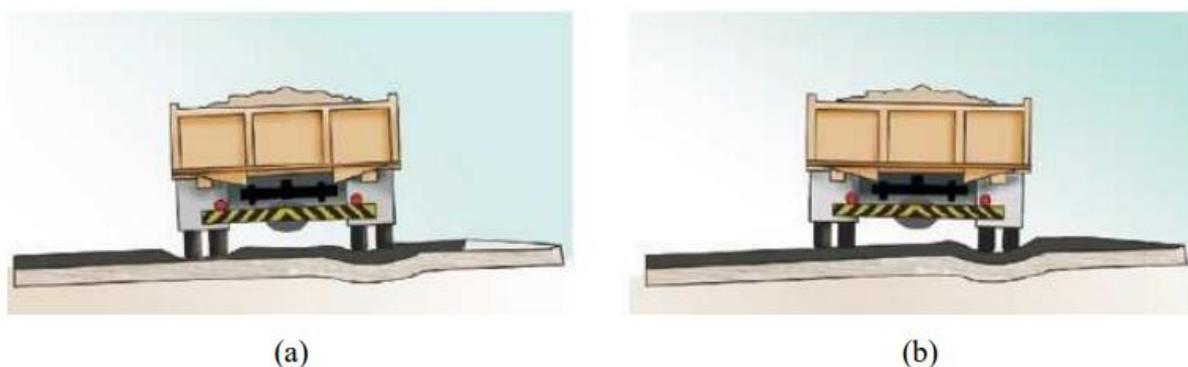


Figura 8 – Afundamento de trilha de rodas atribuído somente ao revestimento (a); atribuído às diversas camadas do pavimento (b) Fonte: Bernucci et al. (2010).

A deformação permanente ocorre devido à tensão de compressão causada pela carga de tráfego proveniente do percurso da roda (BERNUCCI et al., 2010). A Figura 9 ilustra de maneira esquemática a área sob essa tensão de compressão, chamada

de zona ativa. De cada lado da zona ativa existem as zonas passivas e a deformação dessa zona passiva ocorre a partir da deformação da zona ativa (BORGES, 2014).

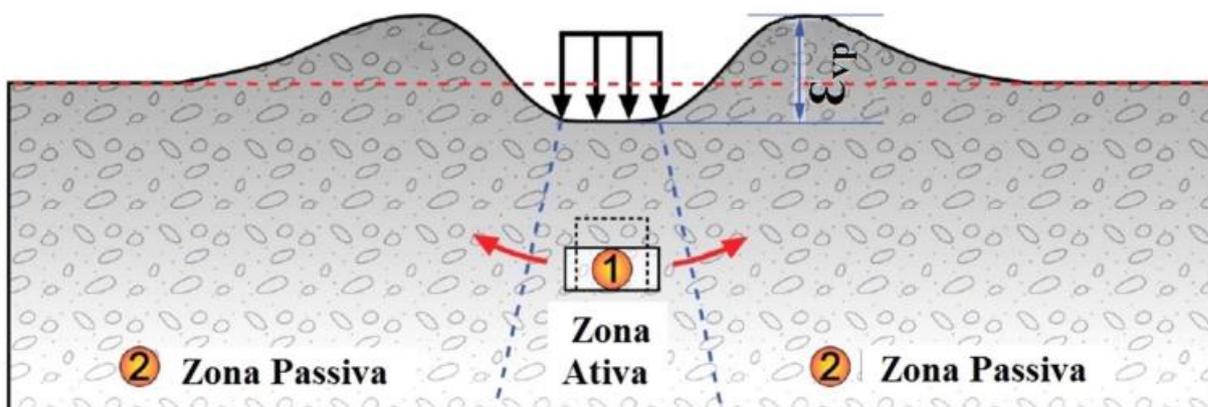


Figura 9 – Diagrama esquemático do mecanismo de formação de deformação permanente. Fonte: Borges (2014).

A Figura 9 permite observar que quando a zona ativa se deforma verticalmente, ocorre também a deformação lateral devido ao efeito Poisson (BORGES, 2014). Ainda, de acordo com Borges (2014), é possível observar a ocorrência de uma pressão de confinamento contra a zona ativa e, ao longo do tempo, surgem as deformações permanentes (indicado na Figura 9 como ϵ_{vp}).

2.4 Bacias de deflexão

Segundo Bernucci et al. (2010), a capacidade de uma estrutura de pavimento é definida através das deformações geradas quando submetida a uma carga conhecida. As deformações sofridas manifestam-se em duas componentes: deformações plásticas – também conhecidas como deformações permanentes – e deformações elásticas – ou deformações recuperáveis.

O DNIT (2006) define as deformações plásticas como a parcela do deslocamento vertical que se mantêm na estrutura após o descarregamento, ou seja, caracterizam-se como residuais. Tais deformações são responsáveis pelo afundamento nas trilhas de roda (DNIT, 2006).

As deformações elásticas referem-se a parcela do deslocamento vertical devido à aplicação de uma carga na estrutura do pavimento, de modo que a estrutura volte à

sua posição inicial após o descarregamento. Essas deformações são responsáveis pelo fenômeno de fadiga da estrutura do pavimento (DNIT, 2006).

De acordo com Nobrega (2003), o carregamento aplicado e as características geométricas e elásticas das camadas de composição da estrutura de pavimento afetam diretamente no formato das bacias de deflexão. Segundo Devitte (2021), e, conforme mostra a Figura 10, quando aplicado um carregamento, a região na qual são impostos os esforços se alarga em função da profundidade e das propriedades mecânicas das camadas existentes. Assim, é possível perceber a influência do arranjo estrutural na deflexão em todo o pavimento (DEVITTE, 2021).

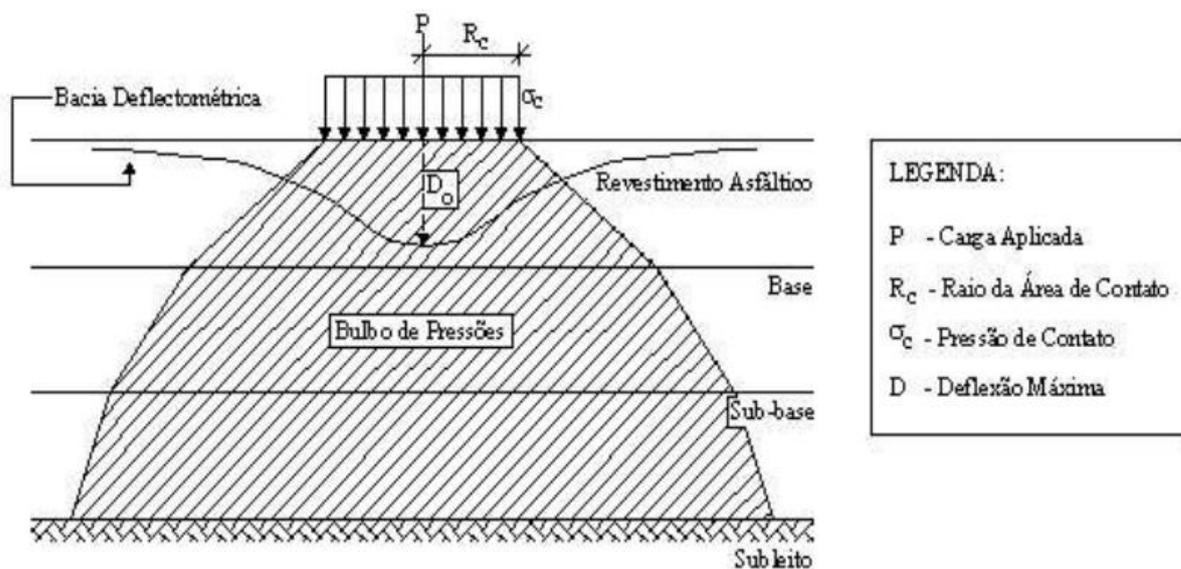


Figura 10 – Ilustração da região do pavimento quando submetida aos esforços de cargas. Fonte: Nobrega, (2003).

A deflexão de um pavimento gerada por um carregamento é chamada deformação recuperável e possui a forma de uma elipse. A superfície de influência gerada a partir desse carregamento é denominada bacia de deflexão (DEVITTE, 2021). A Figura 11 ilustra uma bacia de deflexão gerada a partir de um ponto de aplicação de carga.

