



ANÁLISE DE ENSAIO DE VIGA BENKELMAN COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

ROSA, Allison Willian da Silva da ¹

ORTEGA, Daniela ²

APOLINÁRIO, Débora ³

RESUMO

A conservação das vias urbanas é essencial para garantir mobilidade, segurança e desenvolvimento econômico. A análise estrutural dos pavimentos flexíveis permite identificar a capacidade de suporte das camadas e planejar intervenções com base em critérios técnicos. Este estudo avaliou a condição estrutural de duas vias urbanas do município de Santo Antônio do Sudoeste (PR), utilizando o método da Viga Benkelman, conforme a norma DNER-PRO 011/79. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e descritiva. Foram realizados ensaios de deflexão em trechos com diferentes volumes de tráfego: a Rua Curitiba, com tráfego intenso, e a Rua Maria Pastório, com tráfego leve. O tratamento dos dados incluiu o cálculo das deflexões médias, determinação da deflexão característica e de projeto, comparação com a deflexão admissível e dimensionamento da espessura de reforço. Os resultados mostraram que ambas as vias necessitam de reforço, sendo o pavimento da Rua Curitiba estruturalmente mais eficiente. Conclui-se que o método da Viga Benkelman é uma ferramenta eficaz para diagnóstico estrutural e pode subsidiar ações de manutenção preventiva e gestão técnica das vias urbanas.

Palavras chave: Pavimentos. Viga Benkelman. Avaliação estrutural. Deflexão. Manutenção viária.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Ampère – Famper.

² Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Ampère – Famper.

³ Orientadora Mestre em Pavimentação. Docente do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Ampère – Famper.

1 INTRODUÇÃO

A preservação e manutenção das vias urbanas são essenciais para garantir mobilidade adequada, segurança viária e favorecer o desenvolvimento econômico das cidades. Nesse cenário, a avaliação estrutural dos pavimentos assume papel estratégico, pois permite compreender a capacidade resistente às camadas que compõem a via e direcionar as intervenções de manutenção de maneira técnica e eficaz.

Entre os métodos empregados para análise estrutural de pavimentos flexíveis, destaca-se a Viga Benkelman. Reconhecida no Brasil pela norma DNER-PRO 011/79, essa técnica possibilita mensurar a deflexão do pavimento sob carregamento, fornecendo subsídios para avaliar sua condição estrutural e estimar a necessidade de reforço.

A escolha deste tema justifica-se pela possibilidade de acompanhar a execução de ensaios no município de Santo Antônio do Sudoeste, Paraná. Isso permitiu acesso direto aos dados e às condições reais de implementação do método. Ademais, entender o desempenho estrutural das vias urbanas ajuda gestores e engenheiros a alocar recursos públicos de maneira mais eficaz.

Além disso, a abordagem adotada prioriza a aplicação prática e a contribuição direta ao planejamento e à manutenção viária municipal, reforçando o caráter técnico e profissional da pesquisa.

Diante desse cenário, a questão de pesquisa que orienta este estudo é: qual é a condição estrutural dos pavimentos analisados com base nos resultados obtidos por meio do ensaio da Viga Benkelman? Assim, o objetivo principal é avaliar o comportamento estrutural de duas vias urbanas do município utilizando esse método. Para alcançar esse propósito, o estudo busca descrever o procedimento de ensaio conforme a normativa vigente, analisar o desempenho estrutural dos trechos avaliados e discutir os fatores que influenciaram os resultados observados.

Metodologicamente, a pesquisa consiste em um estudo de campo, com coleta de dados em duas ruas do município, seguida da análise conforme o método do DNER-PRO 011/79. A discussão é feita a partir da interpretação técnica dos resultados, relacionando-os às condições observadas e ao desempenho esperado para pavimentos flexíveis.

Nesse sentido, segundo Bernucci et al. (2006), os pavimentos asfálticos, também chamados de pavimentos flexíveis, são formados por diversas camadas, projetadas para resistir ao tráfego e às condições climáticas. A camada superior, o revestimento asfáltico, recebe diretamente as cargas dos veículos, protege as camadas inferiores e garante conforto e segurança aos usuários.

Este artigo está organizado de maneira a apresentar, inicialmente, o embasamento teórico e os conceitos essenciais relacionados à avaliação estrutural de pavimentos. Na sequência, são descritos os procedimentos metodológicos adotados e a análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. Por fim, são discutidas as conclusões do estudo e apresentadas as referências consultadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento estrutural de duas vias urbanas do município de Santo Antônio do Sudoeste (PR) utilizando o método da Viga Benkelman, conforme a norma DNER-PRO 011/79.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever o procedimento de ensaio adotado, conforme a normativa vigente.
- Analisar o desempenho estrutural dos trechos avaliados com base nos resultados obtidos.
- Comparar os valores de deflexão com os limites admissíveis estabelecidos para as condições de tráfego.
- Identificar a necessidade de reforço estrutural para cada uma das vias.
- Discutir os fatores que influenciaram os resultados observados, relacionando-os às condições de tráfego e às características do pavimento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Engenharia Civil

Segundo Tisaka (2006, p. 25), “o porquê do nome Engenharia Civil: até o século XVII a Engenharia como atividade organizada era exercida somente para fins militares. A partir de então, com o surgimento de obras sem a participação de militares, principalmente na construção de estradas, originaram-se as denominações de "Engenharia Civil" e "Construção Civil".

