



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**FELIPE CASTRO DE LIMA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO COM UTILIZAÇÃO  
DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL.**

**Estudo de caso: Via interna do Campus Paulo VI - UEMA**

SÃO LUÍS

2017

**FELIPE CASTRO DE LIMA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO COM UTILIZAÇÃO  
DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL.**

**Estudo de caso: Via interna do Campus Paulo VI - UEMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual do Maranhão, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
graduado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

SÃO LUÍS

2017

Rodrigues, Felipe Castro de Lima.  
Avaliação estrutural do pavimento com utilização da viga Benkelman tradicional.  
Estudo de caso: Via interna do Campus Paulo IV - UEMA / Felipe Castro de Lima  
Rodrigues. – São Luís, 2017.

99 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do  
Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant’Ana.

1. Análise funcional. 2. Avaliação estrutural. 3. Viga Benkelman tradicional. 4. Vias  
recém recapeadas. I. Título.

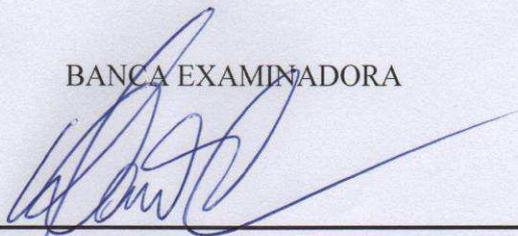
CDU 625.85(812.1)

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO COM  
UTILIZAÇÃO DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL.  
Estudo de caso: Via interna do Campus Paulo VI - UEMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual do Maranhão, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
graduado em Engenharia Civil.

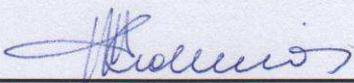
Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

BANCA EXAMINADORA



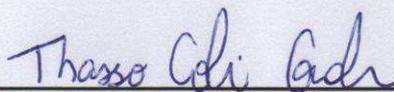
---

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana - Orientador



---

Profª. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho



---

Prof. Thasso Colins Gonçalves

Conceito Final: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à Deus, ao meu pai Pedro Gregório de Lima (*in memoriam*) pela referência e a minha família, em especial minha avó Maria Aslene, a minha mãe Antônia Eliene, tios, primos e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, com toda sua bondade, me concedeu essa oportunidade de me tornar um Engenheiro Civil.

À UEMA pelo conhecimento técnico, pelas portas abertas e por todas as amizades que construí nessa instituição valorosa, que pra sempre serei muito grato.

A toda a minha família que incansavelmente não mediram esforços em me apoiar e me auxiliar sempre que necessário e são, sem dúvida, a força motriz que me move em busca de meus objetivos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Walter Canales Sant'Ana, pelo acervo técnico em aulas ministradas na disciplina de Construção de Estradas e demais esforços.

Agradeço imensamente ao apoio técnico e moral do Professor Thasso Colins, pelo incansável esforço. Sempre esteve pronto a nos ajudar e teve imensa contribuição desde o princípio em todas as fases desse trabalho. Sendo bastante importante para o avanço do mesmo.

Agradeço demais pela preocupação e suporte da Prof. Maria Teresinha Coelho. Sem ela talvez não seria possível termos alcançados os trabalhos de laboratório. Sempre esteve presente nessa nossa caminhada. Sempre buscou soluções e alternativas para avançarmos.

Agradeço ao Prof. Anderson, pelo suporte no momento necessário, sendo importante nos avanços dos estudos em laboratório.

Muito grato aos supervisores e apoiadores do Laboratório de Solos e Pavimentação, Sr. Carlos e Sr. Teodoro, pelo acompanhamento nos trabalhos de laboratório.

Muito grato ao meu amigo e parceiro de turma UEMA 2012.2, Ronierisson Fonseca, pelo suporte em todos os momentos em que lhe foi solicitado, onde jamais mediu esforços para nos ajudar e que, com certeza, teve contribuição importante.

## RESUMO

Sabe-se que apenas a determinação das deflexões recuperáveis máximas não é suficiente para uma avaliação estrutural mais apurada de um pavimento, logo é necessário o conhecimento da forma das bacias de deformação, onde se tem maiores informações sobre a estrutura do pavimento. Assim, a distribuição ordenada de seções de análise ao longo de um segmento de pavimento fornecerá as condições estruturais do trecho naquele período, servindo como comparação para outros levantamentos realizados em períodos diferentes. Este estudo consta de uma investigação acerca das vias recém recapeadas do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), onde foram coletados dados funcionais e deflectométricos, com base segundo as normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Será focada na determinação das deflexões recuperáveis e o delineamento da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman tradicional. Na análise dos resultados obtidos, o equipamento, forneceu dados aproximados para utilização em projetos de pavimentação, ou seja, podem ser empregados nas medições das deflexões máximas e serem utilizados em qualquer um dos métodos oficiais de projetos atuais do DNIT. Numa análise estrutural simplificada, a estrutura do pavimento avaliada mostrou-se 50% comprometida, ensejando inclusive, segmentos que necessitam de reforço ou reconstrução provavelmente relacionados às camadas subjacentes ao revestimento.

**Palavras-Chave:** Análise Funcional; Avaliação Estrutural; Viga Benkelman Tradicional; Vias recém recapeadas.

## **ABSTRACT**

It is known that only the determination of maximum recoverable deflections is not sufficient for a more accurate structural evaluation of a pavement, so it is necessary to know the shape of the deformation basins, where more information about the pavement structure is available. Thus, the orderly distribution of analysis sections along a floor segment will provide the structural conditions of the section in that period, serving as a comparison for other surveys conducted in different periods. This study consists of an investigation of the newly recaptured roads of the Campus Paulo VI of the State University of Maranhão (UEMA), where functional and deflectionometric data were collected, based on the current norms of the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT). It will be focused on the determination of the recoverable deflections and the design of the deformation basin through the traditional Benkelman beam. In the analysis of the results obtained, the equipment provided approximate data for use in paving projects, that is, they can be used in the measurements of the maximum deflections and be used in any of the official methods of current DNIT projects. In a simplified structural analysis, the structure of the pavement evaluated was shown to be 50% compromised, including segments requiring reinforcement or reconstruction probably related to the underlying layers.

Keyword: Functional Analysis; Structural Evaluation; Beam Benkelman Traditional; Roads newly recaptured.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CB	Concreto Betuminoso
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
D <sub>0</sub>	Deflexão total ou máxima recuperável no ponto de aplicação da carga
D <sub>25</sub>	Deflexão recuperável a 25cm do ponto de aplicação da carga
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ME	Método de Ensaio
NBR	Norma Brasileira
PRO	Procedimento
TER	Terminologia
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
VB	Viga Benkelman

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pavimento Flexível (Vista Transversal).....	17
Figura 2: Aspectos de custo de um pavimento. ....	19
Figura 3: Esquema da viga Benkelman. ....	25
Figura 4: Esquema de leituras com a VB para obtenção da bacia de deformação. ....	26
Figura 5: Processo de aferição. ....	28
Figura 6: Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura. ....	29
Figura 7: Viga Benkelman tradicional.....	32
Figura 8: Deformação do pavimento na ação da carga.....	33
Figura 9: Fases da vida estrutural. ....	34
Figura 10: Efeito da carga sobre o pavimento. ....	35
Figura 11: Ábaco para determinação da deflexão admissível para CB. ....	39
Figura 12: Processo de aferição da VB tradicional. ....	44
Figura 13: Extensômetro analógico da viga. ....	45
Figura 14: Visão esquemática no Campus.....	46
Figura 15: Mapa esquemático do trecho em estudo - CAMPUS Paulo VI. ....	47
Figura 16: Demarcações das estacas.....	48
Figura 17: Estaca inicial demarcada. ....	49
Figura 18: Desenho esquemático da distribuição intercalada das estacas. ....	49
Figura 19: Carregamento da caçamba. ....	50
Figura 20: Material fresado utilizado. ....	50
Figura 21: Pesagem do eixo traseiro do caminhão. ....	51
Figura 22: Valor do peso ilustrado. ....	51

Figura 23: Regulagem do manípulo antes de aferir as leituras.....	52
Figura 24: Graduação das leituras inicial e intermediárias na estaca. ....	53
Figura 25: Transporte da VB tradicional à estaca seguinte. ....	53
Figura 26: Aferição da temperatura do pavimento na estaca selecionada.....	54
Figura 27: Acionamento do vibrador antes de medir a deflexão.....	54
Figura 28: Posicionamento da VB tradicional entre os pneus do caminhão. ....	55
Figura 29: Patologia eminente próximo à estaca 30.....	74
Figura 30: Painel próxima à estaca 30 já atingindo a camada de base. ....	75
Figura 31: Surgimento de pequenas patologias na estaca 12. ....	75
Figura 32: Coincidência entre as demarcações das estacas. ....	76
Figura 33: Viga Benkelman tradicional.....	83
Figura 34: Visão ampliada do vibrador e extensômetro analógico. ....	84
Figura 35: Apoio da ponta de prova e extensômetro no prato da prensa. ....	85
Figura 36: Acionamento da manivela da prensa.....	86
Figura 37: Posicionamento do caminhão e da VB tradicional na pista. ....	87
Figura 38: Marcos de referência feito a giz. ....	88
Figura 39: Liberação da trava de proteção da viga.....	89
Figura 40: Leitura inicial (L0). ....	90
Figura 41: Leituras intermediárias (Li) e final (Lf). ....	91
Figura 42: Ilustração de pequenas painelas no trecho. ....	94
Figura 43: Painel de aproximadamente 9cm.....	95
Figura 44: Painel preenchida com sedimentos de intempérie.....	95
Figura 45: Painel rente à estaca 30 e do ponto de ônibus da calçada da PROPLAN. .	96
Figura 46: Mesma painel rente à estaca 30 e ao prédio da UEMANET.....	96

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Bacia deflectométrica da estaca 10.....	62
Gráfico 2: Bacia deflectométrica da estaca 20.....	63
Gráfico 3: Bacia deflectométrica da estaca 30.....	64
Gráfico 4: Bacia deflectométrica da estaca 40.....	65
Gráfico 5: Bacia deflectométrica da estaca 50.....	66

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 Objetivo Geral .....	14
2.2 Objetivos Específicos .....	14
<b>3 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>15</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
4.1 Pavimento Flexível: Definição da Estrutura.....	16
4.2 Medidas de Conservação e Prevenção .....	18
4.3 Orçamento e Custos Adicionais.....	19
4.4 Defeitos no Pavimento Flexível .....	20
4.5 Avaliação Funcional de Pavimentos Flexíveis .....	21
4.6 Avaliação Estrutural .....	23
4.6.1 Medidas de Deflexão – Viga Benkelman .....	25
4.6.2 Operação da viga Benkelman tradicional.....	27
4.6.3 Aferição da viga Benkelman tradicional (Calibração) .....	28
4.6.4 Raio de Curvatura.....	29
4.6.5 Equipamentos para medição das deflexões .....	30
4.6.6 Montagem da viga Benkelman tradicional.....	31
4.6.7 Análise de bacias deflectométricas .....	32
4.6.8 Correções da deflexão de projeto .....	36
4.6.8.1 Correção por efeito da temperatura .....	36
4.6.8.2 Correção por efeito estacional .....	37
4.6.9 Deflexão Admissível (Dadm) .....	38
4.7 Critérios de Avaliação Estrutural dos Pavimentos.....	40
<b>5 MATERIAIS, MÉTODOS E DADOS DO ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
5.1 Equipamentos .....	43
5.2 Métodos .....	43
5.2.1 Aferição da viga Benkelman.....	44
5.2.2 Segmento viário adotado e demarcação das estacas.....	45

5.2.3 Carregamento e Pesagem do caminhão .....	50
5.2.4 Avaliação em campo .....	52
<b>6 RESULTADOS.....</b>	<b>56</b>
6.1 Aferição da viga Benkelman.....	56
6.2 Avaliação em campo da viga Benkelman .....	60
6.3 Cálculo dos parâmetros de avaliação estrutural .....	68
6.4 Avaliação comparativa entre medidas de deflexões .....	70
6.5 Avaliação Comparativa entre raios de curvatura .....	71
6.6 Classificação estrutural considerando apenas a deflexão máxima .....	72
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>77</b>
7.1 Conclusões relevantes .....	77
7.2 Sugestões para próximos trabalhos.....	78
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>79</b>
APÊNDICE A.....	79
APÊNDICE B.....	79
APÊNDICE C.....	79
<b>ANEXOS .....</b>	<b>79</b>
ANEXO A .....	79
ANEXO B .....	79

# 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata das avaliações funcional e estrutural. A primeira trata da determinação da capacidade de desempenho funcional momentânea, serventia, que o pavimento proporciona ao usuário, ou seja, o conforto em termos de qualidade de rolamento. O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento. Já a última trata da determinação da capacidade de desempenho estrutural, que por sua vez é a capacidade do pavimento de manter sua integridade estrutural. A avaliação estrutural de pavimentos consiste na análise das medidas de deslocamentos verticais recuperáveis da superfície do pavimento quando submetido a determinado carregamento (DER/SP, 2006, p. 10 e 11).

Segundo a CNT (2006), as primeiras estradas, conforme os padrões atuais, somente surgiram no Brasil no século XIX. A necessidade de escoamento dos produtos e o crescimento do intercâmbio comercial entre localidades e regiões exigiam a abertura de rotas mais modernas. Com isso, a primeira rodovia pavimentada do Brasil, hoje conhecida como Washington Luís, foi inaugurada em 1928, ligando a cidade do Rio de Janeiro a Petrópolis. A implantação da indústria automobilística, em meados do século passado, também foi fator determinante para a consolidação do transporte rodoviário como o mais utilizado no Brasil.

A matriz de transporte é predominantemente rodoviária, com esta modalidade correspondendo a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas. Sendo assim a pavimentação rodoviária possui um papel importante nos transportes refletindo no desenvolvimento econômico de uma nação, visto que, o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda e garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas se faz necessária à construção de uma estrutura chamada de pavimento (CNT, 2006).

Diante disso, o presente trabalho trata do estudo das vias com revestimento recuperado por meio de fresagem e recapeamento do Campus Paulo VI - UEMA. Utilizou-se uma ferramenta técnica de engenharia aplicada na manutenção de pavimentos, a viga Benkelman tradicional. A análise funcional e estrutural dos trechos de vias logo após a realização dos serviços de recuperação servirá não só para avaliar o que foi feito, mas também como conjunto de dados disponíveis para os estudos que determinam as futuras intervenções com o intuito de prolongar a vida útil estimada de projeto.

Bernucci et al. (2006, p. 441) cita que essa avaliação de pavimentos tem como conceitos associados:

- Serventia;
- Desempenho;
- Gerência;
- Restauração;
- Manutenção preventiva;
- Reforço e reconstrução.

Contudo, considerou-se que os resultados do estudo realizado neste trabalho venham a servir de embasamento para futuras intervenções. Para isso, é viável a realização de um ensaio não destrutivo, por meio da viga Benkelman, de modo a determinar a capacidade estrutural do pavimento em estudo.

A viga Benkelman é um equipamento adequado para grandes extensões de pistas e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, de forma a acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, representada por medidas de deflexão. (BERNUCCI et al, 2006, p. 443).

O conhecimento do estado funcional e estrutural das vias nos assegura a intervenção em períodos adequados e por meio de obras de menor magnitude visando o prolongamento da sua vida útil. As intervenções de manutenção e restauração tem menor custo do que uma reconstrução, desde que aplicados nos momentos corretos. (MARQUESINI, 2012).

O trabalho obedece as normativas geridas pelos órgãos rodoviários nacionais, sobretudo o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) no que tange a todos os procedimentos adotados. Foi feito um levantamento avaliativo das condições atuais do pavimento, em suma, uma avaliação estrutural auxiliada de uma avaliação funcional, além da análise de resultados e a classificação do estado das vias.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar as deflexões do revestimento recentemente restaurado das vias do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão, São Luís - MA.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar os dados obtidos por meio do levantamento deflectométrico (método não destrutivo) para embasamento de futuros dimensionamentos de reforços dos pavimentos;
- Suprir a Prefeitura do Campus de dados para o início da gerência da malha rodoviária da UEMA.

### 3 JUSTIFICATIVA

A análise e interpretação de informações atualizadas relativas às condições superficiais e estruturais das vias recentemente asfaltadas do Campus Paulo VI da UEMA possibilitarão gerar um banco de dados que servirá de suporte às políticas de planejamento das obras de manutenção, tendo em vista que as vias pavimentadas, no decorrer do tempo, se deterioram.

Com base nas normas atuais do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), os resultados desta pesquisa fornecerão aos engenheiros da Divisão de Obras da UEMA, informações importantes para uma futura verificação funcional e estrutural da malha viária do Campus. Tais informações servirão de suporte para a tomada de decisões quanto ao aproveitamento ou não dos pavimentos existentes, como também no dimensionamento de reforço de pavimento, caso seja necessário.

Este trabalho foi realizado na UEMA no sentido de tomar conhecimento de forma mais objetiva a situação dos pavimentos que compõem a malha viária pavimentada desta Universidade. Assim, um banco de dados sobre a atual condição estrutural do sistema viário do campus, fornece condições para futuras verificações da evolução dos problemas superficiais e estruturais que tenderão a aumentar no transcorrer do tempo na via estudada.

Para essa avaliação foi utilizada a viga Benkelman tradicional, pois ela é capaz de fornecer os dados reais deflectométricos do trecho, pela praticidade e pela disponibilidade no laboratório.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Pavimento Flexível: Definição da Estrutura

O pavimento é composto por várias camadas com espessuras finitas, tendo a função de resistir aos esforços solicitantes pelo tráfego de veículos e ao clima, além de auxiliar na melhoria das condições de rolamento, com segurança, conforto e economia aos usuários (SENÇO, 1997 apud MARQUESINI, 2012).

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito (CRONEY, 1977 apud BERNUCCI et al, 2006), limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

O desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais. Aliado a esses dois objetivos, o pavimento deve ainda ser projetado da forma mais econômica possível, atendendo as restrições orçamentárias (BERNUCCI et al, 2006, p. 403).

Para o usuário, o estado real da superfície é o que realmente importa, haja vista quaisquer patologias ou imperfeições na pista afetam no conforto. Quando o mesmo é prejudicado, significa que o veículo também sofrerá mais ainda as consequências desses defeitos. O produto gerado disso acarretam maiores custos operacionais, como gastos na manutenção dos veículos, consumo de combustível, pneus, tempo com deslocamento e a própria segurança do condutor. Em suma, atender o conforto ao rolamento significa evitar uma série de outros problemas importantes (BERNUCCI et al, 2006).

Então, para melhor entendimento sobre essa estrutura, ela é dita como um sistema formado por várias partes do pavimento, constituída de um conjunto solidário que sofrerá deslocamentos e tensões como parte de resistir às cargas solicitantes pelos veículos e pelo clima. Ou seja, como qualquer outra estrutura de engenharia civil, distribuem-se as cargas de forma

compatível com a resistência de cada camada do pavimento (MOTTA, 1995 apud MARQUESINI, 2012).