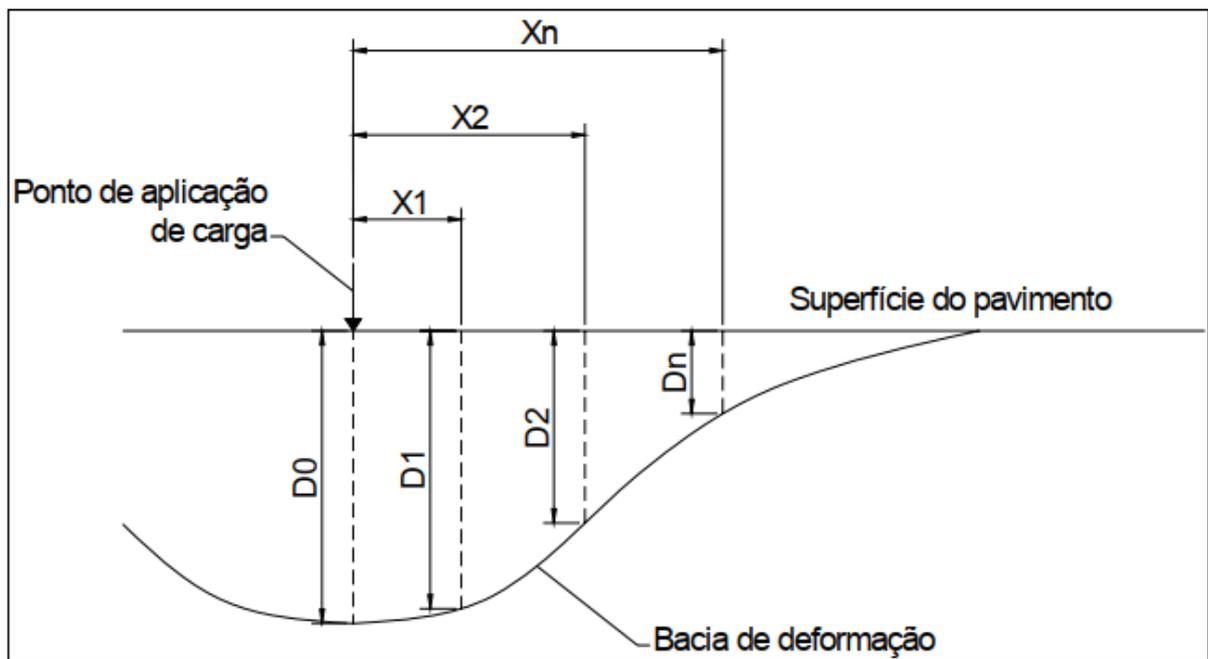


Figura 11 – Ilustração de uma bacia de deflexão. Fonte: Pereira (2007).

2.5 Métodos de avaliação estrutural

2.5.1 Métodos destrutivos

Conforme estudos realizados por Bernucci et al. (2010), os métodos destrutivos se caracterizam por analisar a condição estrutural de cada camada que compõe determinado pavimento através de abertura de trincheiras ou poços de sondagem. Nesse método, são recolhidos corpos de prova para obtenção de amostras do material de cada camada existente. Ao retirar a amostra, é possível identificar as espessuras e os materiais que compõem cada camada do pavimento. A partir disso, é possível realizar ensaios laboratoriais que permitem identificar parâmetros como umidade e massa específica das camadas, possibilitando a avaliação desses materiais. Porém, devido a sua característica destrutiva, o método pode ser realizado apenas em alguns pontos determinados (BERNUCCI et al., 2010).

O método utilizado para avaliação estrutural destrutiva é a Sondagem Rotativa (SR), que consiste na retirada de amostras de materiais através de um conjunto motomecanizado (ABGE, 2013) A Figura 12 (a) apresenta a sonda rotativa, instrumento utilizado para a retirada de corpos de prova dos pavimentos. Já a Figura

12 (b) mostra a sonda rotativa sendo utilizada para a retirada de um corpo de prova. A sonda possui uma ação perfurante dada por forças de penetração e rotação que atuam com poder cortante (ABGE, 2013).

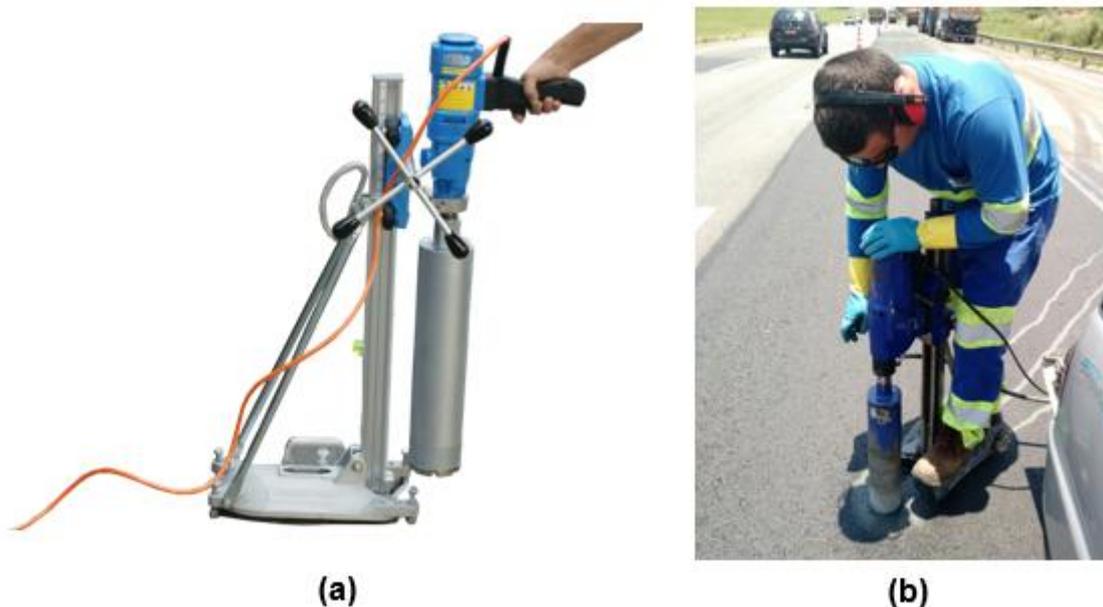


Figura 12 – Retirada de corpos de prova em métodos destrutivos. (a) Sonda rotativa utilizada para a retirada de corpos de prova. Fonte: TCE-GO. (b) Sonda rotatória em utilização. Fonte: Grupo Sanson.

2.5.2 Métodos semidestrutivos

Os métodos semidestrutivos, de maneira geral, também são métodos destrutivos. Porém, permitem janelas e aberturas menores no pavimento e são realizados com instrumentos portáteis e com dimensões menores quando comparados à sonda rotativa (SOUZA, 2018).

De acordo com Torres (2017), o instrumento mais utilizado para realizar o teste é o *Dynamic Cone Penetrometer* – DCP (Cone Dinâmico de Penetração). O DCP é um equipamento compacto e de fácil aplicação, o que diminui consideravelmente o tempo de execução do teste (TORRES, 2017) No entanto, existe uma limitação nas informações que o ensaio fornece como, por exemplo, fornecer apenas um parâmetro de comparação com o CBR (*California Bearing Ratio*), somado ao fato de se aplicar

apenas às camadas mais profundas, não contemplando o revestimento asfáltico (SOUZA, 2018).



(a)



(b)

Figura 13 – Método semidestrutivo de análise do pavimento. (a) Cone Dinâmico de Penetração. Fonte: Solotest. (b) Equipamento em uso. Fonte: Prongila

2.5.3 Métodos não-destrutivos

Os métodos não-destrutivos, por sua vez, não danificam a estrutura pré-existente e exigem pouca ou nenhuma interferência no trânsito de veículos, além de permitir a aplicação em uma extensão maior do trecho e permitir uma variedade superior de dados quando comparados aos métodos destrutivos e semidestrutivos (PEREIRA, 2007). Atualmente, os métodos não-destrutivos são ideais para aplicação em grandes extensões e permitem a repetição do teste em diversos pontos (PEREIRA, 2007). Dentre as desvantagens do método não-destrutivo, segundo Albernaz, Caldas e Oliveira (1996) estão a necessidade de alto grau de exatidão no levantamento das bacias de deflexão e a constante necessidade de aferição dos instrumentos e confiabilidade dos procedimentos operacionais.

De acordo com Pereira (2007), os métodos não-destrutivos são realizados com equipamentos deflectométricos, que medem os deslocamentos recuperáveis do pavimento quando este é submetido a uma carga conhecida. As deflexões e a deformabilidade de um pavimento flexível refletem as condições estruturais de suas camadas e do subleito, mostrando-se fundamentais para a compreensão do seu comportamento.

O deslocamento resultante do tráfego possui duas componentes: a deformação elástica e a deformação permanente. A repetição da deformação elástica pode resultar em trincamentos e o acúmulo de deformação permanente pode resultar no afundamento de trilha de roda. Tais deformações advindas do tráfego sobre o pavimento dependem de alguns fatores como o valor da carga aplicada, pressão dos pneus, posição de aplicação da carga, geometria do carregamento, dentre outros (PEREIRA, 2007).

De acordo com Haas et al. (1994), os equipamentos deflectométricos utilizados para avaliação não-destrutiva são categorizados de acordo com o tipo de carregamento aplicado no pavimento, conforme indicado na Tabela 1 e descrito nas linhas que seguem.