Para Queiroz (2019, p. 15), a engenharia pode ser definida da seguinte forma:

A engenharia pode ser definida, de modo geral, como a área do saber e fazer humano que, valendo-se dos princípios fundamentais das ciências e da tecnologia, planeja, projeta, fabrica, constrói, opera e mantém todos os tipos de bens materiais, duráveis ou não, como máquinas, edifícios, estradas, manufaturas, equipamentos, produtos agrícolas, alimentos, recursos minerais, qualidade de vida e meio ambiente, geração e distribuição de energia, sistemas de comunicações, serviços, entre outros, fornecendo à humanidade bem-estar, conforto e segurança na inter-relação com o espaço construído, o meio ambiente e os sistemas, produtos, materiais, máquinas e equipamentos.

Para Queiroz (2019, p. 19), “pode-se considerar que o engenheiro, enquanto profissional, é um misto entre o cientista e o técnico, pois, por meio da criatividade, dos conhecimentos científicos, da tecnologia e da experiência, equaciona, gera inovação e resolve problemas [...] no exercício da profissão”.

Segundo Queiroz (2019, p. 19), o trabalho do engenheiro envolve uma série de competências:

Portanto, engenhar tem o significado de inventar, criar, maquinar, traçar, conceber, idear; assim, é plausível dizer que os engenheiros da atualidade pesquisam, inventam e criam continuamente, com fundamentos científicos, um presente e um futuro que estão em constante dinâmica e modificação, tornando a vida do ser humano cada vez melhor por meio da utilização e da aplicação de novas descobertas científicas, metodologias, materiais e tecnologias.

De acordo com Bazzo, Pereira (2013, p.183), “o trabalho do engenheiro é uma incessante procura pela redução de peso, custo, consumo [...] Como sempre existem várias soluções para cada problema, o engenheiro deve também estar apto a selecionar a melhor dentre elas”.

A engenharia para Luca et al. (2018 p.7), “é carregada de estratégias e técnicas para modelagens e materialização de ideias, de modo que, desde o início

de um projeto, o homem e a sociedade podem, na realidade abstrair-se sentindo os efeitos da engenharia para a sua qualidade de vida”.

Segundo o CONFEA (2021), o engenheiro civil deve assegurar que as soluções propostas atendam critérios técnicos, sociais e econômicos, garantindo segurança e desempenho das infraestruturas urbanas. Nesse contexto, a avaliação de pavimentos auxilia na tomada de decisões embasadas para manutenção, recuperação e planejamento viário municipal.

3.2 História da Pavimentação

A evolução dos pavimentos está diretamente ligada ao desenvolvimento das civilizações, já que as vias terrestres sempre foram cruciais para a movimentação de pessoas, o escoamento de produtos e a união de territórios. É interessante notar que as inovações nas técnicas de pavimentação sempre refletiram as demandas da sociedade, tanto no âmbito militar quanto no econômico.

Percorrer a história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 11), que cita Saunier (1936), para a construção das pirâmides no Egito (2600–2400 a.C.) “foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. O atrito era amenizado com umedecimento constante por meio de água, azeite ou musgo molhado”.

A prática de pavimentação evoluiu significativamente com o Império Romano, reconhecido por sua eficiência em infraestrutura viária. Segundo Bernucci et al. (2006, p. 12), “foi atribuída aos romanos a arte maior do planejamento e da construção viária. [...] há mais de 2.000 anos os romanos já possuíam uma boa malha viária, contando ainda com um sistema de planejamento e manutenção”.

Ainda conforme Bernucci et al. (2006, p. 13), “das vias romanas, a mais conhecida de todas, a Via Ápia, foi a primeira a ser nomeada em homenagem ao seu construtor, Appius Claudius, que a criou em 312 a.C., durante a Segunda Guerra Samnita. O objetivo era ligar Roma a Cápuia (195 km), permitindo ao exército romano chegar rapidamente [...]”.

Com a queda do Império Romano, houve retrocesso nas técnicas de construção viária. Bernucci et al. (2006, p. 14) apontam que, após 476 d.C., “as

novas nações europeias [...] perderam de vista a construção e a conservação das estradas”.

No contexto brasileiro, a pavimentação também registra marcos relevantes. Prego (2001) menciona que a primeira estrada nacional a utilizar macadame foi idealizada por Mariano Procópio e inaugurada em 1860 por D. Pedro II, apresentando “largura de 7 m, leito ensaibrado e compactado [...] cuidadosamente drenada”. Esse avanço indica a incorporação de técnicas internacionais adaptadas às condições locais.

A modernização da pavimentação no Brasil intensificou-se a partir da década de 1950. Segundo Prego (2001), esse período marcou “o início da execução de pavimentos em escala industrial e da organização de grandes firmas construtoras”, embora ainda com limitações técnicas, como exemplificado na pavimentação da Rodovia Presidente Dutra, realizada sem estudos geotécnicos detalhados.