Segundo a DER/SP (2006, p. 4) o pavimento flexível rodoviário é composto pelas seguintes camadas:

**Subleito:** é a camada compreendida entre a superfície da plataforma de terraplenagem e a superfície paralela, situada no limite inferior da zona de influência das pressões aplicadas na superfície do pavimento;

**Reforço do subleito:** é a camada requerida por imposição técnico-econômica, situada imediatamente acima do subleito. É constituída basicamente por material de empréstimo ou jazida;

**Sub-base:** é a camada requerida por imposição técnico-econômica, situada entre o subleito ou reforço do subleito e a base. Pode ser constituída por materiais granulares graúdos, como pedregulhos, cascalhos, produtos de britagem que, embora selecionados, não atendam a todos os requisitos necessários à constituição de base de pavimento; solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal, ou simplesmente por material selecionado de empréstimo ou jazida;

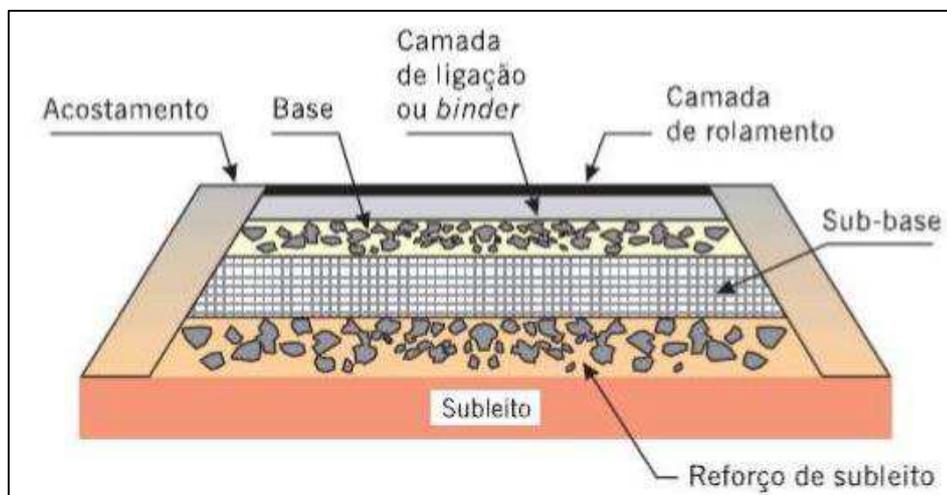
**Base:** é a camada situada acima da sub-base. Pode ser constituída por materiais granulares, como pedregulhos, cascalhos e produtos de britagem, estabilizados com a adição de cimento ou material asfáltico quando necessário, solos estabilizados mecanicamente mediante mistura com produtos de britagem, ou solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal;

**Revestimento:** é a camada situada sobre a base, constituindo a superfície de rolamento para os veículos. Pode ser constituído por tratamento superficial ou concreto asfáltico;

**Camada de ligação ou binder:** é a camada situada entre a base e a capa de rolamento, utilizada nos casos em que a espessura requerida para o revestimento asfáltico seja elevada.

A figura 1 ilustra um modelo típico de estrutura de pavimento flexível:

Figura 1: Pavimento Flexível (Vista Transversal).



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 9), o pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. No qual, o objetivo deste trabalho remete exclusivamente na caracterização avaliativa dos pavimentos flexíveis. Logo, são aqueles em que o revestimento é composto de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. É formado por camadas de revestimento, base, sub-base, reforço de subleito (se necessário) e subleito, conforme ilustrado na Figura 1. O revestimento pode ser composto pela camada de rolamento (diretamente ligada aos pneus dos veículos) e camadas intermediárias, denominadas de binder. Conforme o dimensionamento, o tráfego e os materiais disponíveis na região poderão ser excluídas algumas das camadas ora citadas.

## 4.2 Medidas de Conservação e Prevenção

Segundo o Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005, p. 99), a conservação rodoviária tem como seu principal objetivo preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário, além das instalações fixas dentro dos padrões de serviços estabelecidos, sendo divididos nos conjuntos de operações rotineiras, periódicas e de emergência:

Conservação preventiva rotineira: é o conjunto de procedimentos de manutenção que visa à reparação do defeito e também, restabelece o funcionamento da rodovia, resultando em conforto e segurança ao usuário;

Conservação preventiva periódica: é o conjunto de procedimentos de manutenção realizado em um dado período de tempo com objetivo de evitar o surgimento e ou agravamento de novos defeitos, ou seja, tarefas requeridas durante o ano, mas dependem do trânsito, da topografia e do clima;

Conservação de emergência: é o conjunto de operações necessário para reparar, repor, reconstruir trechos ou estrutura da via, que tenham sido obstruídas ou danificadas devido aos efeitos de catastróficos;

A conservação deve ter como uma de suas preocupações a manutenção de obras de drenagem, tanto superficial quanto subterrânea. No caso de drenagem superficial todo o pavimento deve possuir condições de escoamento das águas, tanto transversal como longitudinal. As galerias e as bocas de lobo devem ser mantidas desobstruídas principalmente no início das grandes chuvas, pois a água acarreta infiltração nas trincas dos pavimentos, afetando sua estrutura, expandem as deficiências existentes e até mesmo cria novas deficiências (SENÇO, 2001 apud MARQUESINI, 2012).

A conservação preventiva, à medida que se tenha um planejamento frequente de atuação, evita o surgimento de panelas, trincas e patologias afins e também aquelas existentes não se expandem, seja em área ou em profundidade. Ou seja, minimiza intervenções na via

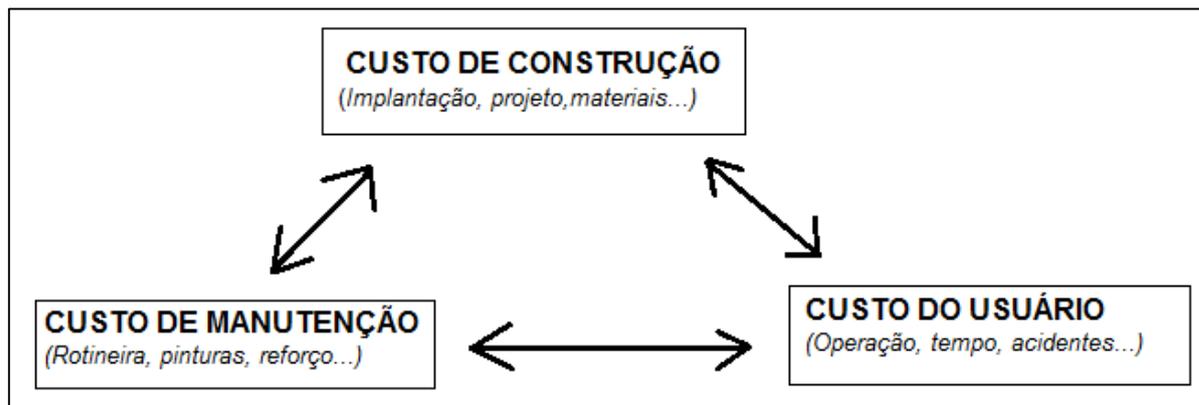
rotineiramente, causando transtornos e custos maiores de correção nesses reparos (NOGUEIRA, 1961 apud MARQUESINI, 2012).

### 4.3 Orçamento e Custos Adicionais

O custo global de um pavimento deve ser analisado não somente como o de implantação, mas também considerar o de manutenção e o do usuário. Enquanto os custos de construção são conhecidos, os de manutenção são parcialmente e os do usuário são ignorados e desprezados na maioria das vezes (MOTTA, 1995 apud MARQUESINI, 2012).

A Figura 2 mostra o custo que cada etapa possui, ou seja, se investir muito na construção, provavelmente irá economizar na manutenção, ou se investir na manutenção, reduz os custos do usuário.

Figura 2: Aspectos de custo de um pavimento.



Fonte: Adaptado de Marquesini (2012).

Os acidentes ocorridos em vias rodoviárias são causados principalmente por travessia de águas na pista, buraco na pista, falta de sinalização horizontal e vertical, estrangulamentos de pista devido às erosões ou escorregamentos (SILVA, 2005 apud MARQUESINI, 2012).

Os custos para reabilitar as estradas em condições regulares e ruins são excessivos, com relação aos custos com a manutenção, contudo, se não houver manutenção na malha rodoviária os custos aumentarão drasticamente, sendo que os trechos já deteriorados irão piorar suas condições e os trechos em boas condições tenderão a transformar-se em regulares, exigindo também manutenção (NISHIYAMA e DOMINGUES, 1995 apud MARQUESINI, 2012).

Os custos de manutenção se elevam exponencialmente em relação à degradação na ausência de cuidados com a conservação, ocasionando uma deterioração intensa do pavimento, no qual necessitará de uma reconstrução total ou parcial em pequenos intervalos de tempo. Podendo assim até ser inviável.

Os benefícios decorrentes da recuperação de vias segundo Nishiyama e Domingues (1995 apud MARQUESINI, 2012, p. 16 e 17), são:

- Redução nos custos operacionais de veículos;
- Redução nos custos da manutenção futura das estradas de rodagem;
- Economia no tempo de viagem tanto no transporte de passageiros como na remessa de cargas;
- Redução nos acidentes;
- Estímulo ao desenvolvimento econômico;
- Aumento do conforto e da comodidade;
- Integração nacional mais efetiva;
- Distribuição mais equitativa da renda;
- Incremento no prestígio do país.

#### **4.4 Defeitos no Pavimento Flexível**

Um pavimento em perfeito estado não deve apresentar qualquer elevação ou depressão visíveis a olho nu, seja qual for a dimensão da patologia. Muito menos, causando insegurança e/ou perturbação no tráfego de veículo, havendo qualquer interferência no conforto de seus usuários.

Segundo DNIT (2006), a informação mais importante para a definição da qualidade do pavimento é a avaliação dos defeitos presentes na superfície do mesmo, pois estes refletem a atual situação do pavimento.

O clima contribui para aceleração da deterioração do pavimento, pois a infiltração da água da chuva pode ocasionar a queda da capacidade de suporte, com isso, quando o tráfego solicita a estrutura ocasiona maiores deslocamentos, assim provocando danos estruturais e funcionais. A variação de temperatura também degrada o pavimento, pois o aumento desta afeta a viscosidade dos ligantes asfálticos e a resistência da mistura. Já as deformações permanentes e as temperaturas baixas, ocasionam trincas por retração, que se possuir uma camada de

revestimento fina, e construída sobre materiais deformáveis, fica mais vulnerável ao trincamento por fadiga (BERNUCCI et al, 2006).

O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento. Na gerência de pavimentos ou de manutenção, o conjunto de defeitos de um dado trecho pode ser resumido por índices que auxiliem na hierarquização de necessidades e alternativas de intervenção. (BERNUCCI et al, 2006, p. 413).

As terminologias dos defeitos são preconizadas pela norma do DNIT 005/2003, que tem por objetivo padronizar os termos técnicos empregados na identificação das patologias comumente observadas em pavimentos flexíveis e semirrígidos. Os tipos de defeitos são catalogados pela norma brasileira são: fendas (F); afundamentos (A); corrugação e ondulações transversais (O); exsudação (EX); desgaste ou desagregação (D); panela ou buraco (P); e remendos (R). A incidência destas patologias tende a interferir diretamente na segurança e na qualidade de rolamento de seus usuários. Os tipos mais comuns dentre as análises funcional e estrutural são as panelas e as fendas.

#### **4.5 Avaliação Funcional de Pavimentos Flexíveis**

O pavimento possui quatro objetivos principais: conforto de rodagem, capacidade de suportar cargas previamente dimensionadas, segurança e também conforto visual, estando esse último ligado à sua estética. Então, de qualquer maneira, um pavimento apropriado é aquele cujo todo perímetro da superfície de rolamento estejam em bom estado, suportando bem as cargas, onde o contato pneu-pavimento seja seguro, considerando também a frenagem de veículos pesados, além da aparência agradável (DANIELESKI, 2004 apud MARQUESINI, 2012).

O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é fornecer superfície com serventia adequada quanto à qualidade de rolamento podendo ser subjetiva ou objetiva. Na avaliação funcional subjetiva se atribui notas quanto às características físicas de uma rodovia sob os defeitos de irregularidades, trincas, afundamentos, remendos e textura superficial, já na avaliação funcional objetiva é aquela que é feita mediante a quantificação numérica dos defeitos através dos serviços de irregularidades longitudinais, cadastro contínuo de reparos superficiais e profundos, etc (NUNES, 2015, p. 17).

Para Bernucci et al. (2006, p. 404), a avaliação funcional de um pavimento relaciona-se à apreciação da superfície dos pavimentos e como este estado influencia no conforto ao rolamento. O primeiro método estabelecido de forma sistemática para a avaliação funcional foi o da serventia de um dado trecho de pavimento, concebida por Carey e Irick (1960) para as pistas experimentais da AASHO (*American Association of State Highway Officials*, hoje AASHTO, *American Association of State Highway*

*and Transportation Officials*). O valor de serventia atual é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 a 5, dada pela média de notas de avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho, em um dado momento da vida do pavimento. Esta escala compreende cinco níveis de serventia, conforme expresso na Tabela 1, sendo também adotada no país pelo DNIT 009/2003-PRO (DNIT, 2003d).

Tabela 1: Níveis de Serventia.

Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (faixa de notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

Fonte: (DNIT, 2003 apud Bernucci et al, 2006).

No momento de avaliar um pavimento, devem ser consideradas as normas técnicas do órgão responsável, o padrão da rodovia e também as necessidades do usuário da via, pois há diferença visível de uma autoestrada com o pavimento de uma rodovia vicinal, onde cada pavimento deve ser avaliado compatível com classificação da rodovia e com a categoria de veículo que nelas trafegam (DOMINGUES, 1993 apud MARQUESINI, 2012).

Segundo Benevides (2006 apud MARQUESINI, 2012, p. 24), as condições funcionais devem ser avaliadas por procedimentos adequados as características da via analisada, com utilização de vários métodos para identificação dos defeitos da superfície do pavimento. Devem ser levados em conta também os fatores que geram os defeitos identificados, tais como: o clima, solicitação do tráfego, características dos materiais empregados no pavimento e o processo construtivo, atuando de forma isolada ou simultânea. Essas metodologias objetivam:

- Avaliar as condições de superfície do pavimento relativas ao conforto e à segurança oferecidos aos usuários;
- Elaborar um inventário das principais ocorrências observadas pela presença de defeitos na superfície dos pavimentos asfálticos;
- Determinar por meio de medições, os fatores que causaram os defeitos na superfície dos pavimentos;
- Descrever e caracterizar os defeitos, identificando o tipo, a severidade e a densidade.

Os pavimentos de uma malha viária sofrem variações quanto a sua condição ao longo de sua extensão, isto está ligado às características físicas e de condições, onde é necessário dividir a malha viária em segmentos. Os procedimentos consistem em: (1) Adotar segmentos com extensão fixa, (2) Dividir em segmentos homogêneos (DNER, 1998 apud MARQUESINI).

No Brasil, a avaliação funcional subjetiva é regulamentada pela norma DNIT 009/2003 – PRO (avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento) e a objetiva através da norma DNIT 006/2003 – PRO (Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento) e DNIT 007/2003 – Pro (Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento).

#### 4.6 Avaliação Estrutural

A avaliação estrutural de um pavimento pode ser feita pelos seguintes métodos: o destrutivo, semidestruutivo ou não-destrutivo. Onde:

O método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga *in situ*. Pela sua própria natureza destrutiva só pode ser empregado em alguns poucos pontos selecionados como representativos de cada segmento a ser avaliado. Com a extração de amostras do pavimento é possível identificar os tipos de materiais das camadas e subleito, as espessuras de camadas e fazer coleta de amostras para ensaios de laboratório. É possível determinar a massa específica e a umidade de cada camada para comparar com as condições de umidade ótima e massa específica máxima dos ensaios de compactação, e assim, avaliar eventuais excessos de umidade ou deficiência de grau de compactação. A retirada de corpos-de-prova do revestimento asfáltico, por sonda rotativa, permite avaliar o grau de envelhecimento do ligante, entre outras observações possíveis (BERNUCCI et al. 2006, p. 443).

O método semidestruutivo é aquele que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração – DCP (TRICHÊS e CARDOSO, 2001; TRICHÊS et al, 2004 apud BERNUCCI et al, 2006). A aplicação deste ensaio só permite em geral correlação com o ISC dos materiais, com certa precisão. Atualmente também começam a ser usados, com mais propriedade, equipamentos portáteis para avaliação expedita do módulo de elasticidade do pavimento, através de pulsos, aplicados na superfície, e medições do retorno dos mesmos.

Bernucci et al. (2006, p. 443) reforça que na busca por uma avaliação mais adequada a ser feita em grandes extensões de pistas e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, de forma a acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, é a que lança mão de medidas não-destrutivas, representadas por medidas de deflexão. A cada passagem de roda o pavimento sofre um deslocamento total que tem duas componentes:

1. Deformação elástica que resulta na flexão alternada do revestimento, chamada por convenção de deflexão, cuja medida é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em uso.

2. Deformação permanente que resulta no afundamento de trilha de roda cuja medida também é um critério de definição da vida útil estrutural e funcional de um pavimento visto que, a partir de certo valor, pode interferir na condição de conforto e segurança do tráfego.

Quando se mede o deslocamento elástico em vários pontos a partir da carga tem-se a denominada bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto do pavimento (DNER-ME 061/94).

Contudo, o foco deste trabalho está exclusivamente relacionado ao método de ensaio não-destrutivo, com o uso da viga Benkelman, no qual será aferido medidas deflectométricas.

Essas deflexões são as respostas do conjunto “pavimento-subleito” sob a ação das cargas impostas pelos veículos. O manual do DNIT (2006 apud FERREIRA, 2006) estabelece que as medidas das deflexões dos pavimentos sirvam para:

- Determinação da vida útil de um pavimento;
- Avaliação estrutural de um pavimento com vistas a um projeto para sua restauração;
- Controle da qualidade estrutural de camadas em execução de obras novas;
- Determinar as condições de um pavimento ou uma rede rodoviária com vistas a uma política de conservação;
- Avaliação dos diferentes métodos de projeto de um pavimento;
- Estudo da estrutura mais apropriada para um projeto de alargamento de vias existentes;
- Em certos casos, selecionar a carga por roda que pode ser permitida em períodos críticos em determinados setores (devido à chuva, degelo, etc.).

Já a viga Benkelman é um equipamento que mede as deflexões do pavimento sujeitos à aplicação de uma carga estática ou que se desloca a uma velocidade considerada muito baixa para que não ocorra influência de cargas inerciais. Em nosso estudo iremos utilizar a versão tradicional da viga.