Tabela 1 - Tipos de carregamentos e equipamentos utilizados. Fonte: Haas et al., (1994)

Tipos de carregamento	Equipamentos utilizados
Estático	Ensaio de placa
	Viga Benkelman
	Viga Benkelman automatizada
Vibratório	Dynaflect
	Road Rater
Por impulso	FWD

Conforme observado na Tabela 1, para o carregamento estático, existem três tipos de avaliações, sendo elas o ensaio de placa; a Viga Benkelman; e a Viga Benkelman automatizada. O ensaio de placa, também conhecido como “prova de carga”, normatizado pela NBR 6489 (ABNT, 2019), consiste na aplicação de um carregamento em modelo reduzido de uma sapata de forma a obter os parâmetros de deformação do solo a partir da variação da intensidade dessa carga aplicada (HACHICH et al., 1998). A carga é aplicada por um macaco hidráulico em uma placa rígida a fim de medir o valor da pressão aplicada e o respectivo recalque através dos deflectômetros. A prova de carga é um ensaio que demanda tempo e trabalho, o que explica a razão pela qual o procedimento não é muito utilizado para a avaliação de pavimentos (PEREIRA, 2007).

Já a Viga Benkelman, instrumento utilizado na coleta de dados do presente trabalho, é o aparelho mais utilizado para medições deflectométricas em pavimentos no Brasil e no mundo principalmente por ser relativamente simples, barato e eficiente. (PEREIRA, 2007). Criado na década de 1950, o aparelho leva o nome de seu inventor, A. C. Benkelman, em conjunto com a *WASHO Road Test*.

A automatização da Viga Benkelman surgiu com a necessidade de diminuir o tempo de medidas deflectométricas. Dessa forma, foram desenvolvidos deflectógrafos como o La Croix, na França, o *Travelling Deflectometer*, na Califórnia e o Deflectógrafo Digital, da Solotest no Brasil. Os equipamentos automatizados deslocam-se com velocidades predeterminadas, realizando as medidas deflectométricas simultâneas das trilhas de roda internas e externas (BORGES, 2001).

No que tange o carregamento vibratório, existem diversos tipos de avaliações, destacando-se o *Road Rater* e o *Dynaflect*. O *Road Rater* mede a deflexão do pavimento através de quatro transdutores de velocidade, sendo um localizado no centro da placa de carregamento e os outros três alinhados em intervalos de 12 polegadas. A força senoidal gerada pela aceleração hidráulica de massas de aço permite a obtenção da bacia de deflexão (CASTRO, 2009). A operação é ágil e fornece dados suficientes para a tomada da bacia de deflexão, porém, possui a desvantagem da necessidade da aplicação de uma pré-carga estática cerca de três vezes maior que

a carga dinâmica para evitar o repique da placa de carga no pavimento, procedimento que altera todo estado de tensões do pavimento (DNIT, 2006).

O *Dynaflect* é o equipamento mais utilizado nos Estados Unidos após a Viga Benkelman e primeiro aparelho a utilizar o modo dinâmico de carregamento, aplicando no pavimento uma carga vibratória constante de 4450 N e em uma frequência de 8 Hz (BORGES, 2001). O equipamento é montado em um veículo do tipo reboque e possui sua operação controlada de dentro da cabine do motorista. A carga é aplicada e as deformações verticais produzidas são registradas por transdutores alinhados em uma barra, que geram a bacia de deflexão (PEREIRA, 2007). O equipamento reproduz de maneira competente os resultados, porém, por aplicar uma carga relativamente pequena, pode não produzir deflexões em pavimentos de estrutura pesada de maneira adequada (CASTRO, 2009). Além disso, possui a mesma desvantagem da necessidade da aplicação da pré-carga estática maior que a carga dinâmica citada no *Road Rater*.

O carregamento por impulso por sua vez utiliza deflectômetros do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD), equipamentos que consistem em um sistema de colisão de massa em uma placa amortecida para realizar medidas de deflexão em um pavimento. Alguns sugerem que a força criada pelo FWD se aproxima mais das situações reais do que as realizadas por equipamentos estáticos e vibratórios (PEREIRA, 2007). Em conjunto com sua versatilidade, precisão, rapidez e produtividade elevada, os deflectômetros do tipo FWD têm sido cada vez mais aceitos e utilizados em avaliações estruturais de pavimentos (BORGES, 2001)

Dentre os modelos de deflectômetros FWD citam-se o *Dynatest FWD*, *KUAB FWD* e *Phoenix FWD*. De acordo com Tholen et al (1985), os equipamentos possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém, se diferem com relação à forma de geração de impulso, forma de distribuição da carga na superfície do pavimento e quanto ao tipo de transdutor/sensor utilizado na aferição das deflexões.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada envolveu a realização de ensaio em campo com a Viga Benkelman, a análise e tratamento dos dados obtidos através do equipamento para 5 pontos de teste, com o objetivo de obter as leituras das bacias de deflexão do pavimento. O trecho em questão está localizado na Rua Dois, em frente a biblioteca da Escola de Nutrição, no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto. Para tanto, foram seguidas as etapas apresentadas na Figura 14 e descritas posteriormente.

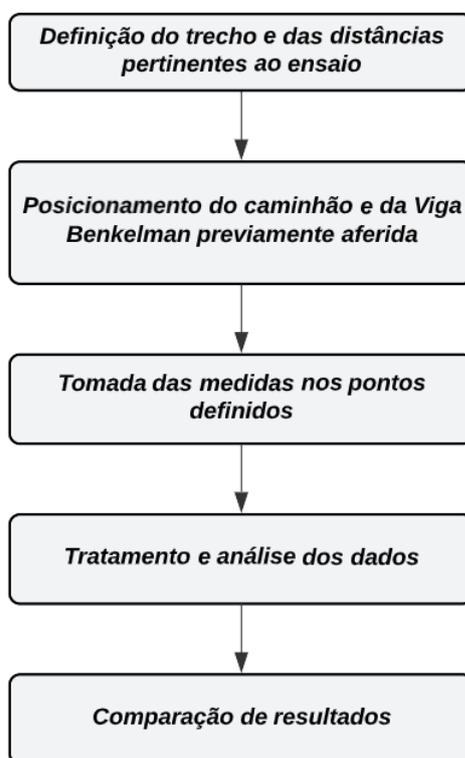


Figura 14 – Fluxograma simplificado das etapas do ensaio. Fonte: Autoria própria.

A partir da análise do dimensionamento do pavimento do Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto, foi definido um trecho para a realização do ensaio com a Viga Benkelman, com o objetivo de verificar suas condições atuais. Foram feitas demarcações ao longo do trecho com a finalidade de

definir onde seriam realizadas as leituras necessárias ao estudo. Ademais, foi realizado o ensaio de medição das bacias de deflexão com a aplicação de uma carga. Para tal, foi posicionado um caminhão com uma carga predefinida e a Viga Benkelman, aparelho utilizado para medir as deformações no pavimento. A partir do tratamento e análise dos dados obtidos, a deflexão medida em campo foi comparada com a deflexão admissível para a camada de revestimento do Campus.

3.1 Descrição área da pesquisa

O objeto de estudo do presente trabalho é o pavimento do Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, localizado na cidade de Ouro Preto – Minas Gerais. A estrutura foi construída em 1983 e, durante esses 39 anos não houve ajuste ou manutenção. Foi selecionado um trecho de aproximadamente 100 m para a realização do ensaio na Rua Dois, em frente a biblioteca da Escola de Nutrição, conforme mostra a Figura 15. Para a seleção do trecho que seria utilizado, foi levado em consideração o baixo fluxo de veículos em comparação com as demais ruas do Campus. A seta dupla em vermelho mostra a localização aproximada do local.



Figura 15 – Localização da Universidade Federal de Ouro Preto e a área de realização do ensaio. Fonte: Elaboração própria a partir do Google Maps.

A pista do trecho analisado possui 5,80 m de largura. Dessa forma, os pontos foram demarcados a uma distância de 0,90 m da borda do revestimento. A Figura 16 mostra o trecho em que foi aplicado o ensaio da Viga Benkelman apresentado no presente trabalho. Com base na Figura 16 é possível observar as marcações do ensaio já realizadas, obedecendo a distância da borda do revestimento, de acordo com a norma DNER (1994), conforme mostra a dupla seta vermelha.



Figura 16 – Local de realização do ensaio. Fonte: Arquivo pessoal.

Devido ao alto fluxo de veículos no sentido horário do Campus, o ensaio de campo foi realizado no sentido anti-horário, conforme mostra a seta amarela. Na imagem acima também é possível visualizar as demarcações utilizadas para a medida das deflexões. Foram marcados seis pontos com o objetivo de obter as leituras L_0 , L_{25} , L_{50} , L_{75} , L_{100} e L_{125} .