O desenvolvimento científico dos métodos de dimensionamento também avançou no século XX. Senço (2007, p. 05) destaca que “um dos primeiros métodos de dimensionamento de pavimentos deve-se ao engenheiro O. J. Porter [...] cujos fundamentos consideravam [...] o CBR-California Bearing Ratio”. Essa abordagem contribuiu para consolidar o uso de parâmetros mecânicos na avaliação da capacidade de suporte dos pavimentos.

A partir dessa evolução histórica, observa-se que os métodos de análise estrutural, como o ensaio com Viga Benkelman empregado neste estudo, são resultado de um processo contínuo de aprimoramento tecnológico e científico na engenharia de pavimentos.

3.3 Pavimentos

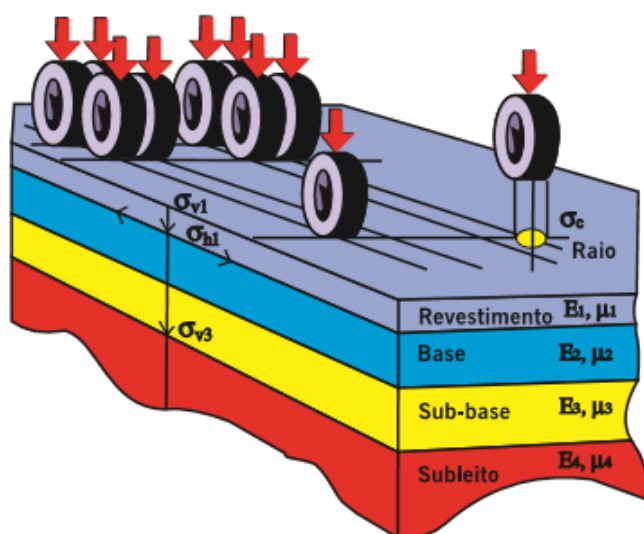
As vias de tráfego dependem muito dos pavimentos, que são cruciais para o fluxo de pessoas e mercadorias nas cidades e estradas. Eles têm a tarefa essencial de espalhar o peso dos veículos sobre o terreno, assegurando uma experiência suave, segura e de longa duração para todos. A maneira como pensamos sobre o que é um pavimento mostra o quão importantes eles são na construção civil e no projeto de estradas.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 09), pavimento é definido como:

Uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

De forma complementar, Senço (2007, p.06) afirma que, “pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, [...]. É um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito”.

Figura 1 - Sistema de camadas do pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Além disso, Bernucci et al. (2006, p. 09) ressalta que, “

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento.

Ainda conforme Bernucci et al. (2006, p. 09) “os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes”.

3.3.1 Pavimentos Flexíveis

Senço (2007, p. 23) explica que os pavimentos flexíveis “são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados

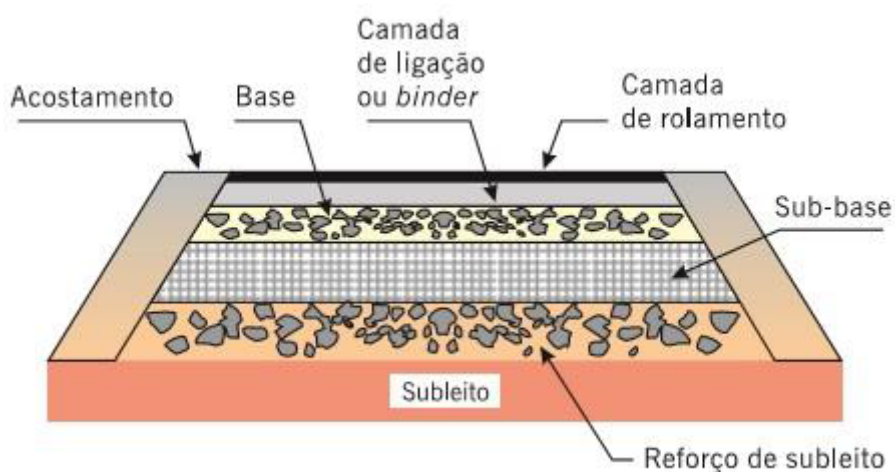
normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga”.

Complementando essa definição, Bernucci et al. (2006, p. 09) afirmam que “os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito”.

Além disso, conforme o DNIT (2019), os pavimentos flexíveis são compostos por camadas sucessivas que distribuem as tensões ao subleito, garantindo durabilidade e conforto ao usuário. Essa estrutura em múltiplas camadas trabalha de forma integrada para resistir às solicitações do tráfego e às condições climáticas, preservando a integridade do pavimento ao longo do tempo.

De acordo com Bernucci et al. (2006, p. 09), o revestimento “asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder, embora essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico”.

Figura 2 - Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Para Bernucci et al. (2006, p. 09), “revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma

atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança)”.

Ainda de acordo com Bernucci et al. (2006, p. 10):

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser de duas maneiras principais, por penetração ou por mistura. Por penetração refere-se aos executados através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico, antes da compressão. Quando o pré-envolvimento é feito na usina denomina-se pré-misturado propriamente dito. Quando o pré-envolvimento é feito na pista denomina-se pré-misturado na pista.

