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

IGOR MARCELO SILVA BRANDÃO

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DAS VIAS INTERNAS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA PAULO VI DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO UTILIZANDO A VIGA BENKELMAN

São Luís

2017

IGOR MARCELO SILVA BRANDÃO

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DAS VIAS INTERNAS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA PAULO VI DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO UTILIZANDO A VIGA BENKELMAN

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Thasso Colins Gonçalves

São Luís

2017

Brandão, Igor Marcelo Silva.
Avaliação estrutural do pavimento asfáltico das vias internas da cidade universitária Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão utilizando a viga Benkelman / Igor Marcelo Silva Brandão. – São Luís, 2017.
98 f.

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

Orientador: Prof. Thasso Colins Gonçalves.

1. Avaliação estrutural. 2. Deflexão. 3. Pavimento flexível. 4. Viga Benkelman. I. Título.

CDU 624.072.222:625.85(812.1)

IGOR MARCELO SILVA BRANDÃO

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DAS VIAS INTERNAS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA PAULO VI DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO UTILIZANDO A VIGA BENKELMAN

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ___ /___ / ___

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Thasso Colins Gonçalves (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

_____

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana
Universidade Estadual do Maranhão

_____

Prof.ª Dr.ª Maria Teresinha de Medeiros Coelho
Universidade Estadual do Maranhão

Aos meus pais, Hilton e Irisvanda, por todo amor, apoio e pela oportunidade de alcançar este sonho. Aos meus irmãos, Juliana, Ticiana, e Leandro, pela confiança e carinho nos momentos difíceis desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me guiou e me permitiu conquistar a tão sonhada graduação.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, que ao longo destes cinco anos sempre foram solícitos, dispostos a compartilhar conhecimentos essenciais para minha formação.

Ao professor Thasso Colins Gonçalves, por ter orientado este trabalho com sabedoria e dedicação.

A professora Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho, por todo apoio e orientação durante toda a pesquisa.

A irmã Juliana Brandão, pelo incentivo para a realização deste trabalho.

Ao amigo George Augusto, pelo auxílio na realização desta pesquisa.

Aos amigos da Faculdade, pelo carinho, companheirismo e por todos os momentos de alegria e de superação, que vencemos juntos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse estudo.

RESUMO

No Brasil, o modal rodoviário tem sido há anos a principal escolha para o transporte de pessoas e bens, além de ser o principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte contribuindo expressivamente para o desenvolvimento socioeconômico do país. O intenso tráfego, o clima, os métodos construtivos e as características físicas dos materiais utilizados na construção dos pavimentos podem causar alterações funcionais e estruturais nos mesmos, como deformações reversíveis e permanentes. Levando em consideração a existência de sobrecarga diária no pavimento, oriunda do intenso tráfego existente, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a condição estrutural do pavimento asfáltico de vias internas da cidade universitária Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) utilizando a viga Benkelman, com o intuito de medir e avaliar as deformações elásticas na superfície do pavimento. Para avaliação estrutural foi utilizado ensaio por método não-destrutivo por meio da viga Benkelman, que utiliza carregamento quase-estático. Os resultados obtidos foram comparados e analisados conforme as normas DNER 010/79 - PRO – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A e DNER 011/79 – PRO – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B, para avaliar as deflexões no pavimento asfáltico. Assim pode-se observar que os trechos recapeados e construídos recentemente apresentaram baixas deflexões e estão em boas condições de tráfego. Já o trecho degradado e que não sofreu intervenções apresentou altas deflexões e necessita de medidas corretivas.

Palavras-chave: Avaliação Estrutural. Deflexão. Pavimento flexível. Viga Benkelman.

ABSTRACT

In Brazil, road transport has for years been the main choice for transportation of people and products, as well as being the main responsible for the integration of the entire transportation system, contributing significantly to the socioeconomic development of the country. The intense traffic, climate, construction methods and physical characteristics of the materials used in the construction of pavements can cause functional and structural changes in them, such as reversible and permanent deformations. Objective with this work is to evaluate the structural condition of the asphaltic pavement of the Paulo VI university city of the State University of Maranhão (UEMA), using the Benkelman beam, with the purpose of measuring and evaluating the elastic deformations on the pavement surface. To a structural evaluation, a non-destructive test using the Benkelman beam, which uses quasi-static loading, was used. The results obtained were compared and analyzed according to DNER 010/79 - PRO - Structural Evaluation of Flexible Pavements - Procedure A and DNER 011/79 - PRO - Structural Evaluation of Flexible Pavements - Procedure B, to evaluate deflections in the asphalt pavement. Thus, it can be observed that the newly constructed and reclaimed sections had low deflections and are in good traffic conditions. On the other hand, the degraded section that did not undergo interventions had high deflections and required corrective measures.