3.2 Dimensionamento do pavimento existente no Campus Morro do Cruzeiro

Gontijo (2021) realizou um estudo da estrutura do pavimento do Campus Morro do Cruzeiro utilizando o método MeDiNa para dimensionamento de pavimentos. Os resultados obtidos no estudo foram utilizados como base para definição das dimensões do pavimento do Campus. Ademais, a partir de um estudo realizado por Faria et al. (2019), utilizando o método de dimensionamento tradicional do DNER, Gontijo (2021) realizou o dimensionamento do pavimento através do método MeDiNa, validando as dimensões encontradas por Faria et al. (2019). Dessa forma, através de coleta de amostras e ensaios realizados, foram encontradas as espessuras das camadas de revestimento (R), base (B), sub-base (h_{20}) e subleito (H_n) do pavimento executado no Campus, conforme mostra a Figura 17. O número N encontrado foi de $1,07 \times 10^6$.

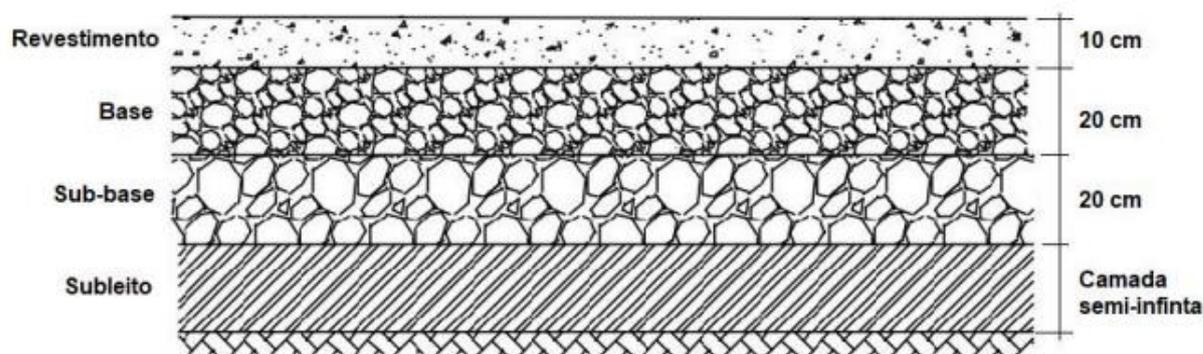


Figura 17 – Dimensionamento do pavimento da Universidade Federal de Ouro Preto através do software MeDiNa. Fonte: Gontijo (2021).

3.3 Características da Viga Benkelman

A Viga Benkelman utilizada no ensaio de campo estava previamente calibrada, e possuía a relação de a/b igual a $4/1$, conforme mostra a Figura 20. De acordo com a especificação da viga, o coeficiente de recalque (k) utilizado foi $k = 3,9921$. A Figura 18 indica o equipamento momentos antes do ensaio, ainda desmontada, e a Figura 19, a Viga em processo de montagem, já no local de ensaio.



Figura 18 - Viga Benkelman. Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 19 – Viga Benkelman em processo de montagem. Fonte: Arquivo pessoal.

3.4 Ensaio de campo com a Viga Benkelman

O ensaio com a Viga Benkelman é normatizado pela norma DNER-ME 061/94 (DNER, 1994), que prescreve o método para a determinação das deflexões em pavimentos rodoviários pela Viga Benkelman (PEREIRA, 2007). A Figura 20 apresenta um esquema da Viga Benkelman e seus principais componentes e medidas (i.e., a = distância entre a articulação e a ponta de prova; b = distância entre o extensômetro e a articulação; c = distância entre a articulação e o pé dianteiro; d = distância entre a articulação e o pé traseiro).

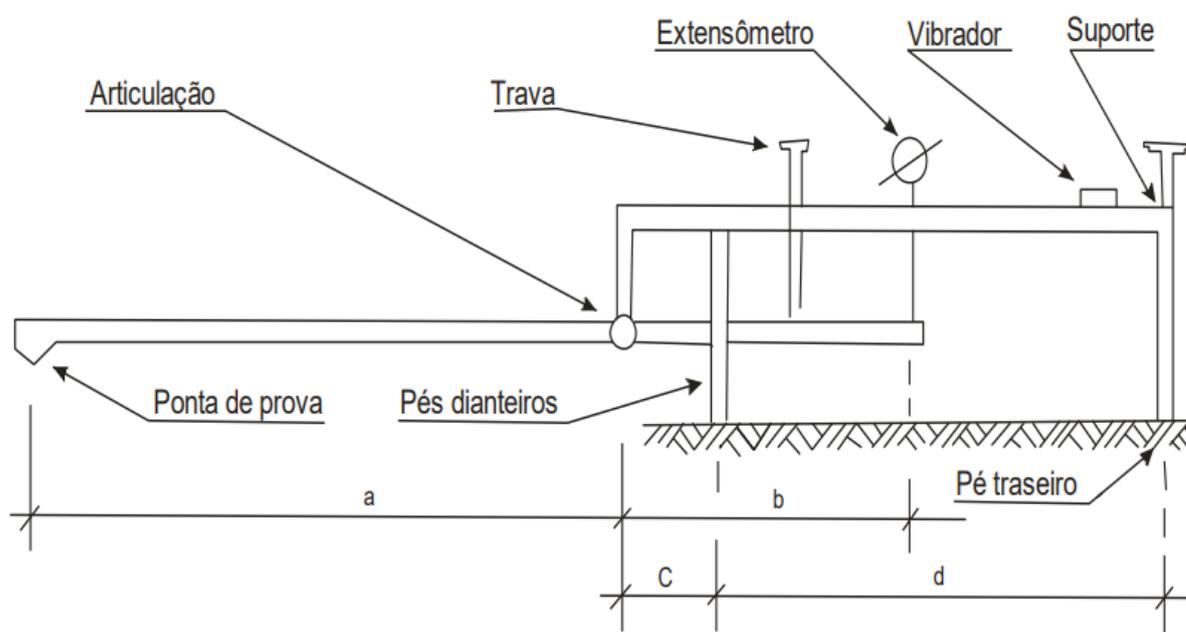


Figura 20 – Esquema da Viga Benkelman. Fonte: DNER (1994)

De acordo com a norma DNER (1994) a aparelhagem necessária ao ensaio com a Viga Benkelman é constituída de alguns elementos, sendo eles:

1. Viga Benkelman (VB), constituída por um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa, formando dois braços cujos comprimentos "a" e "b" obedecem às relações de 2/1, 3/1 ou 4/1. A Figura 20 mostra os principais elementos que compõem a VB: a ponta de prova para auxiliar na leitura do extensômetro; a articulação que conecta a parte móvel com a parte fixa da viga; a trava que fixa a parte fixa da viga composta pelo extensômetro e a parte móvel; o extensômetro com precisão de décimos de milímetro; o vibrador que

- busca vencer o atrito entre as peças móveis e inibir variações não previstas no extensômetro e o suporte que apoia a viga nos pés dianteiros e traseiros;
2. Caminhão carregado com 8,2 tf no eixo traseiro, simetricamente distribuída em relação às rodas. O eixo traseiro deve ser simples e com roda dupla;
 3. Pneus com dimensões de 1.000 x 20 ou 900 x 20, com 12 lonas, tipo “com câmara” e frisos na faixa de rodagem. Os pneus devem estar calibrados à pressão 80 lb/pol²;
 4. Calibrador para medir a pressão dos pneus.

Antes da realização do ensaio propriamente dito, é necessário aferir a Viga Benkelman conforme a norma DNER-PRO 175/94 (DNER, 1994). Para tal, é necessária uma prensa para determinação do CBR composta por um quadro formado por base e travessa de ferro fundido, 4 tirantes de aço e um macaco de engrenagem de operação manual por movimento giratório de uma manivela acompanhado de um prato reforçador ajustável ao macaco, com 24 cm de diâmetro. Além disso, é necessário um extensômetro mecânico de sensibilidade mínima de 0,01 mm e um conjunto para fixação do extensômetro no tirante de aço (DNER, 1994).

Para a realização da aferição da VB, é necessário posicioná-la em uma mesa, liberar a trava e apoiar a ponta de prova no centro do prato da prensa a fim de receber os movimentos verticais do conjunto de articulação (DNER, 1994). O próximo passo é ligar o vibrador e fixar o extensômetro no tirante de aço da prensa para que a ponta toque no prato da prensa e zere o extensômetro. Feito isso, é necessário acionar a manivela da prensa com o dispositivo micrométrico a uma velocidade de 0,5mm/min (carga) e realizar as leituras no extensômetro a cada 0,1 mm até 0,8 mm e a cada 0,2 mm até 2,2 mm, totalizado 15 leituras. Então, todos os passos são repetidos com a finalidade de melhor caracterizar a constante de aferição (DNER, 1994).