Assim, fica evidente que o desempenho estrutural e a durabilidade do pavimento flexível dependem da colaboração de suas camadas. A literatura enfatiza que a composição dos materiais e a execução correta das camadas são essenciais para suportar as demandas do tráfego e prevenir desgastes precoces. Esses princípios técnicos fundamentam a análise das condições estruturais das vias examinadas neste estudo.

3.4 Viga Benkelman

A Viga Benkelman é um equipamento utilizado para medir a deflexão de pavimentos sob carga, possibilitando avaliar sua capacidade de suporte. Conforme o DNER-ME 024/94, o ensaio consiste na aplicação de uma carga padrão em um ponto da via, registrando-se o deslocamento vertical da superfície, o que permite inferir o comportamento estrutural do pavimento e estimar a necessidade de reforço.

Trata-se de um método consagrado e amplamente difundido. Segundo Borges (2001, p.31), “a viga Benkelman é provavelmente o teste de campo para avaliação de deflexões de pavimentos sob condições de carregamento mais familiar dos engenheiros e projetistas de pavimentação e um aparelho de referência universal”.

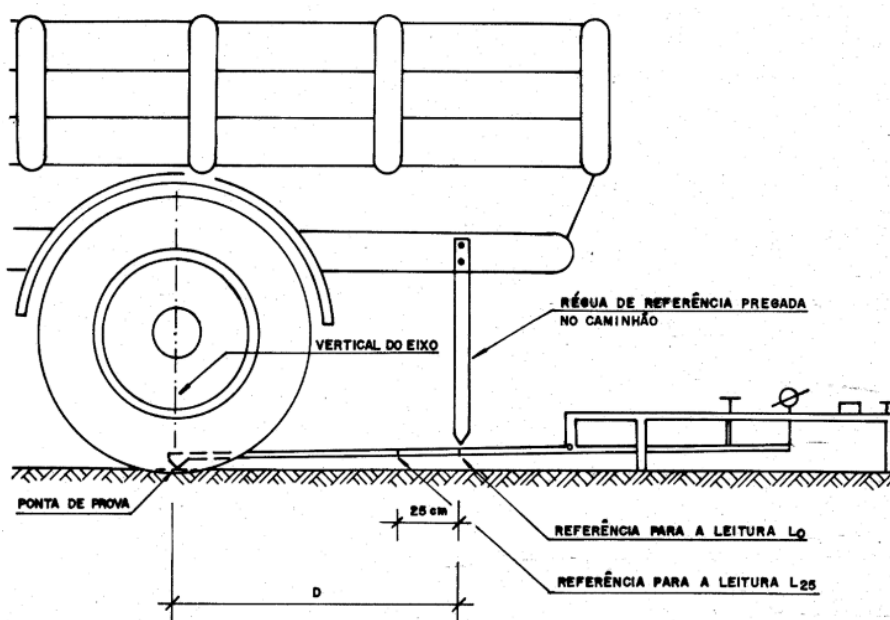
No Brasil, segundo Borges (2001, p.18), “a utilização da viga Benkelman iniciou-se, nos anos 60 com a iniciativa dos engenheiros Nestor José Aratangy em 1962 e Francisco Bolivar Lobo Carneiro em 1965”.

Quanto ao princípio de medição, Ferreira (2007, p.06) afirma que, “a Viga Benkelman mede a flecha máxima da linha de deformação elástica do pavimento sob a ação de uma carga”.

Já Bernucci et al. (2008, p. 446), descrevem o sistema como “um equipamento muito simples que necessita de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2t, para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica.”

Os pneus do caminhão devem atender a requisitos específicos: dimensões de 1000×20 ou 900×20 , com 12 lonas, tipo “com câmara”, frisos na banda de rodagem e calibragem à pressão de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm² ou 80 psi) (DNER-ME 024/94, p. 3).

Figura 3 - Posicionamento da Viga Benkelman



Fonte: Dner-ME (1994).

Quanto ao procedimento de campo, Borges (2001, p. 19) descreve que “assim que o caminhão estiver posicionado e a viga ajustada, liga-se o vibrador e faz-se a leitura inicial (L_0) no extensômetro (em 1/100mm). [...] Em seguida, desloca-se o caminhão para frente até que seu peso não exerça mais influência sobre a viga, e faz-se a leitura final (L_f)”.

De acordo com o Manual de Restauração do DNIT (2006), a Viga Benkelman permanece um método amplamente utilizado em avaliações funcionais e estruturais de pavimentos, principalmente pela simplicidade e confiabilidade do ensaio. O método permite estimar a condição estrutural da via ao medir a deformação elástica resultante da aplicação de carga padronizada.

4 METODOLOGIA

4.1 Tipo de Pesquisa

Este estudo é classificado como uma pesquisa aplicada, pois procura soluções práticas para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis em áreas urbanas. Em relação à metodologia, este é um estudo experimental e quantitativo, baseado na coleta de dados obtidos por meio do ensaio de deflexão com a Viga Benkelman e na análise numérica dos resultados.