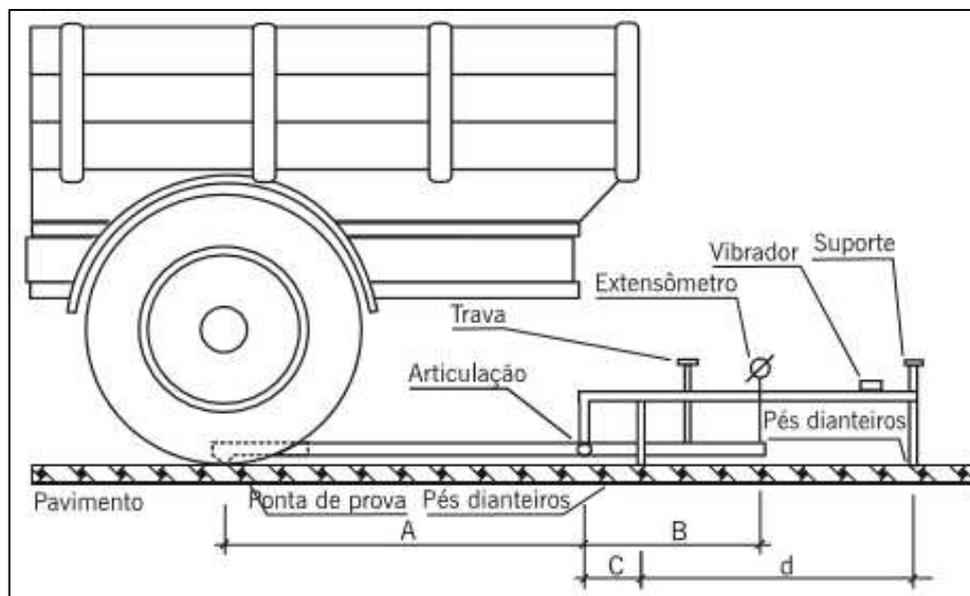
#### 4.6.1 Medidas de Deflexão – Viga Benkelman

Segundo a DNER-ME 024/94, a viga Benkelman consiste de 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. A Figura 3 mostra um esquema desse equipamento com o caminhão e um exemplo de medida em campo.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 446), o ensaio completo consiste em: (1) colocar a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo; (2) fazer uma leitura inicial do extensômetro que se situa a uma distância segura para o operador sobre o braço móvel da viga – leitura  $L_i$ ; (3) fazer o caminhão se afastar lentamente até 10m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação da leitura; (4) ler o extensômetro – leitura  $L_f$ . Essa leitura final corresponde ao descarregamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica do pavimento (deflexão). Calcula-se a deflexão  $d_0$  pela expressão (1) abaixo, sendo  $K$  a constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados:

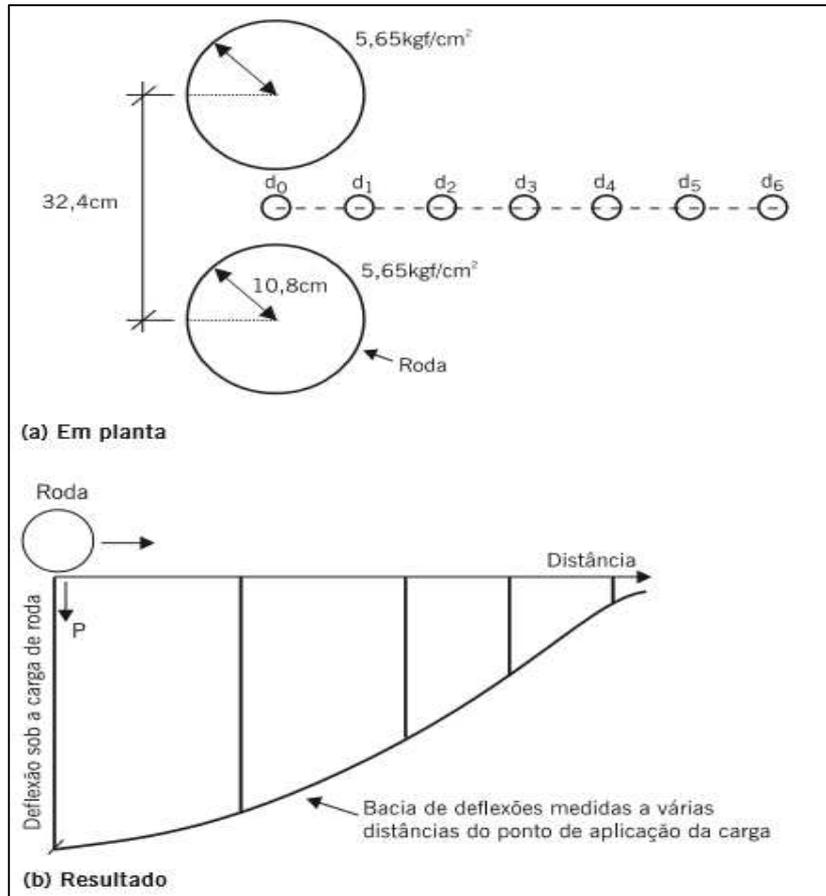
$$D_o = (L_i - L_f) \cdot K \quad (1)$$

Figura 3: Esquema da viga Benkelman.



Fonte: DNER (1994).

Figura 4: Esquema de leituras com a VB para obtenção da bacia de deformação.



Fonte: Nóbrega, (2003) apud Bernucci et al. (2006).

A norma DNER 024/94 – ME estabelece que os pontos onde serão medidas as deflexões deverão ser convenientemente demarcadas e localizadas a uma distância prefixada da borda do revestimento, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Localização dos pontos de ensaio.

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

Fonte: DNER (1994).

Com a VB tradicional temos que aferir as distâncias percorridas pelo eixo do caminhão e anotar as deflexões máxima, intermediárias e final. Para Balbo (2007), trata-se de um ensaio estático, ou seja, as medidas (leituras) são realizadas em cada ponto, com o veículo estacionário.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 447), hoje é possível encontrar no país vigas automatizadas, nas quais as leituras dos deslocamentos se fazem com medidores elétricos tipo LVDT, tornando o processo de campanha de medições mais rápido e preciso, visto que todas as leituras intermediárias devem ser referidas à leitura inicial, para o cálculo da deflexão no ponto considerado.

Segundo Borges (2001, p. 14), esses medidores elétricos LVDT tem resolução de 0,001mm e a sensibilidade das medidas efetuadas de 98% de precisão. Quanto à medição e registros dos deslocamentos e da linha de influência longitudinal da bacia de deslocamentos, é feita automaticamente. Bem como a medida de temperatura da superfície do pavimento. O equipamento é acompanhado de softwares especificamente elaborados para o seu manuseio. A medição realizada pode ser visualizada instantaneamente no notebook, permitindo que sejam detectadas quaisquer anomalias de imediato. A viga vem acompanhada de um odômetro, que serve para medir as distâncias horizontais percorridas pelo caminhão. O ideal é que ele seja fixado no para-choque traseiro do mesmo.

#### **4.6.2 Operação da viga Benkelman tradicional**

A norma DNER 024/94 – ME estabelece que a operação da viga é constituída por um caminhão carregado com a carga-padrão de 80 kN (8,2 tf) no eixo traseiro. O eixo traseiro do caminhão é simples e com roda dupla e os pneus devem possuir dimensões 1.000 x 20 ou 900 x 20, com 12 (doze) lonas, tipo câmara e com frisos na faixa de rodagem, calibrados a uma pressão de 0,56 MPa (5,6 kgf/ cm<sup>2</sup> ou 80 lb/ pol<sup>2</sup>).

No ensaio (Figura 3), uma das extremidades (ponta de prova), é posicionada entre um par de rodas do eixo traseiro do caminhão. Quando o caminhão estiver posicionado na ponta de prova e a viga ajustada, o vibrador é acionado posteriormente faz-se leitura inicial (L0) no extensômetro. À medida que o caminhão se movimenta para frente, a superfície do pavimento vai retornar (após algum tempo) a seu plano original quando não estava carregada, ou seja, seu peso não exercerá mais influência sobre a viga, portanto faz-se a leitura final (Lf) a uma distância de 10 metros.

O procedimento é feito de estaca em estaca pré determinada no trecho de estudo (espaçadas de 20 em 20 metros), onde é possível aferir medidas de deflexão máximas recuperáveis e/ou o conjunto de deflexões à medida que o caminhão se desloca em curtos intervalos, tais como: 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm, 125 cm e 150 cm, para assim ser possível traçar a curva deflectométrica assim como também o raio de curvatura.

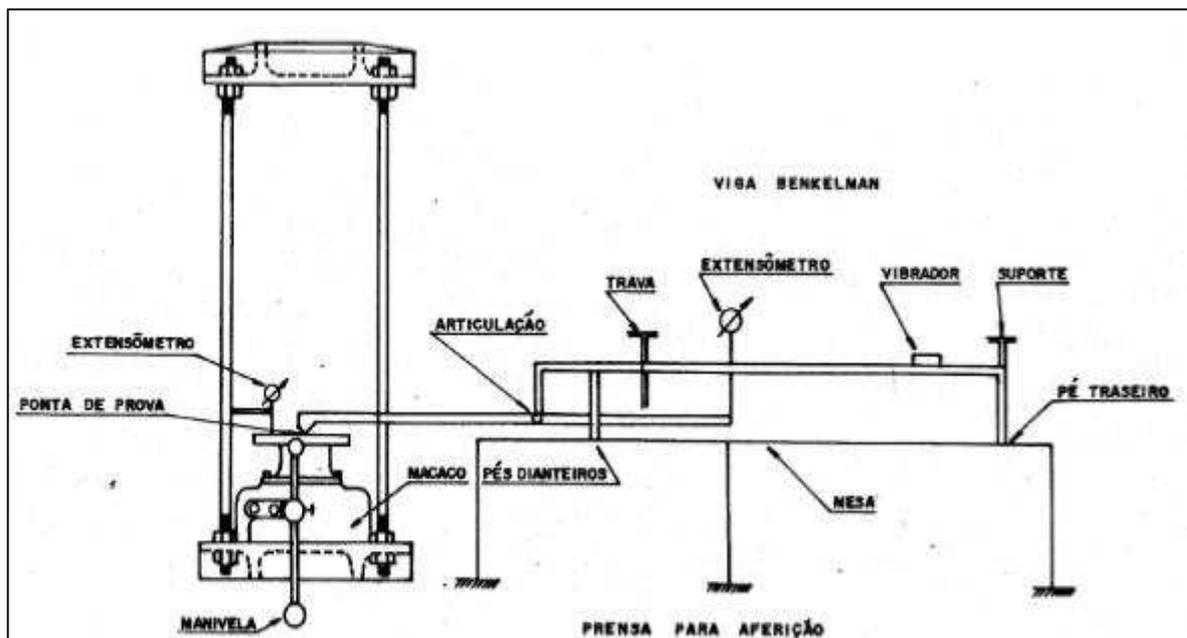
Para isto, optamos colher essas informações para as estacas 10, 20, 30, 40 e 50. Escolhidas mediante a logística e efetividade dos procedimentos visto em campo, em que demandaria muito tempo para que se pudesse aferir mais estacas. Com estas escolhas, acreditamos que elas serão sim necessárias e suficientes para nos fornecer as características estruturais fidedignas do trecho em estudo.

#### 4.6.3 Aferição da viga Benkelman tradicional (Calibração)

A viga Benkelman por ser um instrumento sensível a contratempos, tais como quedas, choques e outros defeitos do próprio uso em campo, deve ser constantemente aferida para verificar se houve variação no valor de suas constantes ( $a/b$ ) e se estas variações são admissíveis (FERREIRA, 2006).

A aferição se faz de acordo com a norma de procedimento rodoviária “DNER 175/94 – PRO – Aferição de viga Benkelman”. Essa aferição requer a utilização de uma prensa (tipo para determinação do ISC), um extensômetro mecânico de sensibilidade mínima de 0,01 mm para medir os deslocamentos do prato da base dessa prensa e conjunto para fixação do extensômetro (Relógio Comparador) no tirante de aço da prensa, conforme apresentado na figura 5.

Figura 5: Processo de aferição.



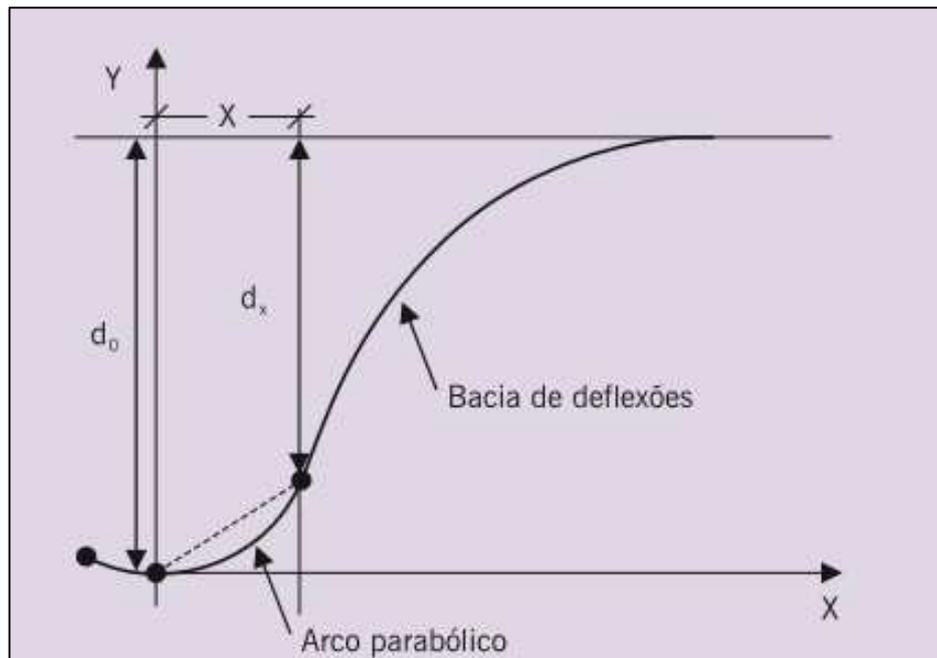
Fonte: DNER (1994).

A norma exige que devam ser feitas duas series de leituras para que se tenha no mínimo 30 (trinta) dados para realizar a calibração. Entidades rodoviárias recomendam que a aferição da viga seja feita a cada 6 (seis) meses, antes disso, só se houver qualquer tipo de contratempo.

#### 4.6.4 Raio de Curvatura

A Figura 6 mostra o esquema de medidas quando se deseja obter a bacia de deflexão com a viga Benkelman. É um procedimento trabalhoso e de pouca precisão quando realizado com a viga tradicional, mas hoje é possível encontrar no país vigas automatizadas, nas quais a leitura dos deslocamentos se faz com medidores elétricos tipo LVDT. Todas as leituras intermediárias devem ser referidas à leitura final, para o cálculo da deflexão no ponto considerado. Na maioria das vezes medem-se somente a deflexão máxima  $d_0$  e mais um ponto, em geral a 25cm do inicial ( $d_{25}$ ), para cálculo do chamado raio de curvatura, que representa um arco de parábola que passa pelos dois pontos.

Figura 6: Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura.



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Através da expressão (2) obtida pela norma DNER-ME 24/94, calcula-se o raio de curvatura  $R$  em metros e as deflexões em centésimos de milímetro:

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

Segundo Ferreira (2006, p. 15), as análises dos raios de curvatura associados com os valores das deflexões permitem conclusões sobre a qualidade das camadas que constituem o pavimento. Em princípio as grandes deflexões poderiam estar simplesmente sendo produzidas por deficiências de qualidade das camadas inferiores do pavimento, em especial do subleito. Mas nem sempre é isso que acontece, a situação fica mais clara quando se avalia em conjunto as deflexões (deformada) com o grau de curvatura, mais ou menos de acordo com os seguintes casos:

- Baixas deflexões e grandes raios de curvatura: indica pavimento em bom estado, tanto nas camadas superiores como nos inferiores;
- Baixas deflexões e pequenos raios de curvatura: provavelmente a camada superior estará com qualidade deficiente, em princípio o problema não se concentra nas camadas inferiores porque as deflexões são baixas, mas o caso requer uma investigação mais cuidadosa;
- Altas deflexões e grandes raios de curvatura: o caso significa grandes deflexões no subleito que é onde deve estar concentrado o problema de falta de qualidade de materiais ou umidade excessiva, independentemente da qualidade dos materiais das camadas superiores que podem ter qualidade satisfatória ou não;
- Altas deflexões e pequenos raios de curvatura: o pavimento está totalmente condenável.

#### 4.6.5 Equipamentos para medição das deflexões

Segundo Bernucci et al. (2006 apud GONÇALVES, 2014), nos ensaios não destrutivos para avaliação estrutural de pavimentos são utilizados equipamentos que podem ser classificados em cinco classes:

- Equipamentos estáticos: São os equipamentos que medem as deflexões do pavimento sujeitos à aplicação de uma carga estática ou que se desloca a uma velocidade considerada muito baixa para que não ocorra influência de cargas inerciais. São exemplos: ensaio de placa, viga Benkelman, deflectógrafo Lacroix;
- Equipamentos automáticos: é a automatização da própria viga Benkelman, chamada de Deflectógrafo digital;

- Equipamento estático com carga dinâmica: processo no qual há aplicação de um carregamento dinâmico em regime permanente. São exemplos: Dinaflex;
- Equipamento por impulso: processo no qual há aplicação de um carregamento dinâmico transiente ao pavimento. São exemplos: Dynatest, FWD (*Falling Weight Deflectometer*);
- Equipamento por método de propagação de onda: medem a fase da velocidade de propagação de onda de tensões e deformações.

Conforme os valores numéricos apresentados por cada um dos equipamentos utilizados na avaliação estrutural são bastante distintos. Esses dados numéricos por sua vez, podem ser utilizados para levantamentos quanto à condição do pavimento, análise de rotina e projetos de reabilitação. Todos os equipamentos devem ser constantemente calibrados por processos normatizados e seguem rotina de aplicação determinada para cada tipo de carregamento (BERNUCCI et al, 2006 apud GONÇALVES, 2014).

No Brasil e no mundo, dois equipamentos são amplamente empregados em avaliações das deflexões de pavimentos (defletômetros): a viga Benkelman e FWD (*Falling Weight Deflectometer*), no qual são medidas e/ou determinadas as deflexões máximas, o raio de curvatura e a bacia de deflexão ou deformada (BERNUCCI et al, 2006 apud GONÇALVES, 2014).

#### **4.6.6 Montagem da viga Benkelman tradicional**

O processo de reconhecimento e montagem da viga Benkelman tradicional tem por objetivo inicial o conhecimento e manuseio do equipamento antes de sua utilização em campo, evitando possíveis incômodos e imprevistos, tendo como referência a norma DNER 024/94 – ME.

A viga Benkelman tradicional utilizada no processo é constituída por um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa, formando dois braços cujos comprimentos a e b seguem a relação de 2:1. A extremidade do braço maior contém a ponta de prova da viga, enquanto que a extremidade do braço menor aciona um extensômetro analógico com precisão de 0,01 mm. Possui um pequeno vibrador destinado a evitar eventuais inibições do ponteiro do extensômetro e dispõem de uma trava de proteção a ser utilizada por ocasião do

transporte. A Figura 7 apresenta a viga Benkelman tradicional após montagem em laboratório, enquanto o Apêndice A apresenta o processo de montagem da mesma.

Figura 7: Viga Benkelman tradicional.



Fonte: O autor (2017).

#### 4.6.7 Análise de bacias deflectométricas

Segundo Ferreira (2006, p. 1), a deflectometria é o estudo das deformações verticais da superfície de um pavimento em consequência da ação de uma determinada carga ou solicitação.

Essas deformações são partes do caráter elástico do material dos pavimentos quando sobre eles atua uma carga, mas se tem que considerar que também intervêm esforços plásticos nesse processo. Os primeiros (elásticos) desaparecem quando se remove a carga enquanto que os segundos (plásticos) são permanentes e a repetição das cargas produz distorções e trilhas na superfície do pavimento.