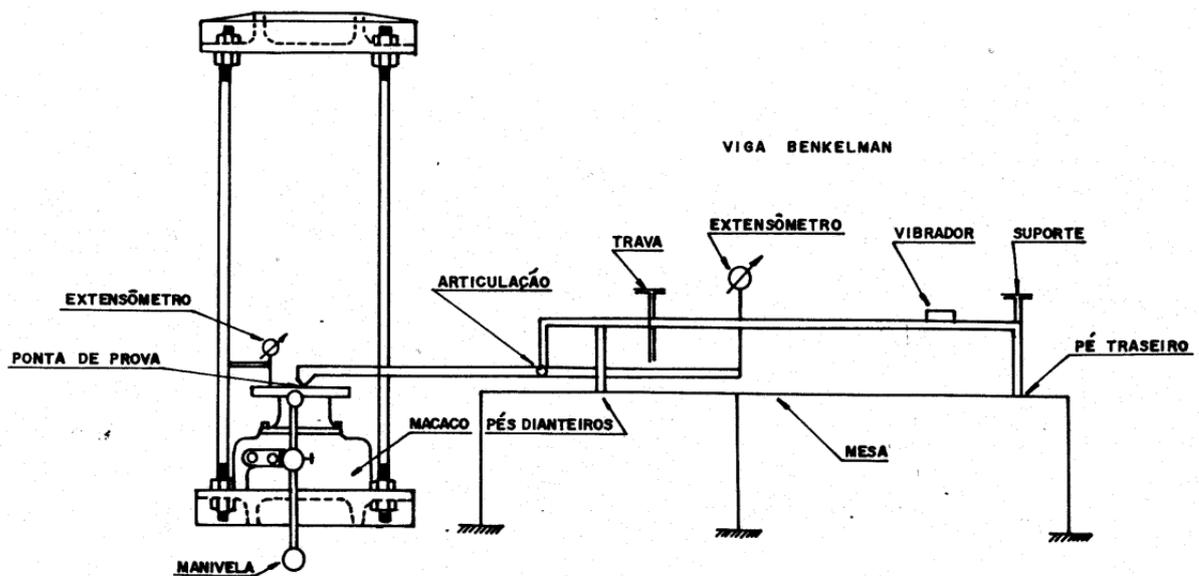


Figura 21 – Desenho esquemático da aferição da Viga Benkelman. Fonte: DNIT (1994).

A partir das leituras obtidas, devem ser realizados os cálculos necessários para avaliar se a viga está apta para realização do ensaio: relação entre as leituras do extensômetro da prensa e o extensômetro da viga, média aritmética da relação, desvio padrão, erro de estimativa e intervalos de confiança. Dessa forma, é possível obter a constante a ser utilizada nos cálculos das deflexões (DNER, 1994). Para a realização do ensaio, os pontos que serão medidas as deflexão devem ser marcados de acordo com a largura da faixa conforme indicado na Tabela 2, disponibilizada pelo DNIT (1994).

Tabela 2 – Localização dos pontos. Fonte: DNIT (1994)

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	0,90

Segundo a norma (DNIT, 1994), marcados os pontos, o caminhão pode ser posicionado de forma que as rodas do eixo traseiro estejam no primeiro ponto de medição. Ademais, um dos conjuntos de rodas duplas traseiras deve ser posicionado no centro do ponto selecionado na trilha externa. É importante que o eixo de carga do caminhão fique perpendicular ao eixo da pista de rolamento. Feito isso, a ponta de prova da Viga Benkelman deve ser posicionada entre os pneus da roda dupla. Então, deve-se liberar a trava e ajustar o pé traseiro da viga para que o extensômetro fique aproximadamente a meio curso (DNIT, 1994).

Para obter a leitura de uma deflexão, ao posicionar o caminhão e ajustar a viga, liga-se o vibrador e faz-se a leitura inicial (L_0). O caminhão deve ser deslocado lentamente por aproximadamente 10 metros – ou até que seu peso não mais exerça influência sobre a viga – e, então, é feita a leitura final (L_f). O vibrador deve ser desligado e, dessa forma, a viga pode ser transportada para o próximo ponto de medição (DNIT, 1994). Para obter a bacia de deflexão de um determinado trecho, faz-se necessário realizar leituras intermediárias, enquanto o carregamento ainda exerce influência sobre o pavimento. Dessa forma, à medida que o caminhão se desloca, são aferidas as diversas deformações em pontos previamente definidos (VARGAS, 2019). Para a determinação do raio de curvatura da bacia de deflexão, é necessário fazer uma medida após o deslocamento do eixo do caminhão 25 cm a frente do ponto de referência (DNIT, 1994). A Figura 22 ilustra o posicionamento da viga e do caminhão.

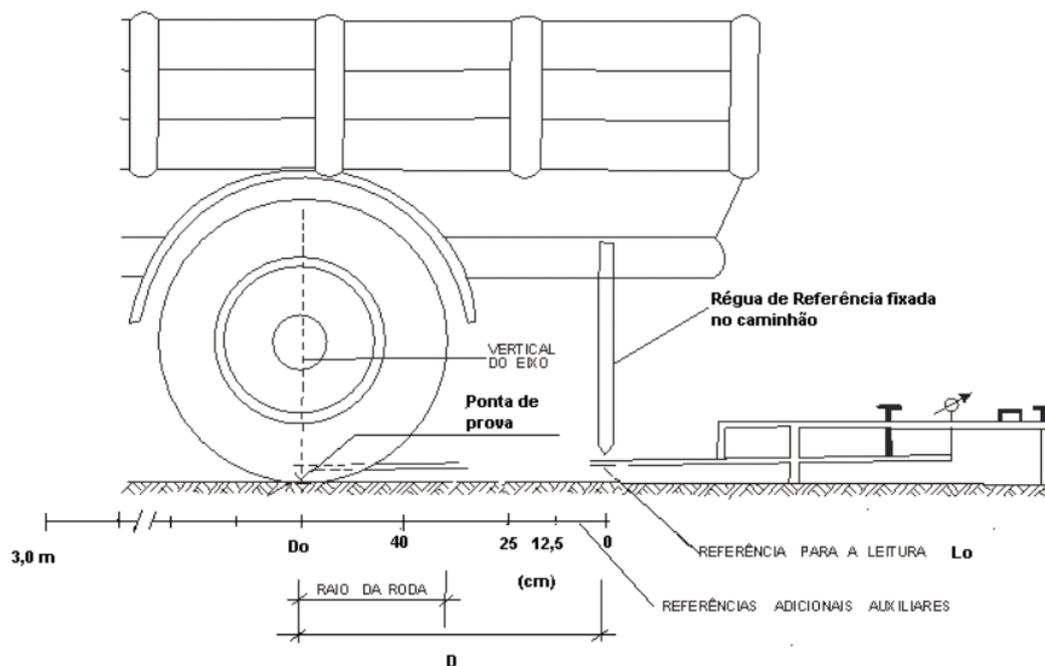


Figura 22 – Desenho esquemático do sistema de referência na Viga e no caminhão.

Fonte: DNIT (1994)

A deflexão (D_0) na ponta de prova é dada pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

$$D_0 = (L_0 - L_f) \times \frac{a}{b} \quad (1)$$

Onde,

D_0 – Deflexão real (centésimo de milímetros)

L_0 – Leitura inicial (centésimo de milímetros)

L_f – Leitura final (centésimo de milímetros)

a – Distância entre a ponta de prova e a articulação da Viga (ver Figura 20)

b – Distância entre a articulação e o extensômetro da Viga (ver Figura 20)

A deflexão admissível (D_{adm}) para cada pavimento é obtida a partir do número N – número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 tf (DNIT, 2006). A deflexão admissível define um limite máximo para que o pavimento consiga resistir a determinado número N (Instrução de projeto de reforço para restauração de

pavimentos flexíveis - IP 09) e pode ser calculado segundo a Equação **Erro! Fonte d e referência não encontrada..**

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (2)$$

O raio de curvatura (R), indicativo do arqueamento da bacia na posição mais crítica (VARGAS, 2019), é dado pela Equação **Erro! Fonte de referência não e ncontrada..**

$$R = \frac{6.250}{2 \times (D_0 - D_{25})} \quad (3)$$

Onde:

R – Raio de curvatura (metros);

D₀ – Deflexão real (centésimo de milímetros);

D₂₅ – Deflexão a 25 cm do ponto de prova (centésimo de milímetros).

A partir da média das deflexões e do desvio padrão é possível encontrar a deflexão característica do pavimento, que permite a realização do cálculo da espessura da camada de reforço a ser utilizada em uma restauração de pavimento (IP-09), bem como a avaliação estrutural do pavimento de acordo com a Tabela 3 (DNIT, 1979).

Tabela 3 - Critérios para avaliação estrutural de pavimentos. Fonte: DNIT (1979).