No que diz respeito aos objetivos, o estudo é classificado como descritivo e explicativo. É descritiva porque expõe e detalha as condições estruturais observadas nas ruas analisadas, e explicativa porque interpreta os elementos que afetam o desempenho do pavimento, com base nas normas técnicas e no referencial teórico.

Nos procedimentos técnicos, a pesquisa foi conduzida como um estudo de campo, realizado diretamente em trechos viários do município de Santo Antônio do Sudoeste-PR. A execução seguiu as orientações estabelecidas pela norma DNER-PRO 011/79, assegurando a padronização das etapas. Além disso, desenvolveu-se uma pesquisa bibliográfica em livros, normas e artigos especializados, com o objetivo de fundamentar conceitualmente os métodos empregados e apoiar a análise dos resultados.

4.2 Localização

Os testes foram realizados na cidade de Santo Antônio do Sudoeste-PR, em dois pontos distintos, ambos com pavimentação poliédrica. A Rua Curitiba foi considerada uma via com maior volume de veículos ($N = 5 \times 10^5$), enquanto a Rua Maria Pastório apresentou menor tráfego ($N = 1 \times 10^5$). Essas vias foram escolhidas para comparar o comportamento dos pavimentos sob diferentes níveis de solicitação.

A Rua Curitiba possui aproximadamente 430 metros de extensão avaliados, enquanto a Rua Maria Pastório apresenta cerca de 175 metros no trecho analisado. A diferença no comprimento dos segmentos é importante para garantir representatividade, considerando que vias mais extensas tendem a apresentar maior variação estrutural ao longo do percurso.

A Figura 4 mostra os locais dos ensaios, obtidos por meio do Google Earth. Observa-se que ambas as ruas estão em áreas residenciais. A Rua Curitiba liga dois bairros, o que explica o fluxo mais intenso de veículos, enquanto a Rua Maria Pastório está localizada na extremidade do bairro, com circulação predominantemente local. Essa diferença torna a comparação entre os dois trechos ainda mais relevante para o estudo.

Os ensaios foram realizados aproximadamente nas coordenadas $26^{\circ}03'54''\text{S}$ e $53^{\circ}42'56''\text{W}$ para a Rua Curitiba, e $26^{\circ}03'36''\text{S}$ e $53^{\circ}42'54''\text{W}$ para a Rua Maria Pastório, ambas situadas no município de Santo Antônio do Sudoeste-PR.

Figura 4 – Localização dos trechos avaliados no município de Santo Antônio do Sudoeste-PR.



Fonte: Google Earth (2025). Adaptado pelo autor.

4.3 Coleta de Dados

A empresa Malt Engenharia Ltda, encarregada dos ensaios e do dimensionamento do recapeamento asfáltico no município de Santo Antônio do Sudoeste – PR, foi responsável pela coleta e tabulação dos dados utilizados neste estudo.

Os procedimentos seguiram as diretrizes DNER-PRO 011/79 (Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis), DNER-ME 024/94 (Ensaio de deflexões com Viga Benkelman) e DNER-PRO 175/94 (Calibração do equipamento).

Os ensaios de deflexão foram realizados utilizando um veículo padrão de eixo simples e rodas duplas, com peso total de 80 kN, de acordo com as normas estabelecidas. As medições ocorreram em período seco e com pista limpa, garantindo condições adequadas para leitura. Para assegurar a representatividade dos resultados, as medições foram feitas em vários pontos das vias, levando em conta trechos homogêneos.

O processo consistiu nas leituras inicial, intermediária e final da viga, registrando o deslocamento vertical do pavimento sob aplicação de carga. As leituras foram realizadas pela equipe técnica da empresa e acompanhadas presencialmente pelo autor.

Ao todo, foram realizadas 44 medições na Rua Curitiba (22 no lado esquerdo e 22 no lado direito) e 18 medições na Rua Maria Pastório (9 em cada lado), atendendo ao critério de representatividade para trechos homogêneos e garantindo base estatística adequada para o cálculo das deflexões características.

As leituras coletadas pela equipe técnica foram organizadas em planilhas e analisadas estatisticamente pela própria empresa, que calculou a média, o desvio padrão, a deflexão característica e a deflexão de projeto.

Os dados consolidados foram apresentados em relatórios técnicos, como “Controle Tecnológico: Viga Benkelman, Dados e Resultado, Resumo Geral” e “Memorial de Dimensionamento DNER-PRO 011/79”, ambos datados de 30 de agosto de 2025.

As ruas analisadas neste estudo, Rua Curitiba (tráfego intenso, $N = 5 \times 10^5$) e Rua Maria Pastório (tráfego leve, $N = 1 \times 10^5$), foram selecionadas com base nessa pesquisa. Os dados foram utilizados como fundamento para a fase de análise e comparação estrutural conduzida neste estudo.