Segundo Miranda (2013, p. 33 e 37), as deformações na superfície do pavimento podem ser classificadas por dois tipos:

Deformações recuperáveis – São deslocamentos verticais que surgem na superfície de um pavimento ou no interior da sua estrutura quando é submetido a esforços, até um determinado limite de tolerância, em forma intermitente ou transitória permitindo que quando esses esforços cessam, o sistema retorna à sua posição anterior;

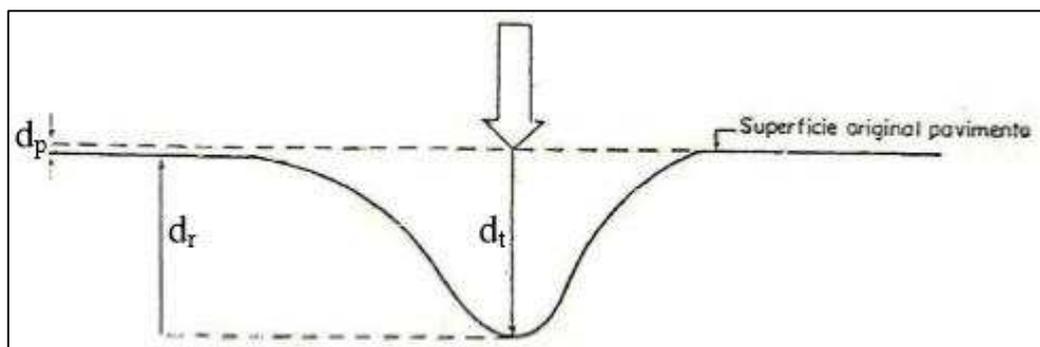
Deformações permanentes – Também conhecida como deformação plástica é a deformação que ocorre no material, tendo em vista a ação de uma carga, e que não é recuperável quando cessa o carregamento.

Ferreira (2006), representa esquematicamente por meio da figura 8, as deformações que um pavimento pode sofrer por ação de cargas:

- $d_t$  – Deformação total (seta para baixo - deformação produzida pela carga);
- $d_r$  – Deformação recuperável ou elástica (seta para cima até a superfície que se produz com a retirada da carga);
- $d_p$  – Deformação permanente (diferença entre a posição original da superfície antes de aplicar a carga e depois de retirada).

$$d_t = d_r + d_p \quad (3)$$

Figura 8: Deformação do pavimento na ação da carga.



Fonte: Ferreira (2006).

As falhas estruturais fundamentais dos pavimentos dependem das magnitudes e frequências das deformações recuperáveis e da acumulação das deformações permanentes.

Ferreira (2006, p. 2) define deflexão como a medida da resposta do conjunto “pavimento–subleito” sob a ação de uma carga. Consideram-se na prática rodoviária como “deflexões” as medidas das deformações recuperáveis do pavimento ( $d_p = 0$ ).

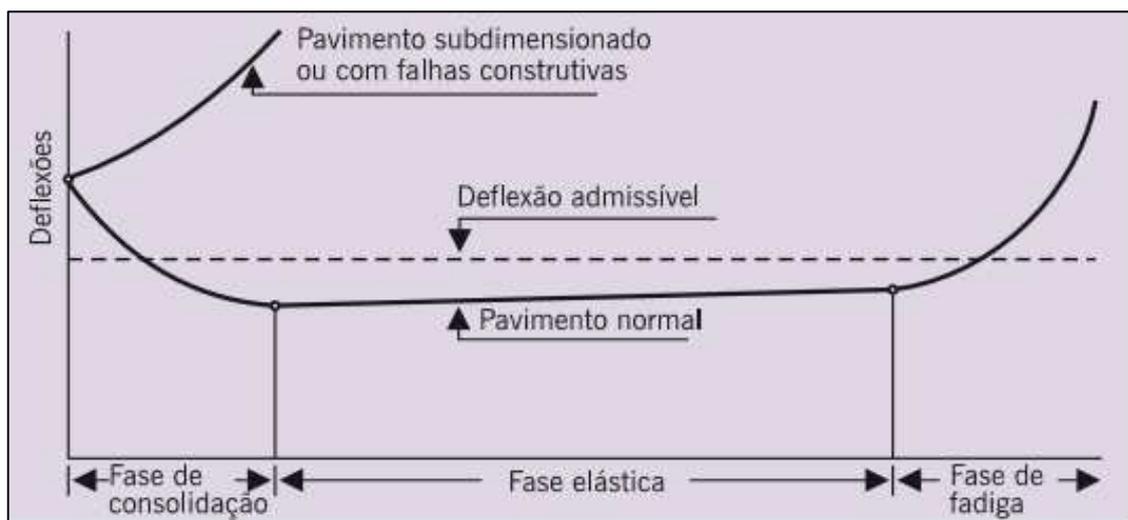
Essas medidas de deflexões servem para:

- Determinação da vida útil remanescente de um pavimento;
- Avaliação estrutural de um pavimento com vistas a um projeto para sua restauração;
- Estudo da estrutura mais apropriada para os projetos de alargamento de vias existentes;
- Avaliação dos diferentes métodos de projeto de um pavimento;
- Controle da qualidade estrutural de camadas em execução de obras novas;
- Determinar as condições de um pavimento ou uma rede rodoviária com vistas a uma política de conservação;
- Em certos casos, selecionar a carga por roda que pode ser permitida em períodos críticos em determinados setores (devido à chuva, degelo etc.).

Ferreira (2006, p. 2) então reforça que nos métodos empíricos as deflexões, convenientemente processadas, se relacionam com os valores admissíveis, enquanto que métodos mais modernos são baseados na teoria da elasticidade para ajustar os módulos elásticos das camadas estruturais e calibrar os instrumentos.

Considerando-se um pavimento satisfatoriamente projetado e bem construído, as evoluções do nível de deflexão durante a exposição às cargas e aos agentes de intemperismo envolvem a consideração das três fases distintas que se mostram na figura 9:

Figura 9: Fases da vida estrutural.



Fonte: DNER (1979).

Fazendo uma análise segundo a DNER PRO 010/79 sobre a Figura 9, tem-se:

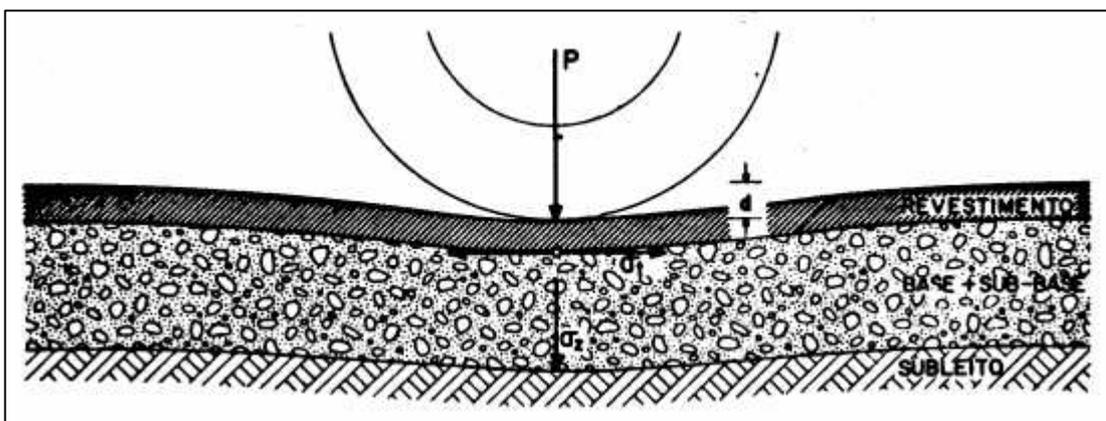
**Fase de Consolidação:** É a fase que sucede imediatamente à construção, sendo caracterizada por um decréscimo desacelerado do valor da deflexão, decorrente da consolidação adicional proporcionada pelo tráfego nas diversas camadas do pavimento. O valor da deflexão tende a se estabilizar ao fim desta primeira fase;

**Fase Elástica:** Fase que sucede à de consolidação e, ao longo da qual, o valor da deflexão do pavimento se mantém aproximadamente constante ou, na pior das hipóteses, cresce ligeiramente, se não houver influências sazonais. Essa fase define a vida útil do pavimento, tendendo a se alongar na medida da diferença verificada entre a deflexão admissível e a deflexão suportada pelo pavimento;

**Fase da Fadiga:** Fase que sucede à elástica, caracterizando-se por um crescimento acelerado do nível de deflexão do pavimento, na medida em que a estrutura começa a exteriorizar os efeitos da fadiga, representados por fissuras, trincas e acúmulos de deformações permanentes sob ação de cargas repetidas. Caso não sejam tomadas, em tempo hábil, medidas para a recuperação do pavimento, o processo de degradação tende a sofrer, nessa fase, aceleração marcante. Evidentemente, um pavimento flexível bem projetado será tanto melhor, técnica e economicamente, quanto mais longa for a sua fase elástica. A duração dessa última será influenciada pelo número de solicitações das cargas de roda incidentes sobre o pavimento, a cujos efeitos sobre a estrutura se somarão os decorrentes da ação dos agentes de intemperismo.

Ainda segundo a norma DNER PRO 010/79, o modo como as solicitações das cargas de roda atuam em um pavimento flexível, pode ser ilustrado conforme na figura 10, que representa, esquematicamente, um pavimento flexível, constituído de revestimento betuminoso, base e sub-base granulares, construído sobre um subleito suposto homogêneo. A ação de uma carga de roda,  $P$ , aplicada sobre a superfície da estrutura promoverá, na face inferior do revestimento, o desenvolvimento de uma tensão de tração  $\sigma_t$ , responsável pela decorrente deformação de tração  $\epsilon_t$ , e na superfície do subleito, uma pressão vertical  $\sigma_z$ .

Figura 10: Efeito da carga sobre o pavimento.



Fonte: DNER (1979).

A norma DNER PRO 010/79 (p. 3) reforça que admitindo-se que os materiais integrantes das camadas do pavimento atendam às especificações, no que concerne à respectiva resistência ao cisalhamento, a possibilidade de deformações plásticas, ou rupturas, restringir-se-á ao subleito. Tais rupturas são evitadas sempre que o valor da pressão vertical atuante,  $\sigma_t$ , for mantido abaixo do valor da pressão vertical admissível pelo material do subleito,  $\sigma_{adm}$ . Para garantir essa condição, o pavimento deve ter espessura igual ou superior à dimensionada, por exemplo, em função do ISC (Índice de Suporte Califórnia) do subleito.

A mesma norma reforça que, para o não surgimento de trincas no revestimento, é necessário manter a deflexão,  $d$ , abaixo de um valor máximo,  $d_{adm}$ , e o raio de curvatura,  $R$ , do pavimento, acima de um certo valor mínimo. Isto garante que a tensão de tração  $\sigma_t$ , correspondente à deformação  $\epsilon_t$ , na face inferior do revestimento, não ultrapasse um determinado valor, acima do qual o revestimento betuminoso romper-se-á por fadiga.

#### 4.6.8 Correções da deflexão de projeto

É muito importante depois de todas as aferições deflectométricas se atentar sobre fatores que podem interferir na veracidade dos dados obtidos, sobre possíveis interferências que possam surgir que de, certa forma, pode comprometer os dados do estudo. Então, em certas situações, as deflexões calculadas pela expressão (1) devem ser corrigidas conforme os efeitos de temperatura e sazonais:

##### 4.6.8.1 Correção por efeito da temperatura

Segundo Ferreira (2006, p. 8), as deflexões de um pavimento asfáltico em um mesmo ponto sofrem uma variação de acordo com a temperatura do pavimento no momento em que se realiza a leitura uma vez que a elasticidade de uma camada asfáltica sofre a influência direta da temperatura. Para eliminar a influência da temperatura se convertem as deflexões obtidas em diferentes temperaturas ( $D_t$ ) para uma deflexão equivalente à temperatura padrão de 20°C ( $D_{20^\circ C}$ ) pela expressão:

$$D_{20^\circ C} = \frac{D_t}{\{10^{-3} \cdot e^{.0001(t-20^\circ C)}\} + 1} \quad (4)$$

Onde:

$D_t$  = Deflexão recuperável medida na temperatura “ $t$ ” em  $\text{mm}^{-2}$ ;

$t$  = Temperatura em  $^{\circ}\text{C}$  medida no interior da camada de pavimento asfáltica;

$D_{20^{\circ}\text{C}}$  = Deflexão corrigida para a temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$e$  = Espessura da camada asfáltica em centímetros.

Segundo Ferreira (2006, p. 8), são consideráveis as diferenças das leituras deflectométricas feitas em temperaturas diferentes, em especial em capas mais espessas constituídas de massas asfálticas, tais como: CBUQ, PMUQ e PMF.

#### 4.6.8.2 Correção por efeito estacional

As deflexões variam com a época do ano de acordo com a variação do clima quando este tem marcadas diferenças pluviométricas que interferem diretamente na elevação do nível freático e na umidade dos materiais. Medidas de deflexão tomadas fora de períodos considerados como críticos (chuvosos) deverão ser corrigidos de acordo com fatores regionais. A correção pode ser feita apenas na deflexão característica resultante, mantendo os valores individuais de deflexão sem correção (DNER,1994).

Os cálculos aplicados ao presente trabalho estão devidamente deduzidos no Capítulo 6.

Segundo a DNER – PRO 011/94, a correção da deflexão característica devido a fatores sazonais é feita através da expressão 5:

$$D_{cc} = D_c \times F_s \quad (5)$$

Onde:

$D_{cc}$  = deflexão característica corrigida (ou DP = Deflexão de projeto), em 0,01 mm;

$D_c$  = deflexão característica obtida para a época do levantamento deflectométrico, em 0,01 mm;

$F_s$  = fator de correção sazonal.

Os valores sugeridos para o fator de correção sazonal ( $F_s$ ), de acordo com a norma DNER-PRO 011/79 são os indicados na tabela 3:

Tabela 3: Determinação do Fator Sazonal mediante alguns parâmetros.

Natureza do Subleito	Fator de Correção Sazonal - $F_s$	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,10 - 1,30	1,00
Argiloso e Sensível à Umidade	1,20 - 1,40	1,00

Fonte: DNER (1979).

#### 4.6.9 Deflexão Admissível ( $D_{adm}$ )

Segundo a DNER PRO-11/79 (p. 9), para que não surjam trincas no revestimento é necessário manter a deflexão do pavimento abaixo de um determinado valor ( $D_{adm}$ ), denominado deflexão admissível.

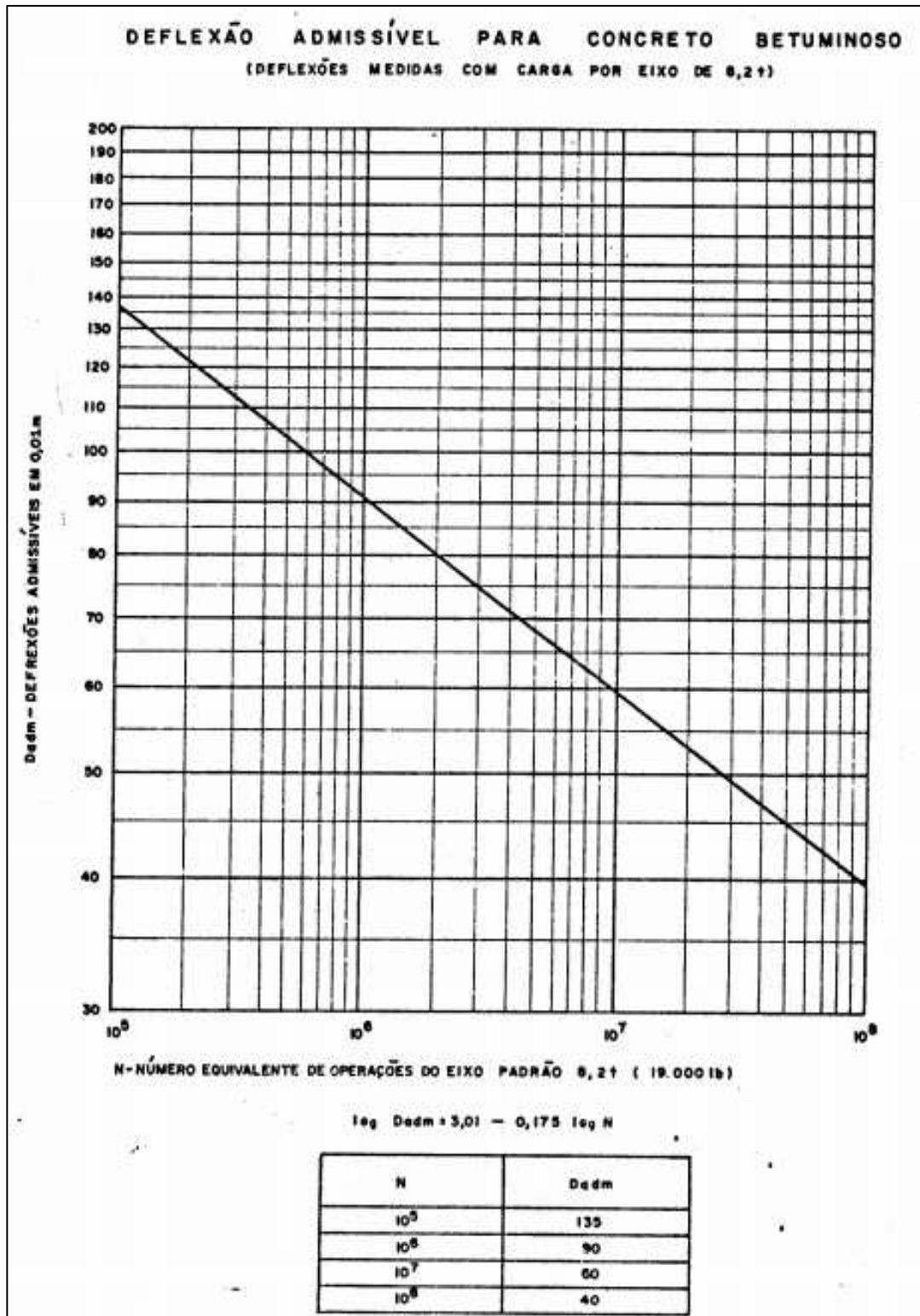
O valor da deflexão admissível depende dos materiais constituintes do revestimento e da base do pavimento, bem como do número  $N$  de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t.

Para pavimentos flexíveis, constituídos de revestimento de concreto betuminoso executado sobre base granular, o valor da deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) em 0,01 mm é dado pela seguinte expressão correspondente a deflexões medidas com a carga padrão de 8,2 t por eixo:

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

Esta expressão (6) está representada graficamente no ábaco da figura 11:

Figura 11: Ábaco para determinação da deflexão admissível para CB.



Fonte: DNER (1979).

Segundo a DNER PRO 011/79, para a avaliação de pavimento com revestimentos do tipo tratamento superficial, executados sobre base granular, deve ser adotada como deflexão admissível o dobro do valor obtido pela expressão e ábaco apresentados; se no caso for projetado um reforço com revestimento em CBUQ, a deflexão admissível será a correspondente a este material. Logo, para determinar a deflexão admissível a ser adotada em um determinado projeto de reforço de pavimento, o número N a ser utilizado é o correspondente às cargas por eixo a serem suportadas pelo reforço do pavimento, desde a liberação deste reforço ao tráfego até o final do período de projeto arbitrado para o reforço.