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de reforço	Medidas corretivas
I	D _p ≤ D _{adm} R ≥ 100	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	D _p > D _{adm} R ≥ 100	Se D _p ≤ 3D _{adm} REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de reforço	Medidas corretivas
		Se $D_p > 3D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas	SIM	Resistência	Reconstrução

O ensaio com a Viga Benkelman foi realizado no dia 11 de outubro de 2022, às 13h30. Inicialmente, foram definidas as cinco estacas em que seriam feitas as medidas de deflexão. As estacas foram separadas de 20 m em 20 m, alternando os eixos, totalizando um trecho de aproximadamente 100 m. A largura da faixa de tráfego do Campus possui 5,80 m, então, cada ponto de ensaio localizava-se a 0,9 m da borda do revestimento conforme apresentado na Tabela 2. A partir de cada estaca, foram marcados seis pontos equidistantes 25 cm um do outro, conforme indicado na Figura 23.



Figura 23 – Demarcação dos pontos de tomada de medida. Fonte: Arquivo pessoal.

Marcados os pontos, foi posicionado um caminhão carregado com 9,0 tf por eixo, de eixo simples e rodas duplas calibradas a 80 lb/pol², conforme solicita a norma que rege o ensaio da Viga Benkelman (DNIT, 1994). O conjunto de rodas traseiras foi posicionado perpendicularmente ao pavimento, no centro do ponto, de acordo com a

régua

de

referência.

A



(a)



(b)

Figura 24 (a) mostra o caminhão já posicionado no primeiro ponto de ensaio. A partir da



(a)



(b)

Figura 24 (a), é possível localizar a régua de referência utilizada, bem como sua projeção no pavimento bem acima do ponto de análise. Com o caminhão no local de medição, foi posicionada a Viga Benkelman com a ponta de prova entre os pneus da

roda dupla, conforme indicado na



(a)



(b)

Figura 24 (b).



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Caminhão posicionado. Fonte: Arquivo pessoal. (b) Vista geral do caminhão com a Viga Benkelman sendo posicionada entre as rodas. Fonte: Arquivo

Feito o posicionamento e alinhamento da Viga Benkelman, o extensômetro digital foi zerado e o vibrador ligado para que fosse realizado o ensaio propriamente dito. A

leitura da bacia de deflexão no primeiro ponto foi realizada no lado externo da faixa de tráfego, ou seja, no par de rodas localizado na parte mais externa da pista. A Figura 25 aponta como foi a diferenciação dos lados da faixa de tráfego: a seta vermelha indica a trilha de roda externa (T.R.E.) e a seta amarela indica a trilha de roda interna (T.R.I.).



Figura 25 – Diferenciação das faixas externa e interna de tráfego. Fonte: Arquivo pessoal.

Então, o caminhão moveu-se lentamente e através do extensômetro foram feitas as leituras das deflexões no ponto 0 (L_0), 25 cm (L_{25}), 50 cm (L_{50}), 75 cm (L_{75}), 100 cm (L_{100}) e 125 cm (L_{125}) – ou ponto final (L_f), – onde já não mais havia influência do caminhão na deflexão do pavimento. Dessa forma, à medida que o caminhão avança, o extensômetro indica a deformação em determinados locais.

A próxima estaca de leitura de deflexões situava-se a 20 m de distância e as medidas foram aferidas do lado interno da faixa de tráfego, ou seja, no par de rodas localizado na parte mais interna da pista. O procedimento para a leitura das deflexões foi o mesmo para todos os outros pontos, sempre alternando o lado dos eixos.

4 RESULTADOS

Após realização do ensaio com a Viga Benkelman em campo, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4. Nota-se que os valores são correspondentes àqueles no extensômetro em cada ponto predeterminado na ordem de milésimos de milímetros.

Tabela 4 – Leituras do extensômetro em cada ponto de interesse. Fonte: Elaboração própria.

Estaca		Leituras (x 0,01 mm)					
		L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅
1	T.R.E.	0	4	9	15	16	16
2	T.R.I.	0	5	11	14	15	17
3	T.R.E.	0	5	17	21	22	22
4	T.R.I.	0	5	13	17	20	21
5	T.R.E.	0	9	21	25	26	26

Cada linha da Tabela 4 se refere a uma estaca, e cada coluna se refere a um dos pontos onde foram aferidas as deflexões no pavimento. Para o trabalho de campo foi utilizado um extensômetro digital zerado no ponto inicial e as deflexões foram obtidas em ordem crescente. Nesse sentido, o aparelho indica deformação igual a 0 no primeiro ponto de leitura, o que não condiz com a realidade, visto que é exatamente no ponto inicial onde está a maior deflexão.

Dessa forma, os valores foram invertidos para melhor efeito de visualização do fenômeno de deformação do pavimento tal qual a realidade. A Tabela 5 apresenta as medidas de deflexão em cada ponto de interesse já ajustadas, de modo que o ponto 0 apresente, de fato, a maior deflexão obtida no ensaio.

Tabela 5 – Medidas de deflexões em cada ponto de interesse. Fonte: Elaboração própria.

Estaca		Leituras (x0,01 mm)					
		L0	L25	L50	L75	L100	L125
1	T.R.E.	16	15	13	9	4	0
2	T.R.I.	17	15	14	11	5	0
3	T.R.E.	22	21	17	15	5	0
4	T.R.I.	21	18	17	13	5	0
5	T.R.E.	26	24	22	20	9	0

A partir dos dados obtidos no extensômetro foi possível utilizar a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para obter a deflexão em cada ponto.

$$D_0 = (L_0 - L_{125}) \times \frac{a}{b}$$

$$D_0 = (16 - 0) \times 3,9921$$

$$D_0 = 16 \times 3,9921$$

$$D_0 = 63,874$$

A mesma equação foi utilizada para cada ponto para obtenção de todas as deflexões, alterando o L₀ e mantendo fixo o L₁₂₅. A Tabela 6 apresenta os valores de deflexão obtidos para cada ponto.

Tabela 6 – Deflexões por estaca em cada ponto analisado. Fonte: Elaboração própria.

Estaca	D ₀ (x 0,01 mm)	D ₂₅ (x 0,01 mm)	D ₅₀ (x 0,01 mm)	D ₇₅ (x 0,01 mm)	D ₁₀₀ (x 0,01 mm)
1 T.R.E.	63,874	59,882	51,897	35,929	15,968
2 T.R.I.	67,866	59,882	55,889	43,913	19,961
3 T.R.E.	87,826	83,834	67,866	59,882	19,961
4 T.R.I.	83,834	71,858	67,866	51,897	19,961
5 T.R.E.	103,795	95,810	87,826	79,842	35,929

No que tange ao raio de curvatura, foi utilizada a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para cálculo:

$$R = \frac{6.250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$$

$$R = \frac{6.250}{2 \times (63,874 - 59,882)}$$

$$R = 196,086$$

Foi utilizado o mesmo cálculo para a obtenção do raio de curvatura de cada bacia deflectométrica. Os resultados obtidos estão relacionados na Tabela 7.

Tabela 7 – Raios de curvatura. Fonte: Elaboração própria.

	Estaca	Raio de Curvatura (m)
1	T.R.E.	196,086
2	T.R.I.	98,043
3	T.R.E.	196,086
4	T.R.I.	65,362
5	T.R.E.	98,043

A partir das deflexões máximas obtidas em D_0 de cada estaca, foi encontrada a média (\bar{D}), o desvio padrão (d) e deflexão característica (D_p). Tais cálculos foram realizadas apenas nos pontos de máxima deflexão encontrados em cada bacia. O primeiro passo foi encontrar a média entre as deflexões máximas.

$$\bar{D} = \frac{\sum \text{Deflexões}}{n^\circ \text{ de estacas}}$$

$$\frac{407,194}{5}$$

$$\bar{D} = 81,439$$

O próximo passo foi calcular o desvio padrão:

$$d = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n - 1}}$$

$$d = 16,117$$

A deflexão característica (D_c) do pavimento pode ser definida como a soma da média entre as deflexões máximas e o desvio padrão.

$$D_p = \bar{D} + d$$

$$D_p = 81,483 + 16,117$$

$$D_p = 97,556$$

A deflexão admissível para o pavimento em estudo foi encontrada a partir da Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e do número N encontrado por Gontijo (2021):

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N$$

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log(1,7 \times 10^6)$$

$$D_{adm} = 81,930$$

Após realização de todos os cálculos necessários, foi possível obter o Gráfico 1, que mostra a curva de deflexão em cada estaca. A linha tracejada em vermelho define a deflexão máxima admissível (D_{adm}).