4.4 Tratamento e análise de dados

O tratamento e processamento dos dados foram realizados pela Malt Engenharia Ltda, de acordo com os procedimentos da norma DNER-PRO 011/79. O conjunto de cálculos envolveu as seguintes etapas:

- Eliminação de valores atípicos e cálculo da deflexão média (D_m) e do desvio-padrão (σ);
- Determinação da deflexão característica ($D_c = D_m + \sigma$);
- Aplicação do fator sazonal ($F_s = 1,20$), considerando subleito argiloso e ensaio em estação seca, obtendo-se a deflexão de projeto ($D_p = D_c \times F_s$);
- Cálculo da deflexão admissível (D_{adm}) em função do número de repetições de eixo padrão (N) por meio da equação:

$$\log_{10}(D_{adm}) = 3,01 - 0,176 \cdot \log_{10}(N)$$

- Comparação entre D_p e D_{adm} , para verificar a necessidade de reforço;
- Dimensionamento da espessura equivalente de reforço (heq), utilizando a expressão:

$$heq = 40 \times [\log_{10}(D_p) - \log_{10}(D_{adm})]$$

sendo o coeficiente $K = 40$ correspondente ao revestimento em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente).

Com base nesse dimensionamento, a empresa definiu para as vias analisadas a solução executiva padrão de recape asfáltico, composta por:

- Reperfilagem de 3,0 cm em CBUQ, para regularização da superfície;
- Capa de rolamento de 4,0 cm, atendendo ao mínimo construtivo urbano.

Após a entrega dos relatórios técnicos, os dados foram analisados neste estudo de forma comparativa, com o objetivo de entender como as distintas condições de tráfego (leve e pesado) afetam as deflexões registradas e a espessura de reforço estimada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir dos ensaios de deflexão realizados pela empresa Malt Engenharia Ltda (2025), que aplicou o método DNER-PRO 011/79 para avaliação estrutural dos pavimentos urbanos do município de Santo Antônio do Sudoeste – PR. A análise concentrou-se em dois

trechos representativos: Rua Curitiba e Rua Maria Pastório, escolhidos por apresentarem condições distintas de tráfego e comportamento estrutural.

Tabela 01 - Resultado dos trechos representativos: Rua Curitiba e Rua Maria Pastório

<i>Rua</i>	Curitiba	Maria Pastório
<i>Leituras (n)</i>	44	18
<i>Dm (10^{-2} mm)</i>	92,37	123,96
<i>σ (10^{-2} mm</i>	6,94	10,19
<i>Dc (10^{-2} mm)</i>	99,31	134,15
<i>Fs</i>	1,20	1,20
<i>Dp (10^{-2} mm)</i>	119,17	160,98
<i>Dadm (10^{-2} mm)</i>	101,62	134,90
<i>heq (cm)</i>	2,77	3,07
<i>Solução adotada</i>	Reperfilagem 3 cm + capa 4 cm (CBUQ)	Reperfilagem 3 cm + capa 4 cm (CBUQ)

Fonte: Autor (2025).

5.1 Rua Curitiba

Na Rua Curitiba, classificada na faixa de tráfego $N = 5 \times 10^5$ repetições do eixo padrão de 80 kN, foram realizadas 44 leituras de deflexão. A média obtida foi $92,37 \times 10^{-2}$ mm, com desvio-padrão de 6,94, resultando em deflexão característica (D_c) de $99,31 \times 10^{-2}$ mm.

Com o fator sazonal ($F_s = 1,20$), obteve-se deflexão de projeto (D_p) de $119,17 \times 10^{-2}$ mm, valor próximo à deflexão admissível (D_{adm}) de $101,62 \times 10^{-2}$ mm, conforme o critério da DNER-PRO 011/79.

Segundo essa norma, quando D_p se aproxima de D_{adm} , o pavimento ainda apresenta condições estruturais aceitáveis, exigindo apenas reforço mínimo para garantir a durabilidade.

Dessa forma, a espessura de reforço equivalente (heq) calculada foi de 2,77 cm, valor abaixo do mínimo construtivo, o que levou à adoção da solução executiva padrão de reperfilagem de 3 cm seguida de capa de rolamento de 4 cm em CBUQ, atendendo aos critérios técnicos e construtivos do DNIT 031/2006-ES.

Esse resultado mostra que o pavimento da Rua Curitiba apresenta bom desempenho estrutural, suportando adequadamente o tráfego intenso a que é submetido. As deflexões relativamente baixas indicam camadas com boa capacidade de suporte e subleito de comportamento satisfatório, demonstrando que o pavimento ainda mantém rigidez compatível com a classe de tráfego considerada.

5.2 Rua Maria Pastório

Na Rua Maria Pastório, classificada na faixa de tráfego $N = 1 \times 10^5$, foram realizadas 18 leituras de deflexão. A média (D_m) foi $123,96 \times 10^{-2}$ mm, com desvio-padrão (σ) de 10,19, resultando em deflexão característica (D_c) de $134,15 \times 10^{-2}$ mm.

Aplicando o fator sazonal ($F_s = 1,20$), obteve-se uma deflexão de projeto (D_p) de $160,98 \times 10^{-2}$ mm, consideravelmente superior à deflexão admissível (D_{adm}) de $134,90 \times 10^{-2}$ mm. Com isso, o cálculo indicou uma espessura de reforço equivalente (heq) de 3,07 cm.