Os cálculos aplicados ao presente trabalho estão devidamente deduzidos no Capítulo 6.

#### **4.7 Critérios de Avaliação Estrutural dos Pavimentos**

Segundo a DNER-PRO 011/79, ainda não há critérios universalmente aceitos que possibilitem uma fácil tomada de posição com respeito à avaliação estrutural dos pavimentos. Necessita-se de normas rígidas que permitam definir com precisão, para o projeto de reforços de pavimentos existentes, a fronteira que separa os campos de aplicação dos critérios deflectométrico e de resistência.

Em tese, seria lícito aceitar-se que os métodos de projeto baseados no critério deflectométrico seriam válidos quando a estrutura subjacente ao reforço estivesse funcionando em regime aproximadamente elástico, em outras palavras, quando as cargas incidentes ocasionassem exclusivamente deformações de caráter transitório.

Por fim, a DNER PRO 011/79 propõe cinco casos típicos, na suposição de que a maioria das situações que ocorrem nos subtrechos homogêneos possa se enquadrar, aproximadamente, em uma das hipóteses formuladas. Para isto, consideram-se os seguintes parâmetros:

- N – número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t;
- Dp – deflexão de projeto ou Dcc – deflexão característica corrigida;
- R – raio de curvatura;
- Dadm – deflexão admissível;
- I.G.G. – índice de gravidade global.

Para o caso da deflexão de projeto, a extensão de cada segmento homogêneo é de 200m. Para cada uma das distribuições assim definidas, adota-se os procedimentos calculados pelas expressões 7, 8 e 9. Assim:

$$D = \frac{\sum Di}{n} \quad (7)$$

Onde:

$D$  = Média aritmética das deflexões máximas recuperáveis em  $\text{mm}^{-2}$  do segmento de trecho homogêneo;

$Di$  = Valores individuais das deflexões máximas recuperáveis em  $\text{mm}^{-2}$  do segmento de trecho homogêneo;

$n$  = Número de valores colhidos na amostra.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Di-D)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma$  = Desvio padrão da amostra.

$$Dc = D + \sigma \quad (9)$$

Onde:

$Dc$  = É o valor das deflexões características para cada uma das atribuições do segmento de trecho homogêneo.

De posse dessa deflexão característica ( $Dc$ ), tem-se então os dados suficientes para o cálculo das deflexões de projeto ( $Dp$ ), que é a mesma deflexão característica corrigida ( $Dcc$ ). A mesma é calculada conforme já apresentada na expressão (5). A partir dos cálculos desses parâmetros supracitados, é possível obter uma avaliação estrutural do pavimento, tendo como referência a tabela (4).

Tabela 4: Critérios para Avaliação Estrutural

Hipótese	Dados Deflectométricos obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG>180).	SIM	Resistência	Reconstrução

Fonte: DNER (1979).

## **5 MATERIAIS, MÉTODOS E DADOS DO ESTUDO**

Este trabalho trata de uma investigação sobre as vias asfaltadas do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), onde serão coletados dados funcionais e deflectométricos, baseando-se nas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

O trecho em estudo corresponde à via principal da UEMA Campus Paulo VI – Tirirical - São Luís/MA, onde trafegam veículos de passeio e ônibus, principalmente.

Recentemente, o Campus Paulo VI sofreu intervenção do Programa Mais Asfalto, consistindo de recapeamento e construção de vias, sendo interessante que se faça um estudo avaliativo das camadas de pavimento, no intuito de garantir longevidade e segurança de seus usuários.

### **5.1 Equipamentos**

No desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Viga Benkelman tradicional, com relação entre os braços de alavanca de 2:1;
- Caminhão basculante, tipo eixo simples de roda dupla;
- Balança Rodoviária;
- Extensômetro analógico;
- Prensa de ensaio CBR – Marshall;
- Termômetro Digital;

### **5.2 Métodos**

A metodologia empregada no desenvolvimento desse trabalho é composta pelos seguintes itens:

- Revisão bibliográfica;
- Montagem da viga Benkelman tradicional;
- Aferição da viga Benkelman tradicional em laboratório;
- Seleção do segmento viário onde serão medidas as deflexões;
- Determinação das bacias de deflexão e seus respectivos parâmetros em campo, utilizando a viga Benkelman tradicional;

- Análise dos resultados obtidos em laboratório e em campo;
- Redação da monografia;
- Carregamento e pesagem do caminhão.

### 5.2.1 Aferição da viga Benkelman

A norma DNER 175/94 – PRO estabelece que contratempos com a viga Benkelman (tradicional) significam qualquer ocorrência que possa ter afetado o seu perfeito funcionamento, como quedas, choques, etc., e para isso deve ser aferida constantemente. O processo de aferição, além de fixar as condições de aceitação ou rejeição do equipamento para uso em uma dada campanha de medições, permite determinar o valor da constante a ser adotado para o cálculo das deflexões, no caso da viga Benkelman tradicional.

Foi feito uso de uma prensa de ensaio CBR (Marshall), um extensômetro analógico para medição do deslocamento verticais da bandeja da prensa e um conjunto para fixação do extensômetro no tirante de aço da prensa.

A viga Benkelman tradicional foi submetida ao procedimento de aferição seguindo-se exclusivamente o que estabelece a norma DNER 175/94 – PRO, ou seja, avaliação das condições de uso da mesma para em campo determinar as bacias e seus parâmetros. Foram realizadas 2 (duas) aferições no mesmo dia, tendo como objetivo a melhor caracterização da constante de aferição e confiabilidade do processo (Figuras 12 e 13).

Figura 12: Processo de aferição da VB tradicional.



Fonte: O autor (2017).

Figura 13: Extensômetro analógico da viga.



Fonte: O autor (2017).

Os Apêndices A e B deste trabalho apresentam o processo detalhado de calibração da viga Benkelman tradicional.

O que se observou durante o processo de aferição da viga, foi a relação entre os deslocamentos ocorridos na bandeja da prensa e os deslocamentos registrados nos extensômetros da viga tradicional. A partir daí com a determinação da constante usada no cálculo das deflexões, verificou-se a aceitação ou não das vigas, baseando-se nos intervalos de confiança propostos pela a DNER 175/94 – PRO.

### 5.2.2 Segmento viário adotado e demarcação das estacas

O trecho experimental para levantamento das bacias de deflexão e seus parâmetros foi a principal das vias internas do Campus Paulo VI da UEMA (Figura 14), especificamente com início próximo ao prédio de Ciências Biológicas até o Hospital Veterinário em frente ao ponto final de ônibus, totalizando 1000 metros e com 50 estacas.

A via selecionada para estudo apresenta características urbanas em relação aos seguintes aspectos: geometria, tipos de veículos que circulam e velocidades operacionais, estrutura dos pavimentos. Além disso, foi considerada a segurança dos operadores, visto as medições ocorrerem dentro da área do campus.

A figura 14 apresenta o trecho de estudo dentro do Campus da UEMA:

Figura 14: Visão esquemática no Campus.



Fonte: Adaptado do Google Maps (2017).

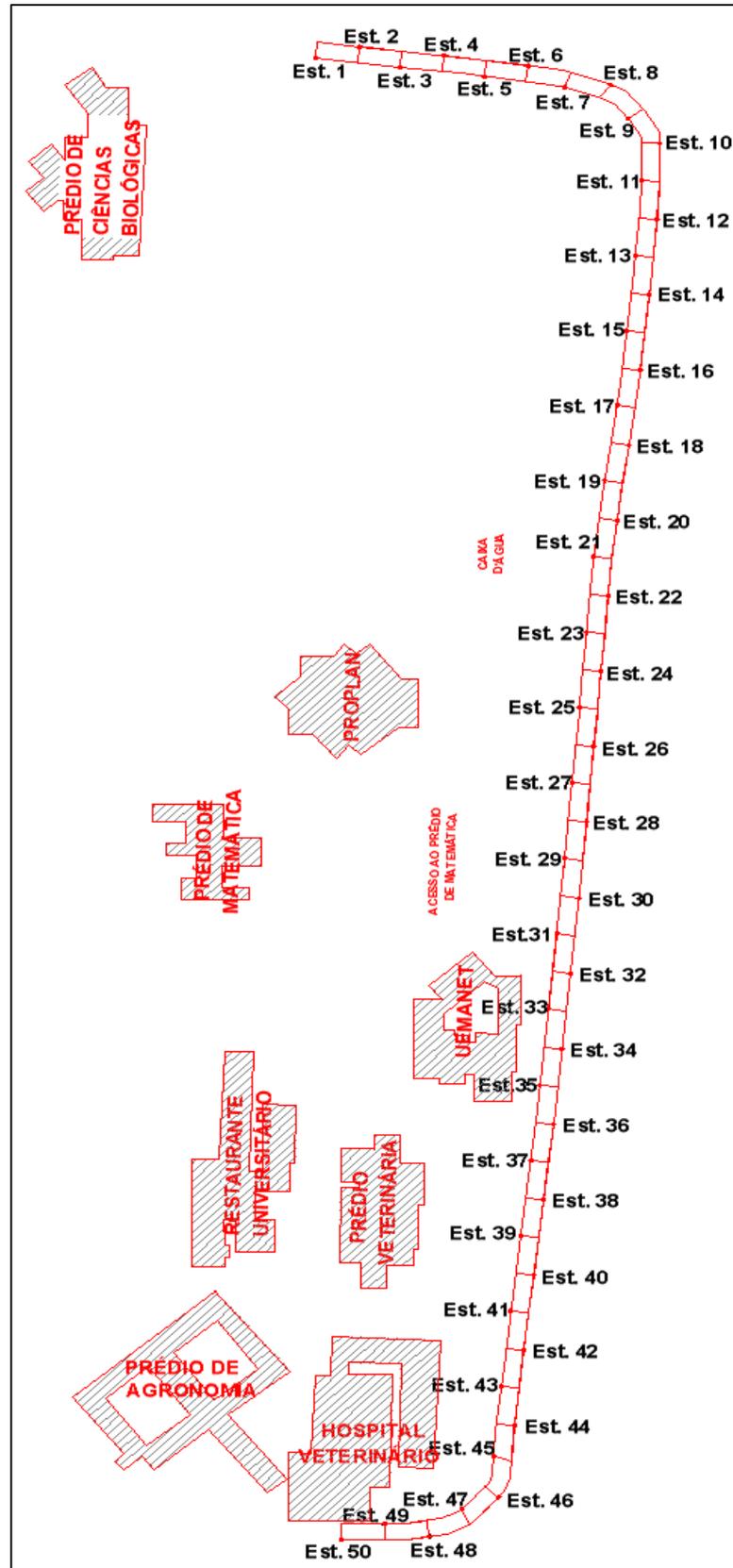
Já a figura 15 ilustra esquematicamente toda a extensão do trecho em estudo. A tabela 5 tem-se os pontos de referência de cada estaca:

Tabela 5: Pontos de referência de algumas estacas ao longo do trecho.

ESTACA	REFERÊNCIA
1	Início do trecho e próximo ao Prédio de Ciências Biológicas
9	Início da primeira curva acentuada a direita em frente aos containers
12	Estaca coincidente com o início do trecho estudado em 2014
21	Localizada em frente ao castelo d'água
23	Próximo ao acesso do estacionamento da PROPLAN
30	Próximo ao acesso ao prédio de Matemática
33	Calçada paralela as janelas do Prédio da UEMANET
36	Início da calçada de passeio de acesso ao Restaurante Universitário
41	Próximo ao acesso ao Restaurante Universitário
43	Próximo ao acesso ao Prédio de Medicina Veterinária
47	Início da segunda curva acentuada a direita em frente ao Centro de Zoonoses
50	Fim do trecho exatamente em frente a calçada do Hospital Veterinário

Fonte: O autor (2017).

Figura 15: Mapa esquemático do trecho em estudo - CAMPUS Paulo VI.



Fonte: O autor (2017).

O trecho selecionado possui largura média de 8,50 m e como já citado, a extensão dividida em 50 (cinquenta) estacas, início na estaca 1 e fim na estaca 50, selecionadas de acordo com a superfície de avaliação recomendadas na norma DNIT 006/2003 – PRO (rodovias simples, superfícies de avaliação localizadas a cada 20 m alternados em relação ao eixo da pista de rolamento, ou seja, 40 m em 40 m em relação a cada faixa de tráfego) e sobre as trilhas de roda externa conforme as normas nacionais para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis: DNER-ME 024/94.

Neste trabalho precisou-se de alguns instrumentos úteis na demarcação das estacas e das superfícies de avaliação (Figuras 16 e 17). Sendo eles: tinta, pincel, trena e com o auxílio de uma corda demarcada os 20 metros da estaca a fim de reduzir os erros na aferição, pois ela não sofre os efeitos do vento. Delimitou-se também, a linha de aplicação da carga em relação à borda do revestimento no valor de 0,90 m considerando a largura média da faixa de tráfego.

Figura 16: Demarções das estacas.



Fonte: o autor (2017).

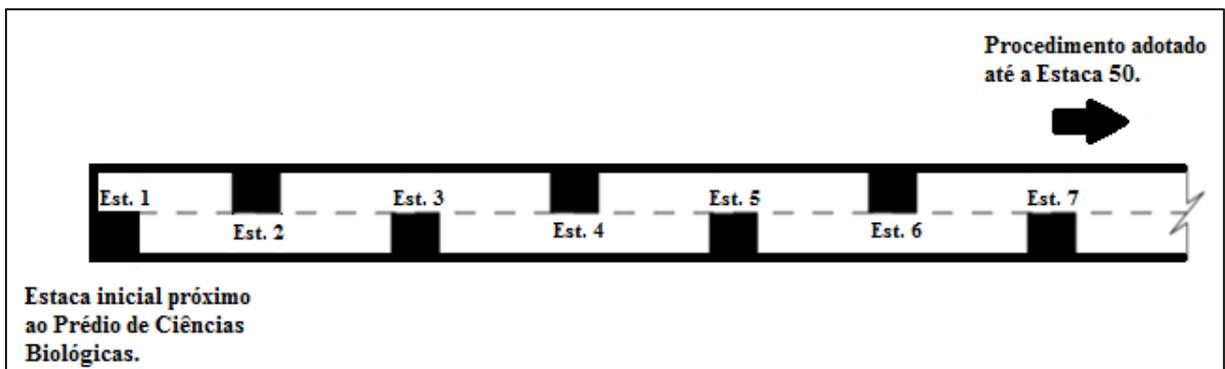
Figura 17: Estaca inicial demarcada.



Fonte: O autor (2017).

Esquemáticamente, a distribuição das estacas e estações ao longo do trecho foi ordenada como apresentado na Figura 18.

Figura 18: Desenho esquemático da distribuição intercalada das estacas.



Fonte: o autor (2017).

### 5.2.3 Carregamento e Pesagem do caminhão

No levantamento das deflexões foi utilizado um caminhão de modelo MERCEDES 1513 (Ano 1986). Seguindo-se a DNER 024/94 – ME, o caminhão utilizado deve possuir no eixo traseiro, uma carga uniforme distribuída de aproximadamente 8,2 toneladas, eixo traseiro simples de rodas duplas, pneus com dimensões 1000 x 20 e calibrados com 80 lb/pol<sup>2</sup>. Foi utilizada uma retroescavadeira para carregar o caminhão com material de fresagem de pavimento flexível colhido no galpão da empresa Aço Maranhão (Unidade Maiobão), e uma balança particular da própria empresa para pesar a carga por eixo traseiro do caminhão até que fosse alcançado o valor aproximado de 8,2 toneladas exigido pela norma. Conforme ilustra as figuras 19 e 20.

Figura 19: Carregamento da caçamba.



Fonte: O autor (2017).

Figura 20: Material fresado utilizado.



Fonte: O autor (2017).

Na pesagem do eixo traseiro do caminhão, foi realizada em uma balança particular da empresa AÇO MARANHÃO (Unidade Maiobão), cujo resultado de pesagem consta na Figura 21 desta, aproximadamente 8,16 tf alcançada mediante três tentativas.

Figura 21: Pesagem do eixo traseiro do caminhão.



Fonte: O autor (2017).

Figura 22: Valor do peso ilustrado.



Fonte: o autor (2017).

#### 5.2.4 Avaliação em campo

A equipe empenhada para realizar o levantamento deflectométrico foi basicamente constituída por: um motorista de caminhão, um operador de viga Benkelman, um professor com experiência com o equipamento, um auxiliar que também realizou o mesmo trabalho em outro trecho que tinha a função de preencher a planilha de campo e um auxiliar que aferia as medidas de temperatura no pavimento com um termômetro digital, como também auxiliava no balizamento do motorista do caminhão quanto ao seu correto posicionamento em relação às estacas de análise além de garantir a segurança operacional e verificação da posição dos pneus traseiros há uma distância de 90 centímetros da margem de tráfego.

No levantamento das deflexões em campo com a viga Benkelman tradicional, foi utilizada uma régua improvisada de extensão 1,50 metros e graduada de 25 em 25 centímetros para obter as leituras da bacia de deformação. O deslocamento do veículo de forma padronizada foi orientado por auxiliar para o deslocamento de 25 cm para o cálculo do raio de curvatura, ou sucessivos deslocamentos de 25 cm, para que se possa registrar a configuração da bacia deflectométrica, dando maior precisão ao ensaio.

Em todas as estacas foram determinadas as deflexões máximas recuperáveis do pavimento e algumas proporcionalmente espaçadas para a determinação do raio de curvatura e bacia de deflexão. Baseado na norma DNIT 133/10 – ME, segue no Apêndice C que trata do processo de execução do ensaio em campo com a viga Benkelman tradicional. Nas Figuras 18 a 23, são apresentados alguns registros da realização do ensaio com a viga Benkelman tradicional de acordo com a DNIT 133/10 – ME no trecho em estudo.

Figura 23: Regulagem do manípulo antes de aferir as leituras.



Fonte: O autor (2017).

Figura 24: Graduação das leituras inicial e intermediárias na estaca.



Fonte: o autor (2017)

Figura 25: Transporte da VB tradicional à estaca seguinte.



Fonte: o autor (2017).

Figura 26: Aferição da temperatura do pavimento na estaca selecionada.



Fonte: o autor (2017).

Figura 27: Acionamento do vibrador antes de medir a deflexão.



Fonte: o autor (2017).

Figura 28: Posicionamento da VB tradicional entre os pneus do caminhão.



Fonte: o autor (2017).

Ao final dos levantamentos de campo, os dados foram lançados em planilhas eletrônicas, onde foram calculadas com maior efetividade e confiabilidade as deflexões recuperáveis máximas, os raios de curvatura das estacas selecionadas e os traçados das bacias de deflexão.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Aferição da viga Benkelman

Segundo a DNER-PRO 175/94, na aferição da viga Benkelman tradicional, foram admitidos como intervalos de confiança os valores de  $\alpha i = 1,90$  e  $\beta i = 2,10$  já que se trata de uma viga com relação entre braços (a/b) de 2:1, conforme Tabela 6:

Tabela 6: Intervalos de confiança em função da relação entre os braços da viga.

Relação entre braços da viga (a/b)	Intervalo de confiança $\alpha i - \beta i$
2:1	1,90 - 2,10
3:1	2,85 - 3,15
4:1	3,80 - 4,20

Fonte: DNER (1994).