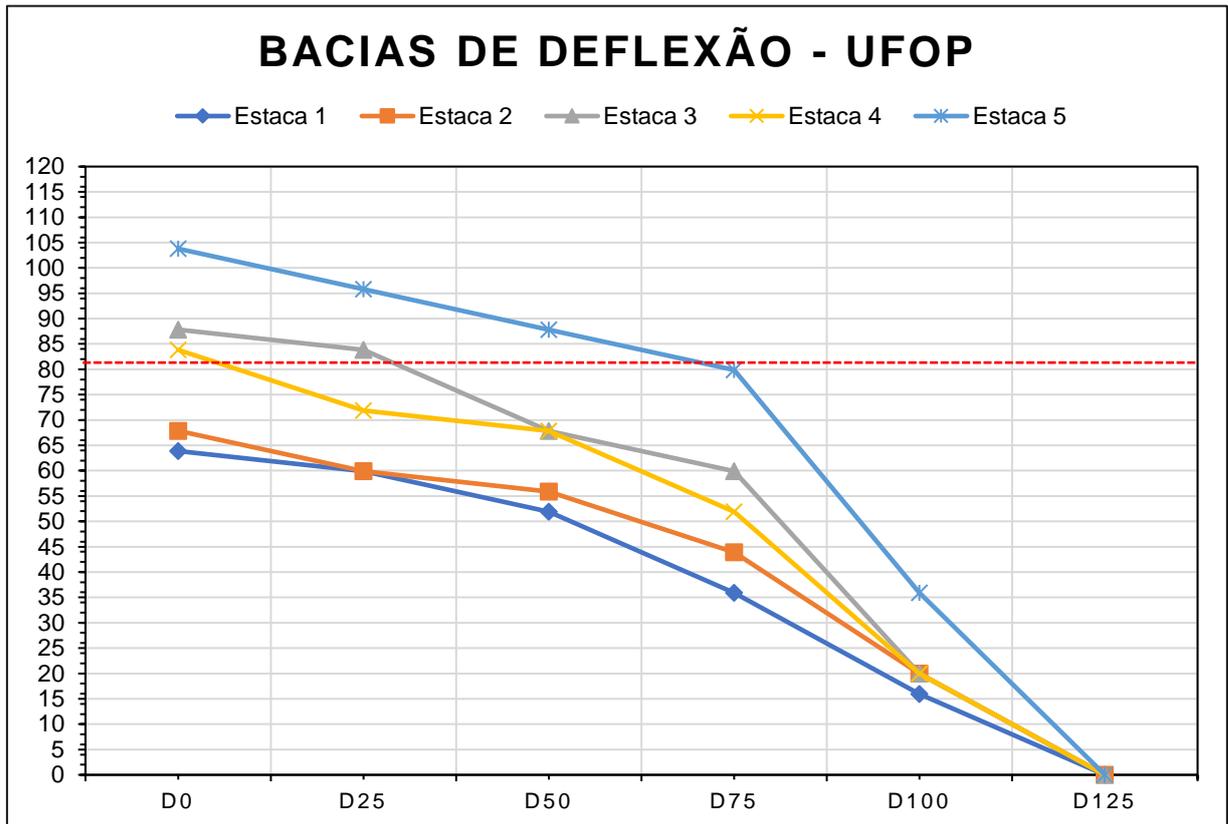


Gráfico 1 – Bacias deflectométricas obtidas em campo. Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise do gráfico acima é possível notar que as bacias de deflexão das estacas 1 e 2 estão completamente e consideravelmente abaixo da deflexão máxima admissível.

Com relação à estaca 3, ainda que a maioria dos pontos estejam abaixo da deflexão máxima admissível, é possível observar que seu ponto máximo de deflexão (D₀) já se encontra acima deste limite.

No que tange às estacas 4 e 5, é possível perceber que a deflexão máxima admissível é ultrapassada antes mesmo do ponto máximo de deflexão (D₀).

O Gráfico 2 apresenta as bacias de deflexão nos trilhos de roda externos e o Gráfico 3 mostra as bacias de deflexão nos trilhos de roda internos.

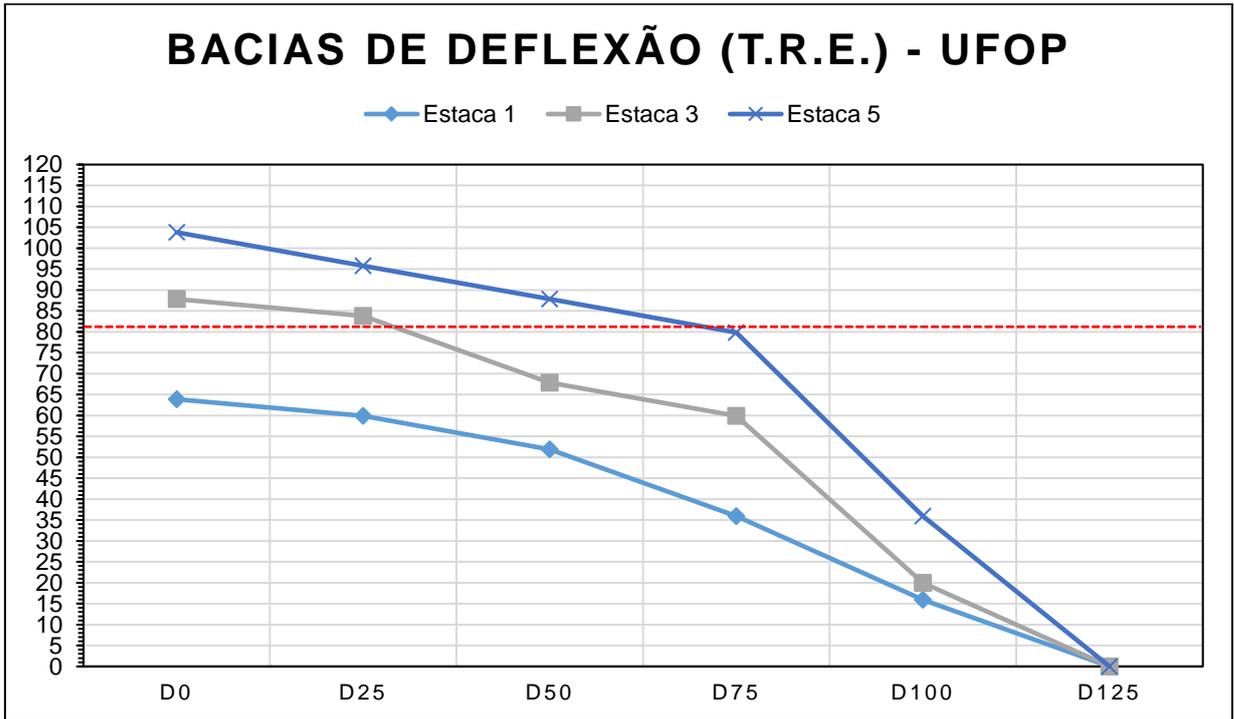


Gráfico 2 – Bacias de deflexão dos trilhos de roda externos. Fonte: Elaboração própria.

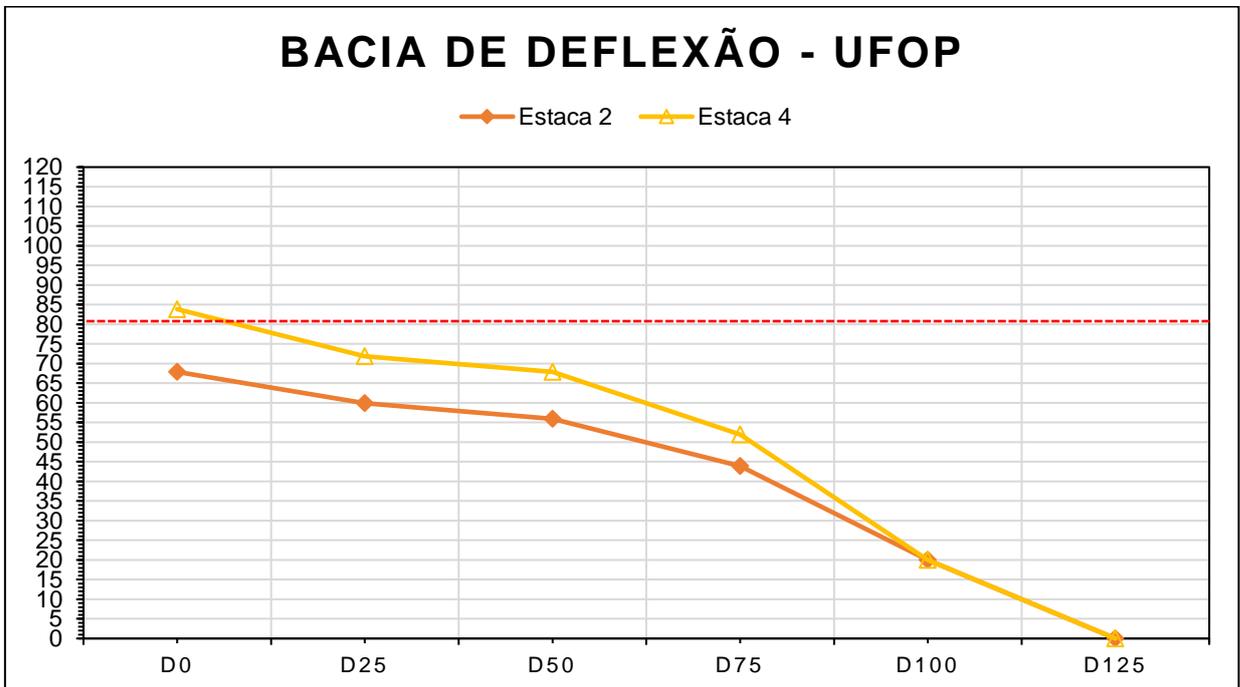


Gráfico 3 – Bacias de deflexão dos trilhos de roda internos. Fonte: Elaboração própria.