Esse resultado evidencia que, mesmo em uma via de tráfego leve, o pavimento apresenta condições estruturais inferiores, com deflexões elevadas e maior necessidade de reforço.

A diferença entre D_p e D_{adm} demonstra que as camadas inferiores podem estar com perda de rigidez ou que o subleito apresenta características mais plásticas, típicas de solos argilosos, o que reduz a capacidade de suporte.

Apesar disso, a empresa também adotou a solução padrão de reperfilagem de 3 cm e capa de 4 cm em CBUQ, por atender ao mínimo construtivo e garantir a homogeneidade do recape em todo o perímetro urbano.

Além dos valores de deflexão, observações feitas durante os ensaios indicaram que a via apresenta sinais visuais de desgaste, como trincas e irregularidades superficiais, reforçando a necessidade de reforço estrutural e regularização funcional.

5.3 Comparação do desempenho estrutural das vias analisadas

A comparação entre as duas vias mostra comportamentos distintos e coerentes com suas condições de tráfego e conservação.

A Rua Curitiba, apesar do tráfego mais intenso, apresentou deflexões menores e próximas ao limite admissível, o que indica estrutura mais rígida e homogênea. Já a Rua Maria Pastório, mesmo com tráfego leve, apresentou deflexões superiores, revelando maior deformabilidade e desgaste.

Essa diferença reforça que o desempenho de um pavimento não depende apenas do volume de tráfego, mas também de fatores como qualidade dos materiais empregados, espessura das camadas, características do subleito, eficiência da drenagem e histórico de manutenção.

Em muitos casos, pavimentos com menor solicitação de tráfego, mas executados sobre solos menos competentes ou com deficiências construtivas, acabam apresentando desempenho estrutural inferior aos de vias mais carregadas.

Portanto, os resultados obtidos evidenciam a importância da avaliação periódica das deflexões, que permite identificar a real condição estrutural do pavimento e planejar as intervenções preventivas de forma técnica e econômica, evitando o agravamento de patologias e garantindo maior vida útil à malha viária.

Além disso, os resultados reforçam o papel da deflexão como indicador da capacidade estrutural do pavimento, permitindo identificar perda de rigidez nas camadas inferiores antes que falhas severas se manifestem na superfície. Dessa forma, o método da Viga Benkelman demonstra sua eficácia como ferramenta preventiva de gestão da malha viária municipal, contribuindo para decisões mais precisas no planejamento de manutenção e reabilitação urbana.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a condição estrutural de pavimentos urbanos do município de Santo Antônio do Sudoeste (PR), com base em ensaios realizados em dois trechos representativos, conforme os procedimentos da norma DNER-PRO 011/79. O estudo buscou compreender o comportamento das camadas do pavimento frente às cargas de tráfego e verificar a necessidade de reforço estrutural.

Os resultados obtidos demonstraram que as duas vias analisadas necessitam de intervenção, embora apresentem comportamentos distintos. Na Rua Curitiba, submetida a tráfego mais intenso, as deflexões permaneceram próximas aos limites admissíveis, indicando bom desempenho estrutural e necessidade apenas de reforço mínimo.

Em contrapartida, na Rua Maria Pastório, mesmo com tráfego leve, as deflexões ultrapassaram os valores recomendados, revelando maior deformabilidade e necessidade de reforço mais expressivo. A solução técnica adotada, composta por reperfilagem e aplicação de nova camada de rolamento em CBUQ, mostrou-se adequada para restabelecer as condições de serviço e aumentar a vida útil das vias.

Recomenda-se a ampliação deste estudo para outras ruas do município, associando ensaios deflectométricos a investigações geotécnicas e avaliações funcionais do pavimento. Também se destaca a importância do monitoramento periódico das deflexões como ferramenta de apoio ao planejamento da manutenção preventiva e à gestão eficiente da infraestrutura viária urbana.

REFERÊNCIAS

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. **Introdução à engenharia: conceitos, ferramentas e comportamentos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2006.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Brasília: DNIT, 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

CONFEA. Resolução nº 1.093, de 15 de dezembro de 2021. **Dispõe sobre as atribuições do Engenheiro Civil**. Brasília: Conselho Federal de Engenharia e Agronomia, 2021.

DNER. **Deflexões em pavimentos flexíveis: determinação pelo método da Viga Benkelman**. DNER ME 024/94. Rio de Janeiro, 1994.

FERREIRA, C. M. Apostila: **Trabalhando com Viga Benkelman**. São Paulo, 2007. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/deflectometra-pavimentos-trabajando-con-viga-benkelman/67847289>. Acesso em: 09 out. 2025.