As leituras no extensômetro da viga foram organizadas na Tabela 7, obedecendo ao processo.

Tabela 7: Leituras no extensômetro da viga.

Leituras de Prensa Xpi (0,01 mm)	Leitura da viga Xvi (centésimos de mm)	
	1ª Determinação	2ª Determinação
0	0	0
10	4	4
20	7	7
30	10	10
40	15	14
50	20	19
60	26	25
70	31	30
80	36	34
100	46	45
120	55	52
140	65	63
160	75	75
180	81	78
200	85	85
220	99	99

Fonte: o autor (2017).

As relações entre as leituras ( $X_i$ ) lidas no extensômetro solidário à prensa ( $X_{pi}$ ) e as correspondentes lidas no extensômetro da viga ( $X_{vi}$ ), para as duas operações realizadas foram:

$$X_i = \frac{X_{pi}}{X_{vi}}$$

Tabela 8: Resultado das relações entre os extensômetros.

<b>Relação: <math>X_{pi}/X_{vi}</math></b>	
<b>1ª determinação</b>	<b>2ª determinação</b>
0,00	0,00
2,50	2,50
2,86	2,86
3,00	3,00
2,67	2,86
2,50	2,63
2,31	2,40
2,26	2,33
2,22	2,35
2,17	2,22
2,18	2,31
2,15	2,22
2,13	2,13
2,22	2,31
2,35	2,35
2,22	2,22

Fonte: o autor (2017).

Cálculo da média aritmética da relação:

$$X_m = \frac{\sum X_i}{N} ; X_m = 2,42$$

Onde:

$X_m$  – média aritmética;

$X_i$  – relações entre leituras;

$N$  – quantidade de leituras ( $N \geq 30$ ).

Cálculo do desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{N-1}}; \sigma = 0,265$$

Onde:

$\sigma$  – desvio padrão;

$X_m$  – média aritmética;

$X_i$  – relações entre leituras;

$N$  – quantidade de leituras.

Cálculo do desvio padrão da média:

$$\sigma(X_m) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \sigma(X_m) = 0,048$$

Onde:

$\sigma(X_m)$  – desvio padrão da média;

$\sigma$  – desvio padrão;

$N$  – quantidade de leituras ( $N \geq 30$ ).

Cálculo do erro de estimativa da média:

$$\varepsilon = 2,045 \times \sigma(X_m); \varepsilon = 0,099$$

Onde:

$\varepsilon$  – erro de estimativa da média;

$\sigma(X_m)$  – Desvio padrão da média;

Cálculo dos limites do intervalo de confiança da estimativa da média:

$$Li = Xm - \varepsilon; Li = 2,316$$

$$Ls = Xm + \varepsilon; Ls = 2,514$$

Onde:

$Ls$  – limite superior;

$Li$  – limite inferior;

$\varepsilon$  – erro de estimativa da média;

$Xm$  – desvio padrão da média.

Conforme critérios de aceitação ou rejeição apresentados na Tabela 9, a viga é aceita, estando de acordo com o CASO III:

Tabela 9: Critérios de aceitação e rejeição da viga.

<b>CASO I</b>	Se $Li \geq \alpha_i$ e $Ls \leq \beta_i$ a viga é aceita
<b>CASO II</b>	Se $Li < \alpha_i$ e $Ls > \beta_i$ a viga é rejeitada
<b>CASO III</b>	Se $[(Li > \alpha_i \text{ e } Ls > \beta_i) \text{ ou } (Li < \alpha_i \text{ e } Ls < \beta_i)]$ mas $Es < (\beta_i - \alpha_i)/2$ a viga é aceita
<b>CASO IV</b>	Se $[(Li > \alpha_i \text{ e } Ls > \beta_i) \text{ ou } (Li < \alpha_i \text{ e } Ls < \beta_i)]$ mas $Es \geq (\beta_i - \alpha_i)/2$ a viga é rejeitada

Fonte: DNER (1994).

Como a viga foi aceita e está de acordo com o caso III, a constante (K) a ser adotada para o cálculo das medidas de deflexões segue o exposto na Tabela 10.

Tabela 10: Critérios de cálculo da constante da viga.

<b>CASO I</b>	$K = \alpha_i + (\beta_i - \alpha_i)/2$
<b>CASO III</b>	$K = Xm$

Fonte: DNER (1994).

Sendo assim, para este estudo o  $K = 2,42$ .

Na aferição da viga Benkelman tradicional, foi produzida uma planilha eletrônica para avaliação da aceitação ou rejeição da mesma além da determinação do valor da constante a ser adotado no cálculo das deflexões. A opção objetivou melhorar processo, rapidez no tempo de cálculo, precisão e confiabilidade nos valores apresentados, servindo como certificação documental (Anexo 1) de aprovação ou rejeição da mesma em laboratório.

## **6.2 Avaliação em campo da viga Benkelman**

Inicialmente foram aferidas as temperaturas em cada estaca ao longo do trecho, conforme ilustra a tabela 11. Posteriormente, foram aferidas as deflexões máximas recuperáveis, intermediárias e final nas estacas selecionadas (Est. 10, Est. 20, Est. 30, Est. 40 e Est. 50) para o traçado das bacias deflectométricas conforme ilustra as tabelas 12 a 16 e gráficos 1 a 5, respectivamente. Em seguida, tem-se as deflexões máximas e as corrigidas por efeito da temperatura em cada estaca ao longo do trecho conforme ilustra a tabela 17 e o raio de curvatura nas estacas selecionadas conforme ilustra a tabela 18. Ao final tem-se os valores obtidos das deflexões de projeto a partir das deflexões máximas corrigidas, que segundo os critérios da DNER PRO 011/79, foram devidamente avaliadas quanto a sua qualidade estrutural conforme ilustra as tabelas 19 e 20.

O Anexo 1 apresenta a planilha desenvolvida para o levantamento deflectométrico utilizando a viga Benkelman tradicional e preenchida com os valores das deflexões, raio de curvatura e características físicas de cada estaca em análise.

Tabela 11: Temperatura da superfície do revestimento.

ESTACA	Temperatura do Pav. (°C)	ESTACA	Temperatura do Pav. (°C)
1	36	26	48
2	42,5	27	50
3	43	28	49
4	46	29	50
5	48	30	41
6	45	31	45
7	39	32	38
8	43	33	46
9	41	34	47
10	41	35	46
11	43	36	44
12	46	37	43
13	43	38	45
14	46	39	48
15	43	40	45
16	42	41	43
17	45	42	51
18	44	43	51
19	49	44	47
20	50	45	47
21	47	46	50
22	44	47	45
23	46	48	43
24	49	49	52
25	44	50	35

Fonte: o autor (2017).

Para as temperaturas apresentadas na tabela 11, obteve-se uma média aritmética igual a 45,09 °C, caracterizando assim uma temperatura bastante elevada. Segundo Ferreira (2006, p. 8) a temperatura elevada, em casos de pavimentos antigos, o pavimento tende a produzir deformações plásticas que faz a mistura asfáltica fluir entre os pneus duplos do caminhão de prova, alterando o valor real da medida. Logo, para pavimentos novos não há incidência dessas ações.

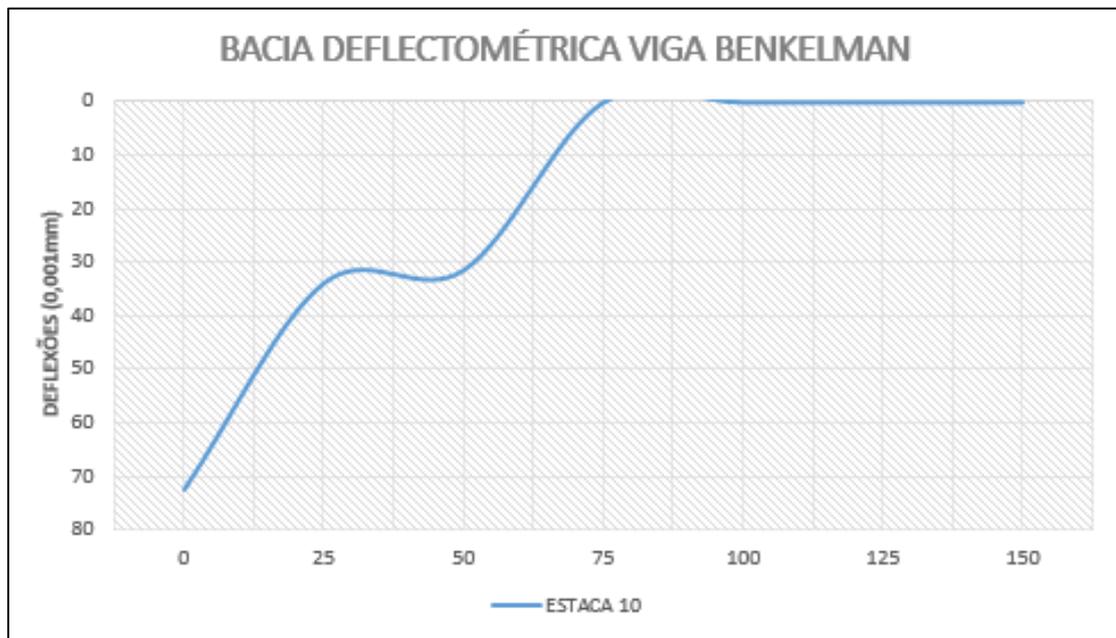
Os gráficos 1 a 5 cujas abscissas são os pontos das leituras (d0, d25, d50, d75, d100, d125, d150 e df) e ordenadas, são as deflexões (em centésimos de mm), apresentam um comparativo do comportamento da deformada definida pela viga Benkelman tradicional em estacas selecionadas. Os gráficos foram obtidos a partir das tabelas 12 a 16.

Tabela 12: Deflexões da bacia de deformação na estaca 10.

ESTACA 10			
	DISTÂNCIA (cm)	VIGA (mm)	DEFLEXÃO (0,01mm)
L0	0	1,31	72,45
L25	25	1,15	33,81
L50	50	1,14	31,40
L75	75	1,01	0,00
L100	100	1,01	0,00
L125	125	1,01	0,00
L150	150	1,01	0,00
Lf	1000	1,01	0
K	2,42		

Fonte: o autor (2017).

Gráfico 1: Bacia deflectométrica da estaca 10.



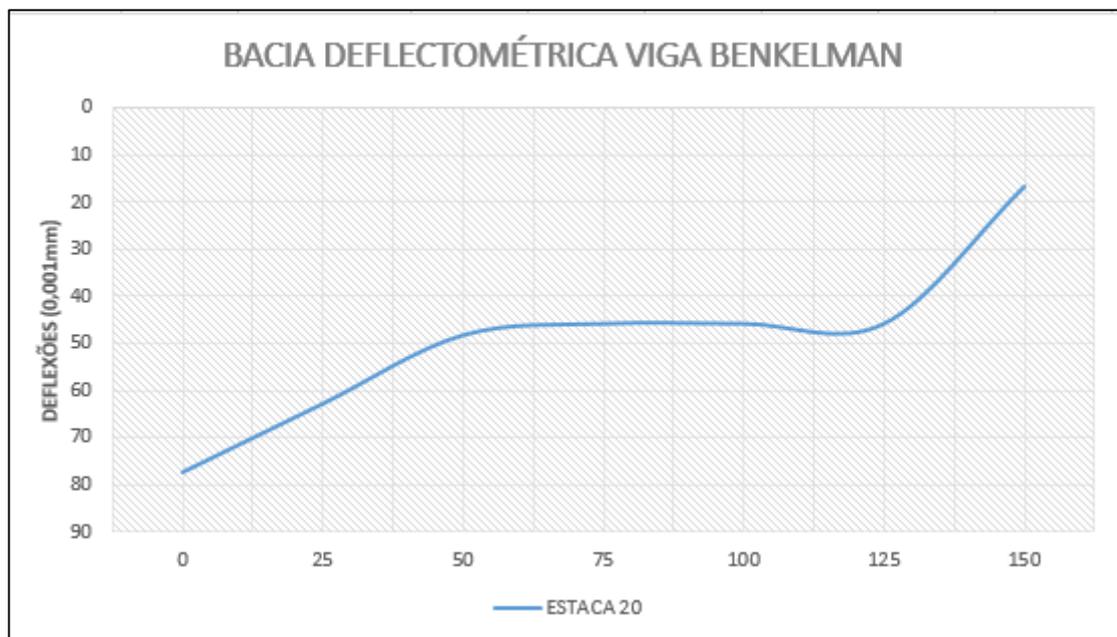
Fonte: O autor (2017).

Tabela 13: Deflexões da bacia de deformação na estaca 20.

ESTACA 20			
	DISTÂNCIA (cm)	VIGA (mm)	DEFLEXÃO (0,01mm)
L0	0	0,55	77,28
L25	25	0,49	62,79
L50	50	0,43	48,30
L75	75	0,42	45,89
L100	100	0,42	45,89
L125	125	0,42	45,89
L150	150	0,3	16,91
Lf	1000	0,23	0
K	2,42		

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 2: Bacia deflectométrica da estaca 20.



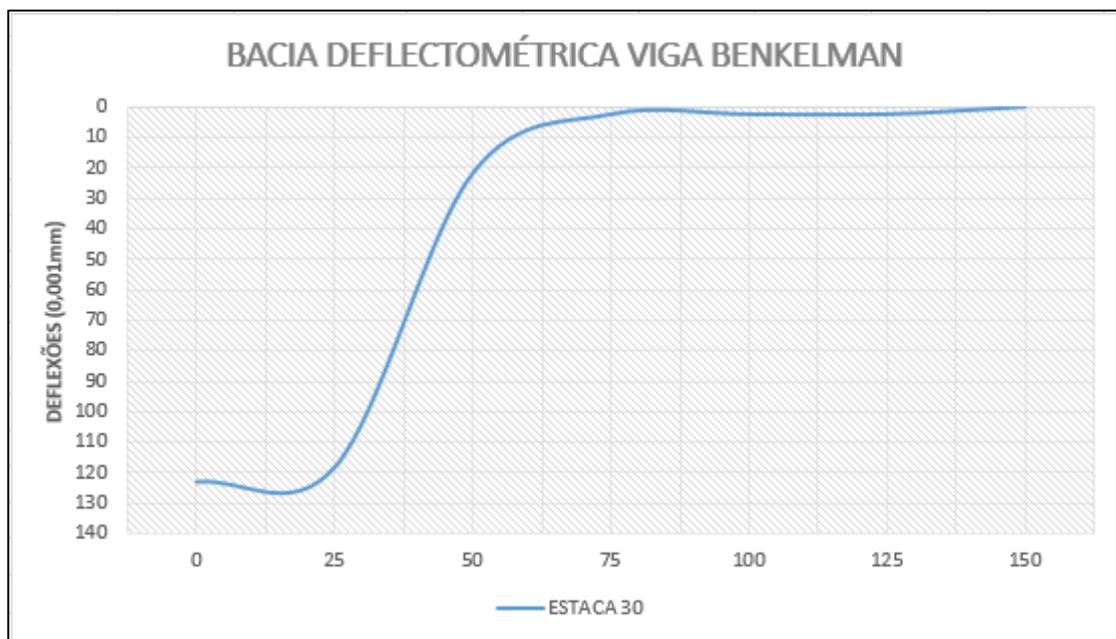
Fonte: o autor (2017).

Tabela 14: Deflexões da bacia de deformação na estaca 30.

ESTACA 30			
	DISTÂNCIA (cm)	VIGA (mm)	DEFLEXÃO (0,01mm)
L0	0	0,52	123,17
L25	25	0,5	118,34
L50	50	0,1	21,74
L75	75	0,02	2,42
L100	100	0,02	2,42
L125	125	0,02	2,42
L150	150	0,01	0,00
Lf	1000	0,01	0
K	2,42		

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 3: Bacia deflectométrica da estaca 30.



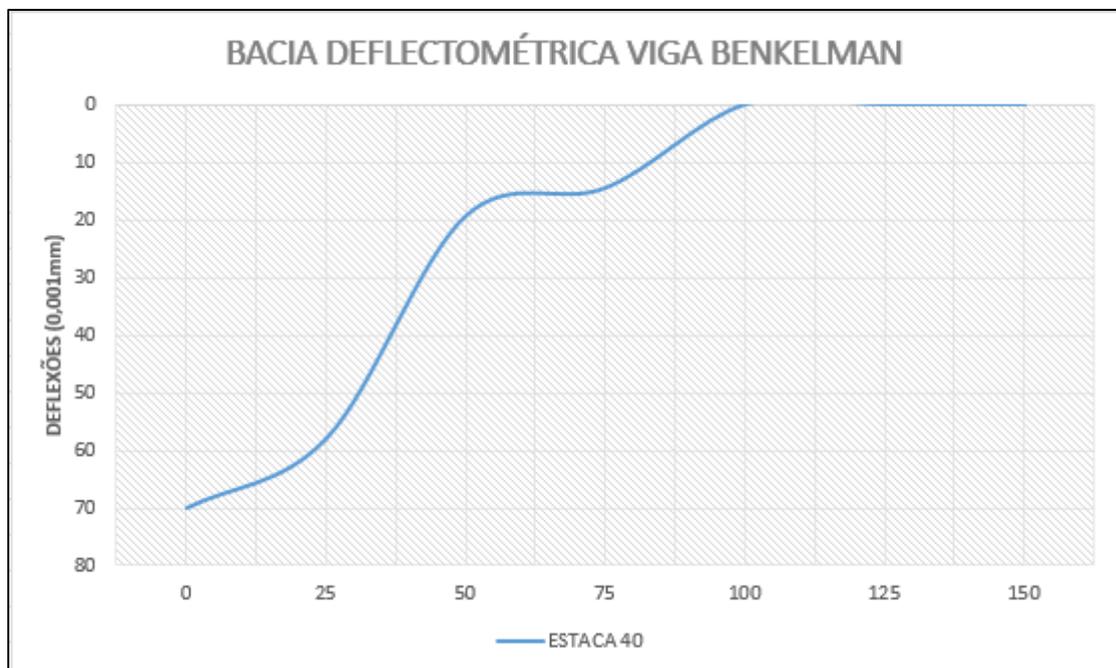
Fonte: O autor (2017).

Tabela 15: Deflexões da bacia de deformação na estaca 40.

ESTACA 40			
	DISTÂNCIA (cm)	VIGA (mm)	DEFLEXÃO (0,01mm)
L0	0	1,42	70,04
L25	25	1,37	57,96
L50	50	1,21	19,32
L75	75	1,19	14,49
L100	100	1,13	0,00
L125	125	1,13	0,00
L150	150	1,13	0,00
Lf	1000	1,13	0
K	2,42		

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 4: Bacia deflectométrica da estaca 40.