A partir dos calculados realizados e da análise da Tabela 8, pode-se observar que as bacias deflectométricas analisadas se enquadram nas hipóteses II e IV, visto que $D_p > D_{adm}$ ($97,556 > 81,930$).

As bacias 1 e 3 possuem o raio de curvatura acima de 100 m – ambos com 196,086 m. Sabendo que $D_p \leq 3 D_{adm}$ ($97,556 < 245,79$) é possível classificá-las na hipótese II – Qualidade regular, sem necessidade de estudos complementares, porém com possível necessidade de reforço.

As bacias 2, 4 e 5, que possuem o raio de curvatura menor que 100, estão classificadas na hipótese IV – Má qualidade, com necessidade de estudos complementares e medida corretiva de reforço ou até mesmo reconstrução. É interessante observar que em campo não há alteração visível de grande relevância que evidencie essa necessidade corretiva, fato que ressalta a importância de estudos frequentes, mesmo que sem indicativos de má qualidade.

Tabela 8 – Critérios para avaliação estrutural de pavimentos. Fonte: Adaptado de DNIT (1979).

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de reforço	Medidas corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	-	MÁ Deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas	SIM	Resistência	Reconstrução

5 CONCLUSÃO

A melhoria de estruturas pavimentares é essencial para o conforto, bem-estar e segurança dos usuários. O dimensionamento adequado de uma estrutura pavimentar evita falhas constantes, gastos com manutenções e, conseqüentemente, menos danos ao meio ambiente. Dessa forma, faz-se necessária a realização de estudos que permitam um melhor dimensionamento de novos pavimentos e reforços para vias já existentes.

Após a realização do ensaio com a Viga Benkelman e com base nos resultados obtidos foi possível verificar que a estrutura de pavimento da Rua Dois do Campus Morro do Cruzeiro se mostrou já em processo de falha pavimentar. Todos os pontos analisados se mostraram com qualidade regular ou má, o que sugere que sejam feitos estudos complementares para que seja verificada a necessidade real de reforço ou reconstrução.

De maneira geral, os trilhos de roda internos (estacas 2 e 4) apresentaram uma maior degradação de sua estrutura, visto que ambas as bacias se classificam como de má qualidade. No que tange aos trilhos de roda externos (estacas 1, 3 e 5), apenas a bacia deflectométrica da estaca 5 sugeriu má qualidade da estrutura de pavimento.

Os resultados e análises sugerem necessidade de reforço e/ou reconstrução em todo o trecho estudado, mesmo que apresentem pontos em situação regular. Entretanto, é interessante observar que o trecho analisado foi pavimentado no ano de 1983 e, durante todos esses 39 anos, nunca foi feito reforço ou alterações na via, o que sugere um bom dimensionamento inicial.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A fim de fomentar a pesquisa e educação, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudos complementares para possível necessidade de reforço do pavimento do Campus. Frente aos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se a análise mais profunda da atual estrutura da via a fim de evitar futuras falhas pavimentares;
- Análise deflectométrica de todos os trechos possíveis do Campus a fim de contemplar todo perímetro. O trecho analisado tem o fluxo de veículos relativamente baixo quando comparado a outros do Campus e, ainda assim, mostrou uma estrutura pavimentar que necessita cuidados, o que reforça a necessidade de avaliação dos outros trechos;
- Retroanálise do pavimento existente, a fim de avaliar a capacidade estrutural do pavimento do Campus através da deformabilidade de suas camadas a partir da análise de suas deflexões. Dessa forma, é possível dimensionar de maneira efetiva uma possível reabilitação do pavimento existente.

6 Bibliografia

ABGE. **Manual de sondagens**. 5^a. ed. São Paulo: [s.n.], 2013.

ABNT. **NBR 6489 - Solo - Prova de carga estática em fundação direta**. ABNT. [S.I.]. 2019.

ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. [S.I.]. 1997.

ALBERNAZ, C. A. V.; CALDAS, J. E. F.; OLIVEIRA, S. E. **Avaliação estrutural simplificada de pavimentos através de retroanálise**. [S.I.]. 1996.

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

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. [S.I.]. 2010.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. [S.I.]. 2001.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. [S.I.]. 2014.

CASTRO, P. C. G. D. **Recapeamento com objetivos estruturais**. [S.I.]. 2009.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias**, 2021.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. [S.I.]. 2014.

DEVITTE, G. **Dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos urbanos: comparativo entre o método mecanístico-empírico nacional e o DNER PRO 269/94**. [S.I.]. 2021.

DNIT. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. [S.I.]. 1979.

DNIT. **DNER-ME 024/94 - Determinação das deflexões pela viga Benkelman**. [S.I.]. 1994.

- DNIT. **DNER-PRO-175-94 - Aferição de viga Benkelman.** [S.I.]. 1994.
- DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** [S.I.]. 2006.
- DNIT. **Manual de implantação básica de rodovia.** [S.I.]. 2010.
- FARIA, V. A. M. D. et al. **Investigação das camadas do pavimento das vias do campus morro do cruzeiro da UFOP e definição de um pavimento ideal para o local.** [S.I.]. 2019.
- FILHO, J. M. D. M.; ROCHA, E. G. D. A. **Estudo comparativo entre pavimentos flexível e rígido na pavimentação rodoviária.** [S.I.]. 2018.
- GONTIJO, G. M. **Estudo do tráfego e da viabilidade de dimensionamento de um pavimento ideal para o Campus Morro do Cruzeiro/ UFOP – Ouro Preto/MG.** [S.I.]. 2021.
- HAAS, R. et al. **Modern Pavement Management.** [S.I.]. 1994.
- HACHICH, W. et al. **Fundações: Teoria e Prática.** 3ª edição. ed. São Paulo: Oficina de textos, 1998.
- IP-09. **Instrução de projeto de reforço para restauração de pavimentos flexíveis.** [S.I.]. 2004.
- MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures.** [S.I.]. 2004.
- MEDINA, J. D.; MOTTA, L. M. G. D. **Mecânica dos Pavimentos.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.
- NAKAMURA, A. L. D. S. **Infraestrutura de transportes como instrumento estatal de promoção do desenvolvimento econômico e social.** [S.I.]. 2018.
- NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria Kr sujeita à carregamento com simulador Hvs e comparação com previsões de desempenho segundo o Novo Método Brasileiro de Dimensionamento Medina.** UFES. [S.I.]. 2019.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos.** [S.l.]. 2003.

OLIVEIRA NETO, J. F. D. **Análise correlativa das medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos rodoviários revestidos com asfalto da rodovia BR 104/PB.** [S.l.]. 2015.

PEREIRA, J. M. B. **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática.** [S.l.]. 2007.

PRONGILA. Penetrômetro dinâmico. **Prongila vias de comunicação.**

RIBEIRO, T. P. **Estudo descritivo das principais patologias em pavimento flexível.** [S.l.]. 2017.

SANSON. Grupo Sanson. **Grupo Sanson - Pavimento e obras.**

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio.** [S.l.]: [s.n.], 1993.

SANTOS, M. S. D. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria - RS.** [S.l.]. 2015.

SOLOTEST. Solotest. **Penetrômetros.**

SOUZA JUNIOR, J. G. D. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal.** [S.l.]. 2018.

SOUZA, V. C. D. **Investigação não destrutiva de estrutura de pavimentos com utilização de equipamentos do tipo ground penetrating radar - GPR.** [S.l.]. 2018.

TCE-GO. Tribunal de contas do estado de Goiás. **Sonda rotativa vai ajudar fiscalização no laboratório móvel do TCE-GO,** 2014.

THOLEN, O. . S. J. . T. R. **Comparison of Falling Weight Deflectometer with other deflection testing devices.** [S.l.]. 1985.

TORRES, V. C. D. A. **Ensaio de cone de penetração dinâmica para controle de compactação de vias urbanas da cidade de Curitiba/PR.** [S.l.]. 2017.

VARGAS, É. G. D. **Avaliação estrutural e retroanálise de um trecho de pavimento da avenida Tiarajú no município de Alegrete – RS com a utilização de viga Benkelman.** [S.l.]. 2019.