LUCA, M. A. S. de et al. **A engenharia no contexto social: evolução e desenvolvimento. Gestão, Tecnologia e Inovação**. v. 2, n. 1, jan./abr. 2018.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

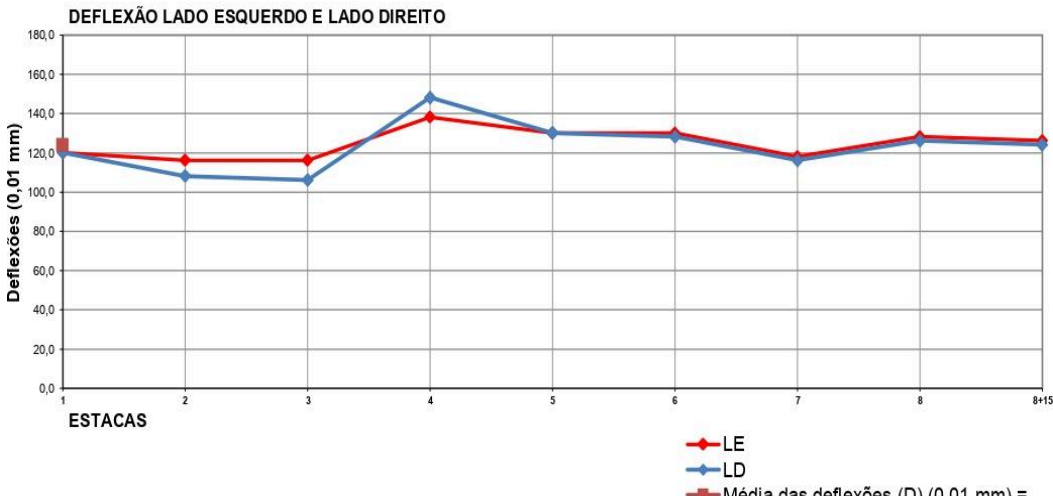
PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: ABPV, 2001.

QUEIROZ, R. C. **Introdução à Engenharia Civil: História, principais áreas e atribuições**. São Paulo: Blucher, 2019.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

TISAKA, M. **Orçamento na Construção Civil: Consultoria, projeto e execução**. São Paulo: Pini, 2006.

ANEXO I

											
Local:		Santo Antonio do Sudoeste - Paraná				Período:		Agosto/2025			
Localização:		MARIA PASTORIO				Constante da viga (k):		2,003		Fs: 1,20	
Extensão:		175,00 Metros				Número N (eixos eq. 80 kN)		100000			
Camada:		Pavimento Polidédrico				Responsável Técnico:		Mateus Luiz Leichtweis			
CONTROLE TECNOLÓGICO - VIGA BENKELMAN											
RUA:		MARIA PASTORIO									
REGISTRO:		05									
ESTACA	LADO	Leitura 0,01 mm			Deflexões 0,01 mm (L ₀ - L _i) * k	ESTACA	LADO	Leitura 0,01 mm			Deflexões 0,01 mm (L ₀ - L _i) * k
		L ₀	L ₂₅	L _f				L ₀	L ₂₅	L _f	
1	LE	500	453	440	120,2	1	LD	500	456	440	120,2
2	LE	500	457	442	116,2	2	LD	500	461	446	108,2
3	LE	500	452	442	116,2	3	LD	500	459	447	106,2
4	LE	500	448	431	138,2	4	LD	500	440	426	148,2
5	LE	500	446	435	130,2	5	LD	500	448	435	130,2
6	LE	500	448	435	130,2	6	LD	500	451	436	128,2
7	LE	500	452	441	118,2	7	LD	500	452	442	116,2
8	LE	500	444	436	128,2	8	LD	500	451	437	126,2
8+15	LE	500	452	437	126,2	8+15	LD	500	453	438	124,2
LADO ESQUERDO						LADO DIREITO					
Nº de amostras (n) =					9,00	Nº de amostras (n) =					9,00
Média das deflexões (D) (0,01 mm) =					124,85	Média das deflexões (D) (0,01 mm) =					123,07
Desvio-padrão amostral (σ) (0,01 mm) =					7,63	Desvio-padrão amostral (σ) (0,01 mm) =					12,67
Deflexão característica (D _c = D + σ) (0,01 mm) =					132,48	Deflexão característica (D _c = D + σ) (0,01 mm) =					135,75
DIMENSIONAMENTO											
Nº de amostras (n) =					18,00	Solicitações do eixo padrão (N) (80 kN) =					100000
Média das deflexões (D) (0,01 mm) =					123,96	Deflexão admissível (Dadm) (0,01 mm) =					134,90
Desvio-padrão amostral (σ) (0,01 mm) =					10,19	Fator sazonal (Fs) =					1,20
Deflexão característica (D _c = D + σ) (0,01 mm) =					134,15	Deflexão de projeto (D _p = D _c * Fs) (0,01 mm) =					160,98
Fator da Tabela I (z) (DNER-PRO 011/79) =					2,50	Coeficiente de dimensionamento (CBUQ) (K) =					40,00
Intervalo de aceitação inferior (D - z * σ) (0,01 mm) =					98,00	Espessura de reforço cálculo (CBUQ) (Er) [cm] =					3,07
Intervalo de aceitação (D + z * σ) (0,01 mm) =					149,00	Capa de rolamento adotada (CBUQ) (hc) [cm] =					4,00
Coeficiente de variação (CV = σ/D) =					0,08	Reperil. adotado [cm]		3	Capa adotada [cm]		4
											

ANEXO II