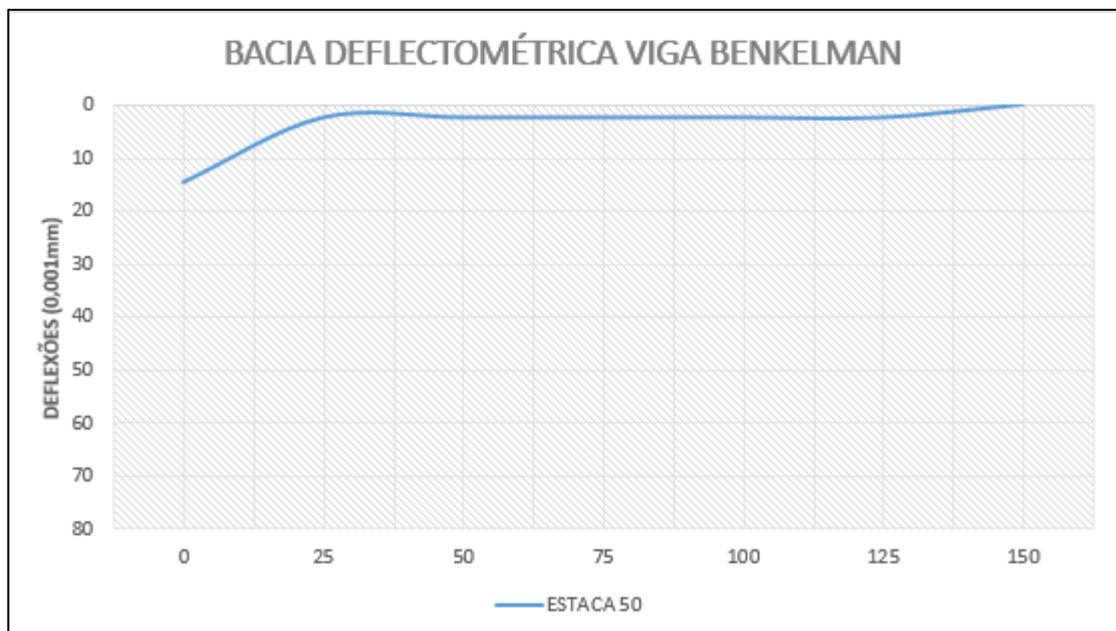
Fonte: O autor (2017).

Tabela 16: Deflexões da bacia de deformação na estaca 50.

ESTACA 50			
	DISTÂNCIA (cm)	VIGA (mm)	DEFLEXÃO (0,01mm)
L0	0	1,35	14,49
L25	25	1,3	2,42
L50	50	1,3	2,42
L75	75	1,3	2,42
L100	100	1,3	2,42
L125	125	1,3	2,42
L150	150	1,29	0,00
Lf	1000	1,29	0
K	2,42		

Fonte: o autor (2017).

Gráfico 5: Bacia deflectométrica da estaca 50.



Fonte: o autor (2017).

A opção por esses comprimentos de leituras intermediárias foi devido ao motivo de que após testes iniciais foi percebido que após 150 cm distante da leitura inicial, o cursor do extensômetro não sofria qualquer variação, logo seria desnecessário essa aferição até os 300 cm. Como foi adotado 150 cm como a leitura intermediária final, foi decidido incluir a leitura no ponto em 125 cm para melhor delineamento da deformada. As recomendações que segue na norma DNER 061/94, em certos casos no campo são necessários ajustes para melhor entendimento dos dados e otimização dos resultados.

A Tabela 17 apresenta os valores de deflexões máximas determinadas em cada estaca de ensaio com o emprego do equipamento e as corrigidas segundo FERREIRA (2006):

Tabela 17: Deflexões máximas e corrigidas por efeito da temperatura.

Estaca	Deflexão Máxima (x10 <sup>-2</sup> mm)	Deflexão Máxima Corrigida por efeito da Temperatura (D20°C)	Estaca	Deflexão Máxima (x10 <sup>-2</sup> mm)	Deflexão Máxima Corrigida por efeito da Temperatura (D20°C)
1	48,30	46,08	26	48,30	44,55
2	7,25	6,79	27	45,89	42,10
3	79,70	74,55	28	48,30	44,43
4	65,21	60,49	29	12,08	11,08
5	53,13	49,01	30	123,17	115,87
6	48,30	44,93	31	45,89	42,68
7	62,79	59,4	32	89,36	84,78
8	62,79	58,73	33	47,34	43,91
9	57,96	54,52	34	65,21	60,32
10	72,45	68,15	35	7,25	6,73
11	47,09	44,05	36	77,28	72,08
12	94,19	87,37	37	60,38	56,48
13	44,68	41,79	38	65,21	60,66
14	70,04	64,97	39	60,38	55,70
15	50,72	47,44	40	70,04	65,15
16	33,81	31,71	41	74,87	70,03
17	7,25	6,74	42	65,21	59,66
18	50,72	47,31	43	57,96	53,02
19	16,91	15,55	44	33,81	31,27
20	77,28	70,89	45	31,40	29,04
21	72,45	67,02	46	48,30	44,31
22	42,26	39,42	47	31,40	29,20
23	55,55	51,53	48	33,81	31,62
24	28,98	26,66	49	41,06	37,46
25	38,64	36,04	50	14,49	13,86

Fonte: O autor (2017).

A Tabela 18 apresenta os valores dos raios de curvatura determinados para cada estaca selecionada:

Tabela 18: Raios de curvatura das estacas selecionadas.

ESTACA	R (m)
10	500
20	187,5
30	62,5
40	156,25
50	156,25

Fonte: O autor (2017).

Em reabilitação de pavimentos, as soluções seriam fortemente influenciadas, visto que as normas atuais de manutenção utilizam o raio de curvatura como critério de cálculo. Para a DNER 011/79 – PRO, por exemplo, grandes raios de curvatura associam pavimentos em bom estado estrutural necessitando apenas de correções superficiais, enquanto raios pequenos indicam pavimentos danificados sob o ponto de vista estrutural devendo-se fazer reforço ou construção. Retomando a realidade do presente trabalho, o pavimento localizado na estaca 10 caracteriza ter um bom estado estrutural, ao contrário da estaca 30 que apresenta baixo valor do raio de curvatura, logo está em um estado crítico estruturalmente tendo como base as demais.

### 6.3 Cálculo dos parâmetros de avaliação estrutural

Para resolução da expressão (5) deve-se determinar o Fator de Correção Sazonal (Fs) de acordo com a estação e da natureza do subleito. Então, segundo pesquisas sobre a predominância do solo existente na região da Cidade Operária, região onde se encontra o Campus Paulo IV – UEMA, o solo é arenoso e permeável.

Como o ensaio foi realizado no mês de junho, onde se caracteriza como um mês de transição entre as estações seca e chuvosa. Como é perceptível a queda brusca do índice de chuvas tendo como base o mês de maio (bastante chuvoso), foi estipulado o mês de junho como sendo de estação seca, haja vista, a temperatura média do pavimento demonstrou-se elevado. Assim, segundo a Tabela (3), o fator adotado será  $F_s = 1,20$ .

Para a expressão (6) adota-se  $N = 10^5$  (Tráfego Leve), haja vista o trecho da via adotada predomina o tráfego somente de veículos de passeio, ônibus eixo simples roda dupla e biarticulados, liberados para trânsito de segunda a sábado. O tráfego só não seria leve se trafegasse caminhões e demais veículos de carga. Assim:

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

$$D_{adm} = 10^{(3,01 - 0,176 \times \log 10^5)}$$

$$D_{adm} = 134,89 \cong 135.$$

Daí, mediante este resultado, o critério de qualidade obedece o que ilustra na tabela (4). Então, com o auxílio de uma planilha eletrônica, tem-se os cálculos resumidos na tabela 19:

Tabela 19: Critérios de avaliação por trecho homogêneo.

CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
TRECHO	Dc (x 10 <sup>-2</sup> mm)	Dp (x 10 <sup>-2</sup> mm)	Rc (m)	Fs
Est.1 à Est.10	75,56	90,67	500	1,2
Est.11 à Est.20	75,76	90,91	187,5	
Est.21 à Est.30	81,29	97,55	62,5	<b>Dadm</b>
Est.31 à Est.40	81,05	97,26	156,25	<b>135</b>
Est.41 à Est.50	61,53	73,84	156,25	

Fonte: O autor (2017).

Tabela 20: Classificação das estacas segundo os critérios de avaliação estrutural.

TRECHO	QUALIDADE ESTRUTURAL	MEDIDAS CORRETIVAS
Est.1 à Est.10	BOA	Apenas correções de superfície
Est.11 à Est.20	BOA	
Est.21 à Est.30	REGULAR PARA MÁ	Reforço ou Reconstrução
Est.31 à Est.40	BOA	Apenas correções de superfície
Est.41 à Est.50	BOA	

Fonte: Adaptado DNER (1979).

#### 6.4 Avaliação comparativa entre medidas de deflexões

Em 2014 foi realizado um trabalho semelhante de levantamento deflectométrico por Gonçalves e, portanto, busca-se uma correspondência das estacas entre os trabalhos são aproximados.

A tabela 21 ilustra o comparativo entre medidas de deflexões no mesmo trecho em períodos distintos (2014 e 2017). Na tabela, o que está grafado em vermelho caracteriza uma desvantagem das medidas de deflexão de 2017 em relação a 2014, pois elas obtiveram valores menores. Segmentos estes do trecho que se encontram críticos. Ressalta-se que a estaca 1, do estudo de 2014, é coincidente com a estaca 12, do estudo de 2017, conforme ilustra a figura 32.

Tabela 21: Comparativo entre deflexões aferidas em 2014 e 2017.

Resultados de 2014		Resultados de 2017	
Estaca	Deflexão Máxima ( $\times 10^{-2}$ mm)	Estaca	Deflexão Máxima ( $\times 10^{-2}$ mm)
1	56,12	12	94,19
2	53,68	13	44,68
3	70,76	14	70,04
4	65,88	15	50,72
5	61,00	16	33,81
6	65,88	17	7,25
7	70,76	18	50,72
8	58,56	19	16,91
9	51,24	20	77,28
10	65,68	21	72,45
11	41,48	22	42,26
12	36,60	23	55,55
13	53,68	24	28,98
14	70,76	25	38,64
15	65,88	26	48,30
16	53,68	27	45,89
17	63,44	28	48,30
18	65,88	29	12,08
19	48,80	30	123,17
20	65,88	31	45,89
21	58,56	32	89,36
22	58,56	33	47,34
23	75,64	34	65,21
24	68,32	35	7,25
25	63,44	36	77,28

Fonte: O autor (2017).

A média aritmética dos valores colhidos no ano de 2014 é de 60,41 ( $\times 10^{-2}$  mm) e com desvio padrão de 9,40. Já no ano de 2017 a média é de 51,74 ( $\times 10^{-2}$  mm) e com desvio padrão de 27,83. Com esse desvio ratifica um grau maior de oscilação em comparação com a média dos valores do conjunto. Verifica-se que em 2017 o trecho em análise foi fresado e recapeado com CBUQ, logo era esperado que os valores de deflexões fossem menores do que outrora com o pavimento antigo em 2014, quando o revestimento apresentava visualmente diversas patologias que interferem diretamente no aumento dos valores dessas deflexões.

### 6.5 Avaliação Comparativa entre raios de curvatura

Conforme os critérios de correspondência de estacas entre os trabalhos (2014 e 2017), a tabela 22 ilustra o comparativo entre medidas dos raios de curvatura no mesmo trecho. Na tabela, o que está grafado em vermelho caracteriza uma desvantagem das medidas dos raios de curvatura de 2017 em relação a 2014, pois em um caso foi obtido valor menor. Segmento este do trecho que se encontra crítico.

Tabela 22: Comparativo entre os raios de curvatura em 2014 e 2017.

RAIOS DE CURVATURA EM 2014		RAIOS DE CURVATURA EM 2017	
ESTACA	R (m)	ESTACA	R (m)
1	183	10	500
10	116	20	187,5
15	99	30	62,5
20	116	40	156,25
25	85	50	156,25

Fonte: O autor (2017).

Segundo Schmitt (2002, p. 93), a confiabilidade das deflexões medidas com a viga é influenciada por diversos fatores, o que gera a afirmação de que a deflexão máxima não consegue por si só explicar o comportamento estrutural e a distribuição de tensões no interior do pavimento.

Como elemento complementar nas análises dos levantamentos com a viga Benkelman, o cálculo do raio de curvatura, indica a capacidade do pavimento em distribuir as tensões das cargas de tráfego.

Diante disso, fazendo alusão aos dados colhidos por Gonçalves (2014), verifica-se que apenas à estaca 30 apresentou valor inferior ao do presente trabalho, logo ratifica a ideia de que

nesse segmento de trecho é necessário a adição de reforço ou reconstrução, caso não tenham ocorrido distorções no levantamento da medição imputadas ao equipamento ou na operação de medida. O raio de curvatura com baixo valor indica um arqueamento severo da bacia de deformação, revelando uma condição estrutural crítica. O que se espera para qualquer estrutura de pavimento é que o raio de curvatura seja maior ou igual a 100 metros segundo critérios previstos na DNER – PRO 011/79. A equivalência das estacas dos dois trabalhos, apontadas na tabela 22, são aproximadas.

Segundo Ferreira (2006, p. 15), é muito importante entender o significado dos raios de curvatura pois de acordo com seus valores, associados com os valores de deflexão correspondentes, se pode estabelecer diversas conclusões com respeito à qualidade das camadas que constituem um pavimento que esteja sendo analisado. Em princípio as grandes deflexões poderiam estar simplesmente sendo produzidas por deficiências de qualidade das camadas inferiores do pavimento, em especial do subleito. Mas nem sempre é isso que acontece e a situação fica mais clara quando se avalia em conjunto a deflexão com o grau de curvatura, mais ou menos de acordo com os seguintes casos:

- Baixas deflexões e grandes raios de curvatura: Pavimento em bom estado, tanto as camadas superiores como os inferiores estarão correspondendo às expectativas de qualidade se a deflexão superficial está atendendo o valor máximo admissível;
- Baixas deflexões e pequenos raios de curvatura: Provavelmente a camada superior estará com qualidade deficiente (granulometria, grau de compactação, CBR, etc.). Em princípio o problema não se concentra nas camadas inferiores porque as deflexões são baixas mas o caso requer uma investigação mais cuidadosa;
- Altas deflexões e grandes raios de curvatura: Em princípio o caso significa grandes deflexões no subleito que é onde deve estar concentrado o problema de falta de qualidade de materiais ou umidade excessiva, independentemente da qualidade dos materiais das camadas superiores que podem ter qualidade satisfatória ou não;
- Altas deflexões e pequenos raios de curvatura: Pavimento totalmente condenável, não cumprirá com as condições de qualidade tanto nas capas superiores como inferiores, está construído com materiais inadequados e/ou as camadas foram deficientemente compactadas, e/ou as condições de drenagem são insatisfatórias.

## **6.6 Classificação estrutural considerando apenas a deflexão máxima**

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 452), a ordem de grandeza das deflexões dos pavimentos asfálticos varia muito com as características da estrutura, o tipo de revestimento, o nível de trincamento, as condições climáticas etc. Mas, como o valor típico pode-se indicar de 30 a 50 ( $\times 10^{-2}$  mm) para um pavimento com revestimento de concreto asfáltico e base granular em boa condição estrutural, e da ordem de 80 ( $\times 10^{-2}$  mm) para um pavimento com revestimento

de tratamento superficial. A estrutura do pavimento em estudo teve um recapeamento de CBUQ e tem base granular (laterita).

A tabela 23 aponta o nível de qualidade estrutural de cada estaca, onde os valores de deflexões que alcançaram valor máximo de  $50 (x10^{-2} \text{ mm})$  estão em “BOA CONDIÇÃO” e os que se apresentaram acima disso estão em “CONDIÇÃO NÃO ADEQUADA” segundo os parâmetros supracitados.

Tabela 23: Classificação estrutural de cada estaca.

Estaca	Deflexão Máxima ( $x10^{-2} \text{ mm}$ )	Estaca	Deflexão Máxima ( $x10^{-2} \text{ mm}$ )
1	Boa condição	26	Boa condição
2	Boa condição	27	Boa condição
3	Condição não adequada	28	Boa condição
4	Condição não adequada	29	Boa condição
5	Condição não adequada	30	Condição não adequada
6	Boa condição	31	Boa condição
7	Condição não adequada	32	Condição não adequada
8	Condição não adequada	33	Boa condição
9	Condição não adequada	34	Condição não adequada
10	Condição não adequada	35	Boa condição
11	Boa condição	36	Condição não adequada
12	Condição não adequada	37	Condição não adequada
13	Boa condição	38	Condição não adequada
14	Condição não adequada	39	Condição não adequada
15	Condição não adequada	40	Condição não adequada
16	Boa condição	41	Condição não adequada
17	Boa condição	42	Condição não adequada
18	Condição não adequada	43	Condição não adequada
19	Boa condição	44	Boa condição
20	Condição não adequada	45	Boa condição
21	Condição não adequada	46	Boa condição
22	Boa condição	47	Boa condição
23	Condição não adequada	48	Boa condição
24	Boa condição	49	Boa condição
25	Boa condição	50	Boa condição

Fonte: O autor (2017).

Já a tabela 24 apresenta a classificação estrutural das estacas segundo os raios de curvatura. Os valores abaixo de 100m estão em má condição, acima disso estão em boa condição segundo a DNER – PRO 011/79.

Tabela 24: Raios de curvatura das estacas selecionadas.

ESTACA	R (m)
10	BOA CONDIÇÃO
20	BOA CONDIÇÃO
30	MÁ CONDIÇÃO
40	BOA CONDIÇÃO
50	BOA CONDIÇÃO

Fonte: O autor (2017).

Como em ambas as análises, a estaca 30 apresenta esse estado crítico. Logo, quase trinta dias após a realização do ensaio, mediante levantamentos visuais do trecho em estudo, verificou-se o surgimento de panela nas proximidades desta estaca, de severidade significativa. As demais estacas que apresentaram as mesmas condições, já também sofrem com o surgimento dessas patologias, porém ainda em amplitudes bem pequenas, podendo no futuro se tornarem maiores. As figuras 24 a 26, materializam a classificação de algumas estacas ou segmentos, resultado deste trabalho.

Figura 29: Patologia eminente próximo à estaca 30.



Fonte: O autor (2017).

Figura 30: Painha próxima à estaca 30 já atingindo a camada de base.



Fonte: O autor (2017).

Já as demais estacas que se mostraram críticas estruturalmente, não apresentam patologias com esse patamar. Estão gradativamente evoluindo de magnitude. Em grande parte, painhas.

Figura 31: Surgimento de pequenas patologias na estaca 12.

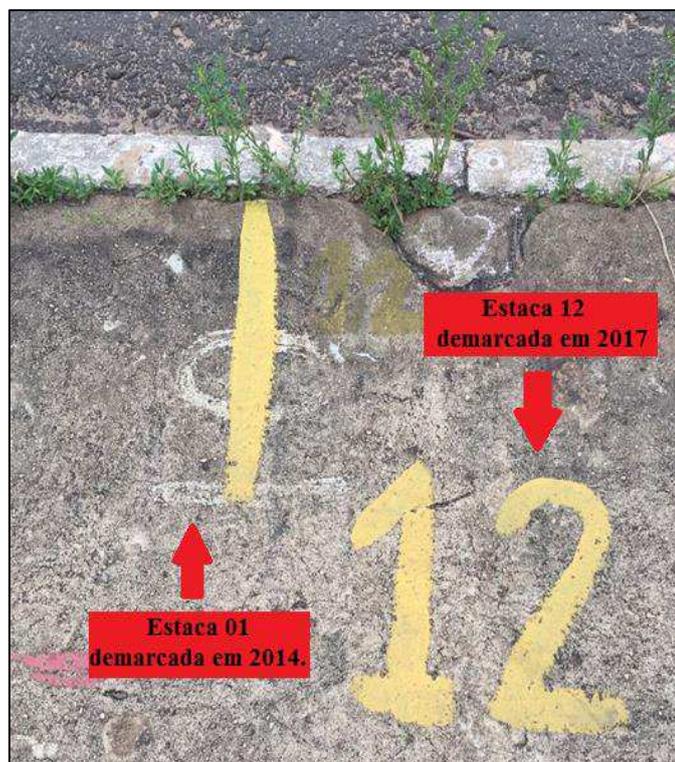


Fonte: O autor (2017)

O anexo 2 deste trabalho apresenta um relatório fotográfico retratando o aparecimento de defeitos superficiais de pequena magnitude, em geral panelas. As imagens registradas são dos trechos correspondentes as estacas que apresentaram condição não adequada, segundo a tabela 23.

Conforme foi comparado valores de deflexões de 2017 com 2014 na figura 21. Assim, segundo a figura 32 tem-se a comprovação de que a primeira estaca do trecho em 2017 é coincidente com a de 2014:

Figura 32: Coincidência entre as demarcações das estacas.



Fonte: O autor (2017)

Mesmo em virtude dessa superposição, verificou-se que a medida que foram demarcadas as seguintes estacas, foram havendo pequenas divergências na posição entre as estacas igualmente espaçadas de 20 em 20 metros. Também, não seria possível coincidir os mesmos pontos de aplicação da ponta de prova. Então, o ensaio baseou-se na região de influência da estaca. Contudo, o estudo comparativo fornece dados e conclusões aproximadas.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões relevantes

O trecho em estudo do Campus Paulo VI – UEMA, avaliado as condições superficiais nos dias 04 de junho de 2017 e 01 de julho de 2017, apresentou alguns defeitos superficiais (painelas e fendas) de pequena magnitude. Já a estaca 30 apresentou uma condição mais crítica do trecho. Em geral, a via tem boas condições de superfície, porém em alguns meses poderá apresentar problemas maiores, prejudicando a serventia e diminuindo a segurança dos usuários. Porém, a avaliação estrutural através da viga Benkelman resultou em deflexões máximas com alto desvio padrão e raios de curvatura altos, apresentando uma boa qualidade estrutural em 50% das estacas.

Se por um lado obteve-se resultados abaixo de  $10 \text{ mm}^{-2}$ , por outro lado apresentaram-se resultados acima de  $50 \text{ mm}^{-2}$ . Em particular à estaca 30 que fugiu grotescamente desse parâmetro, tanto em relação a deflexão máxima elevada quanto ao raio de curvatura que se apresentou muito baixo. Caracterizando assim como um segmento de trecho crítico estruturalmente, onde semanas após a realização do ensaio, começou a apresentar a patologia mais comum: a panela. No qual, necessita-se de cuidado e reparos no trecho.

A curva deflectométrica não obteve continuidade de forma a se comportar como um arco de parábola com concavidade voltada para baixo, reduzindo gradativamente os valores das deflexões mediante o veículo se afasta do ponto de aplicação da ponta de prova da viga. Acredita-se que devido as oscilações e da morosidade do relógio comparador analógico.

Segundo a tabela 4, as estacas 10, 20, 40 e 50 apresentaram qualidade estrutural “bom”, onde não há necessidade de estudos complementares, não há também critério para cálculo de reforço e no futuro precisaria de apenas correções de superfície. Já a estaca 30 apresenta “má” qualidade estrutural, necessitando de estudos complementares, onde o critério de resistência será usado para o cálculo do reforço e as medidas corretivas serão o reforço ou reconstrução do segmento de trecho.

Na análise comparativa entre as deflexões máximas medidas com intervalo de três anos, cerca de 32% dos valores de deflexão do trecho em 2017 foram superiores aos valores de 2014, o que pode ser explicado pela oscilação dos valores lidos no extensômetro da viga, ou mesmo

o comprometimento das camadas inferiores do pavimento, que não foram alvo da recuperação asfáltica realizada na UEMA.

A proposta de correção do pavimento em estudo serve apenas para orientação do projetista quanto a uma solução do que pode ser executado, no qual terá que elaborar um projeto detalhado dos materiais e formas de execução.

## **7.2 Sugestões para próximos trabalhos**

Sugere-se o uso da viga Benkelman eletrônica para uma avaliação das vias pavimentadas do Campus Paulo VI, possibilitando de modo rápido o levantamento das deformadas de todas as estacas de cada uma das vias.

De posse de várias deformadas, sugere-se a obtenção das espessuras e materiais das camadas do pavimento das vias para possibilitar a aplicação da retroanálise, ou seja, determinar de modo aproximado, o módulo de resiliência das camadas do pavimento, utilizando softwares computacionais para cálculo de deslocamentos do revestimento.

## REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B. et al. **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 de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- BRASIL. Departamento de Estradas de Rodagem. DER/SP IP-DE-P00/001: **Instrução de Projeto – Projeto de pavimentação**. São Paulo, 2006.
- BRASIL. Departamento de Estradas de Rodagem. DER/SP IP-DE-P00/003: **Instrução de Projeto – Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimento**. São Paulo, 2006.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 010/79 – PRO: **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis: Procedimento A**. Rio de Janeiro, 1979.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 011/79 – PRO: **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis: Procedimento B**. Rio de Janeiro, 1979.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 024/94 – ME: **Determinação das deflexões pela viga Benkelman: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 061/94 – ME: **Pavimento – Delineamento das Linha de Influência Longitudinal de Bacia de Deformação por Intermédio de viga Benkelman: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 175/94 – PRO: **Aferição de Viga Benkelman: procedimento**. Rio de Janeiro, 1994.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 005/2003 – TER: **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos: Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 006/2003 – PRO: **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos: procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 007/2003 – PRO: **Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos: procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 009/2003 – PRO: **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos: procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 133/2010 – ME: **Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Conservação Rodoviária*. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR-710, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Pesquisa CNT de Rodovias, 2006: **Atlas do Transporte**. 1º ed. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/Paginas/atlas-do-transporte> >. Acesso em: 05 de jul. 2017.

FERREIRA, Eng. Clovis Madruga. **Trabalhando com viga Benkelman**. 2006. 30 pág. – Porto Alegre, 2006.

GONÇALVES, Thasso Colins. **Avaliação de desempenho da Viga Benkelman tradicional e eletrônica na medição de bacias deflectométricas**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, 2014.

MARQUESINI, Diovani Remor. **Avaliação funcional e estrutural de um segmento da rua minas gerais no município de Tunciras do Oeste - PR**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

MIRANDA, Lídia Pacheco. **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza**. 2013. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

NUNES, Rarison Possidônio. **Avaliação estrutural do pavimento flexível com utilização da viga Benkelman e parâmetros da bacia deflectométrica**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Título de especialista em Engenharia Geotécnica) – Universidade da Cidade de São Paulo, 2015.

SCHMITT, Cristiane Viera. **Desempenho de um pavimento flexível solicitado por simulador de tráfego**. 2002. Trabalho de Pós Graduação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A

### Montagem da viga Benkelman tradicional

A montagem da Viga Benkelman tradicional é bastante simples e segue as seguintes etapas:

- Fixar a base de apoio ao braço menor da viga e apertar os parafusos;
- Fixar o manípulo na extremidade do braço menor da viga e apertar os parafusos;
- Conectar por parafusos o braço maior, que contém a ponta de prova da viga, ao braço menor formando uma alavanca interfixa;
- Encaixar a trava de proteção na parte superior do equipamento;
- O vibrador já é fixo ao equipamento movido energizado por duas pilhas;
- Fixar o extensômetro (analógico ou digital) na viga;

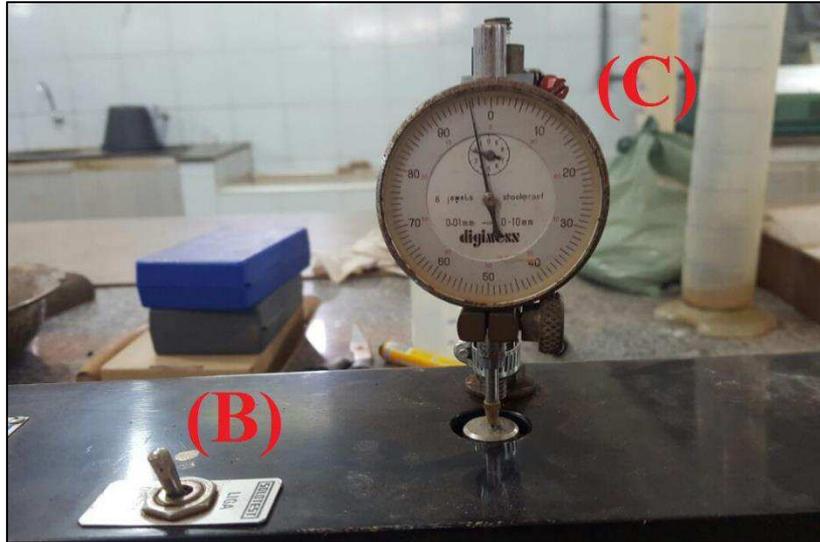
Ao fim da montagem, certificar que os parafusos e manípulo estejam todos devidamente apertados. Segue a viga Benkelman tradicional montada com suas respectivas partes:

Figura 33: Viga Benkelman tradicional.



Fonte: Gonçalves (2014).

Figura 34: Visão ampliada do vibrador e extensômetro analógico.



Fonte: O autor (2017).

Onde:

- (a) Manípulo, suporte ou pé traseiro;
- (b) Vibrador;
- (c) Extensômetro ou Relógio Comparador;
- (d) Braço menor;
- (e) Trava de proteção;
- (f) Base de apoio ou pés dianteiros;
- (g) Braço maior;
- (h) Ponta de prova.

## APÊNDICE B

### Calibração da viga Benkelman tradicional

Segundo a norma DNER – PRO 175/94, o processo de aferição da viga Benkelman tradicional consiste em:

- Montagem e posicionamento da viga em uma bancada;
- Apoiar a ponta do extensômetro digital (ou analógico) no prato da prensa e zerar o mesmo (bancada e prato da prensa em nível);
- Apoiar a ponta de prova da viga no centro do prato da prensa, para receber os movimentos verticais do conjunto de articulação.

Figura 35: Apoio da ponta de prova e extensômetro no prato da prensa.



Fonte: O autor (2017).

- Liberação da trava de proteção da viga;
- Acionamento do vibrador da mesma, evitando eventuais inibições do ponteiro do extensômetro;
- Ajustamento do extensômetro na viga;

- Acionamento da manivela da prensa a uma velocidade de 0,5mm/min, realizando as leituras no extensômetro digital posicionado na prensa a cada 0,1 até 0,8 mm, e a cada 0,2 até 2,2 mm, num total de 15 leituras feitas para cada aferição. Fazendo as leituras correspondentes do extensômetro conectado à viga.

Figura 36: Acionamento da manivela da prensa.



Fonte: O autor (2017).

## APÊNDICE C

### Operação da viga Benkelman tradicional

A operação da viga Benkelman tradicional segue o estabelecido pela norma DNIT ME 133/2010 cujas etapas estão descritas:

- Com as estações de ensaio demarcadas, posicionar a roda traseira dupla do veículo de prova a uma distância prefixada da borda do revestimento de acordo com a Tabela 2 segundo as normas DNER 024/94 - ME e DNIT 133/2010 – ME. O eixo de carga do caminhão deve ficar perpendicular ao eixo da pista de rolamento;
- Introduzir a ponta de prova da viga Benkelman tradicional no meio da roda dupla direita, colocando-a sobre o ponto selecionado;

Figura 37: Posicionamento do caminhão e da VB tradicional na pista.



Fonte: O autor (2017).

- Instalar na superfície do pavimento, ao lado da cabine e em posição bem visível pelo motorista ou do balizador, marcadores espaçados de 25 centímetros, totalizando 1,50 metros de comprimento nas estacas selecionadas;

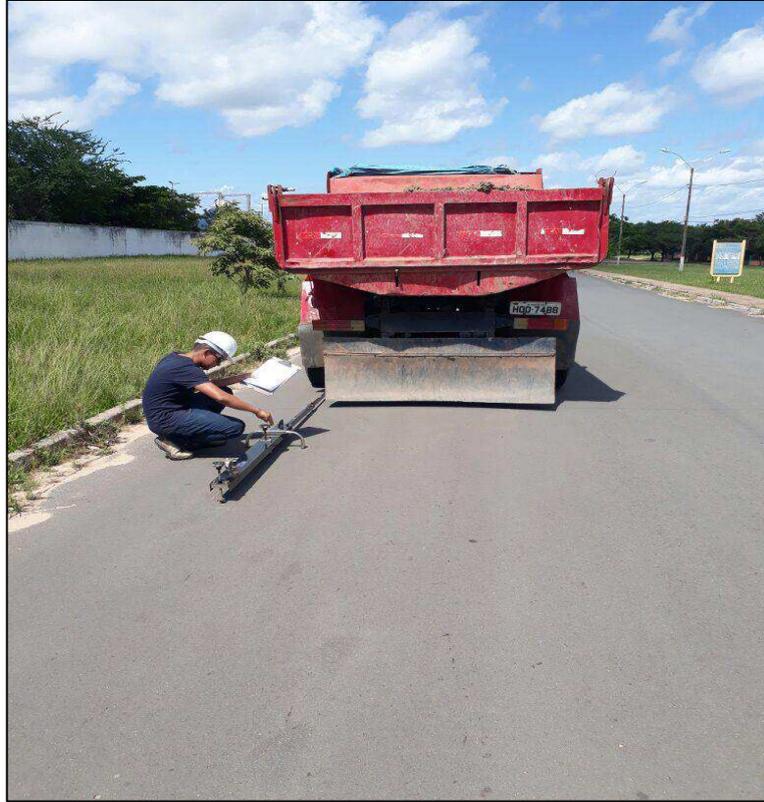
Figura 38: Marcos de referência feito a giz.



Fonte: O autor (2017).

- Soltar a trava da viga Benkelman;

Figura 39: Liberação da trava de proteção da viga.



Fonte: O autor (2017).

- Ajustar o pé traseiro da viga, de modo que o extensômetro fique, aproximadamente, na metade de seu curso. Ligar o vibrador e fazer a leitura inicial ( $L_0$ ) quando o extensômetro indicar movimento igual ou menor que 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 (três) minutos;

Figura 40: Leitura inicial (L0).



Fonte: O autor (2017).

- Para fazer as leituras intermediárias, deslocar o caminhão lentamente para frente até que a sua referência atinja as proximidades da primeira divisão ressaltada, ou seja, a 25 cm. Com o caminhão parado e o vibrador ligado, efetuar a primeira leitura intermediária, isto é, a leitura quando o extensômetro indicar movimento igual ou inferior a 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 (três) minutos, anotando também a distância correspondente ao deslocamento da referência do caminhão sobre a graduação demarcada com precisão de cm. Proceder da mesma maneira para obter as outras leituras intermediárias, isto é, as leituras 25, 50, 75, 100, 125 e 150 cm;

Figura 41: Leituras intermediárias (Li) e final (Lf).

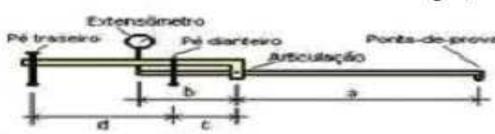


Fonte: O autor (2017).

- Após realizar todas as leituras nos pontos determinados de 1,50 m, deslocar o caminhão lentamente, de tal forma que o eixo simples com rodas duplas atinja a distância total de 10 metros a partir do ponto inicial. De preferência, fazer a leitura final (Lf) quando o extensômetro digital indicar movimento igual ou menor que 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 (três) minutos.

**ANEXOS**

## ANEXO A – PLANILHA DE AFERIÇÃO DA VB TRADICIONAL.

 <b>AFERIÇÃO DE VIGA BENKELMAN - MÉTODO DNER-PRO 175/94</b>				
<i>CERTIFICADO DE AFERIÇÃO</i>				
Viga n°.	UNICA		N° patrim.:	Lotação: LSP
Responsável pela aferição: FELIPE CASTRO				
Leitura de Prensa $X_{pi}$ (0,01 mm)	Leitura da viga $X_{vi}$ (centímetros de mm)		Relação: $X_{pi}/X_{vi}$	
	1° determinação	2° determinação	1° determinação	2° determinação
0	0	0	0,00	0,00
10	4	4	2,50	2,50
20	7	7	2,86	2,86
30	10	10	3,00	3,00
40	15	14	2,67	2,86
50	20	19	2,50	2,63
60	26	25	2,31	2,40
70	31	30	2,26	2,33
80	36	34	2,22	2,35
100	46	45	2,17	2,22
120	55	52	2,18	2,31
140	65	63	2,15	2,22
160	75	75	2,13	2,13
180	81	78	2,22	2,31
200	85	85	2,35	2,35
220	99	99	2,22	2,22
E STATISTICA				
Média Geral - $X_m =$		2,42		
Desvio Padrão - $D_p =$		0,265		
D. padrão da Média - $D_p (X_m) =$		0,048		
Erro de estimativa da Média - $E_s =$		0,099		
Limite inferior do intervalo de confiança da média - $L_i =$			2,316	
Limite superior do intervalo de confiança da média - $L_s =$			2,514	
			$(B_i - A_i)/2 =$ 0,100	
INTERVALO DE CONFIANÇA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS BRAÇOS DA VIGA	Relação entre braços da viga a'b		Intervalo de Confiança	
			Maior que $A_i$	Menor que $B_i$
	2:1		1,90	2,10
	3:1		2,85	3,15
4:1		3,80	4,20	
Intervalo de confiança considerado			1,90	2,10
CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO				
CASO I - Se $L_i \geq A_i$ e $L_s \leq B_i$ a viga é aceita				
CASO II - Se $L_i < A_i$ e $L_s > B_i$ a viga é rejeitada				
CASO III - Se $[(L_i > A_i \text{ e } L_s > B_i) \text{ ou } (L_i < A_i \text{ e } L_s < B_i)]$ mas $E_s < (B_i - A_i)/2$ a viga é aceita				
CASO IV - Se $[(L_i > A_i \text{ e } L_s > B_i) \text{ ou } (L_i < A_i \text{ e } L_s < B_i)]$ mas $E_s \geq (B_i - A_i)/2$ a viga é rejeitada				
RESULTADO DA AFERIÇÃO				
Aceitação/ Rejeição		CASO III		VIGA ACEITA
Constante para o cálculo das deflexões:		2,42		
Relação entre os braços da viga:		1 : 2		
Dimensões da Viga (em cm)			OBS:	
			a =	246
			b =	123
			c =	25
			d =	75

Fonte: O autor (2017).

## ANEXO B - RELATÓRIO FOTOGRÁFICO ACERCA DOS DEFEITOS DE SUPERFÍCIE.

Figura 42: Ilustração de pequenas panelas no trecho.



Fonte: O autor (2017).

Figura 43: Painela de aproximadamente 9cm.



Fonte: O autor (2017).

Figura 44: Painela preenchida com sedimentos de intempérie.



Fonte: O autor (2017).

Figura 45: Panela rente à estaca 30 e do ponto de ônibus da calçada da PROPLAN.



Fonte: O autor (2017).

Figura 46: Mesma panela rente à estaca 30 e ao prédio da UEMANET.



Fonte: O autor (2017).