Keywords: Beam Benkelman. Deflection. Flexible flooring. Structural Evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de camadas do pavimento 20
Figura 2 - Estrutura do pavimento rígido 21
Figura 3 - Resposta mecânica ao carregamento no pavimento rígido 22
Figura 4 - Estrutura do pavimento flexível 23
Figura 5 - Resposta mecânica ao carregamento no pavimento flexível 24
Figura 6 - Veículos utilizados na classificação do DNER 26
Figura 7 - Viga Benkelman esquematizada 35
Figura 8 - Posicionamento da viga Benkelman 36
Figura 9 - Esquema de leituras da bacia de deflexão 36
Figura 10 - Aferição da viga Benkelman 38
Figura 11 - Deformações no pavimento 39
Figura 12 - Deflexões no pavimento flexível 40
Figura 13 - Fase da vida de um pavimento 41
Figura 14 - Deflexão admissível para revestimentos com concreto betuminoso 43
Figura 15 - Raio de curvatura e deformada 44
Figura 16 - Bacia de deflexão e seções longitudinal e transversal 45
Figura 17 - Critérios para avaliação estrutural 49
Figura 18 - Processo de aferição da viga Benkelman 51
Figura 19 - Acionamento da manivela 52
Figura 20 - Delimitação dos trechos 53
Figura 21 - Estacas do trecho 01 54
Figura 22 - Estacas do trecho 02 55
Figura 23 - Estacas dos trechos 03 e 04 56
Figura 24 - Estacas do trecho 05 57
Figura 25 - Distribuição das estacas ao longo dos trechos 01, 02, 03 e 04 57
Figura 26 - Distribuição das estacas ao longo do trecho 05 58
Figura 27 - Caminhão sendo carregado 58
Figura 28 - Pesagem do caminhão 59
Figura 29 - Valor obtido na balança 59
Figura 30 - Demarcação da estaca inicial em campo 60
Figura 31 - Medição da largura da pista 60
Figura 32 - Demarcação da linha de aplicação da carga 61

Figura 33 - Demarcação da posição intermediária de 25cm 61
Figura 34 - Posicionamento da viga no pavimento 62
Figura 35 - Liberação da trava de segurança 62
Figura 36 - Leitura das deflexões 62
Figura 37 - Aferição da temperatura do pavimento 63
Figura 38 - Posicionamento da ponta de prova entre os pneus 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização dos pontos 37
Tabela 2 - Determinação do Fator de Correção Sazonal 46
Tabela 3 - Intervalos de confiança em função da relação entre braços da viga 64
Tabela 4 - Leituras no extensômetro da viga 64
Tabela 5 - Relações entre extensômetros 65
Tabela 6 - Critérios de aceitação e rejeição da viga 67
Tabela 7 - Critérios para o cálculo da constante da viga 67
Tabela 8 - Temperatura na superfície do revestimento 67
Tabela 9 - Deflexões corrigidas pelo efeito da temperatura 69
Tabela 10 - Deflexões máximas reais 71
Tabela 11 - Raios de curvatura das estacas 72
Tabela 12 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 01 74
Tabela 13 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 02 75
Tabela 14 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 03 75
Tabela 15 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 04 76
Tabela 16 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 05 76
Tabela 17 - Classificação das hipóteses 76
Tabela 18 – Medidas corretivas nas estacas do trecho 01 77
Tabela 19 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 02 77
Tabela 20 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 03 78
Tabela 21 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 04 78
Tabela 22 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 05 78
Tabela 23 - Avaliação estrutural dos segmentos 80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.C.	Antes de Cristo
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
CBR	California Bearing Ratio
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CCSA	Centro de Ciências Sociais Aplicadas
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CECEN	Centro de Ciências Exatas e Naturais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
d.C.	Depois de Cristo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESRD	Eixo simples de roda dupla
FWD	Falling Weight Deflectometer
ISC	Índice de Suporte Californiano
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
LVDT	Transformador diferencial variável linear
ME	Método de ensaio
N	Número de solicitações do eixo-padrão
PRO	Procedimento
PVActqb	Argissolo Vermelho-Amarelo Concrecionário
R	Raio de Curvatura
RQOltqb	Neossolo Quartzarênico Órticos Latossólicos
TER	Terminologia
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
VMDa	Volume médio diário anual
WASHO	Western Association of State Highway Officials

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 17

2.1 Geral 17

2.2 Específicos 17

3 JUSTIFICATIVA 18

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

4.1 Histórico da pavimentação 19

4.2 Pavimento 20

4.2.1 Conceito 20

4.2.2 Classificação dos pavimentos 21

4.3 Critérios de avaliação do tráfego em pavimentos 24

4.3.1 Volume médio diário (VMDa) 25

4.3.2 Classificação da frota 25

4.3.3 Carregamento da frota 26

4.3.4 Fator de equivalência de carga 27

4.3.5 Número equivalente “N” 27

4.4 Avaliação dos Pavimentos 27

4.4.1 Avaliação Funcional 28

4.4.2 Avaliação Estrutural 29

4.5 Métodos de avaliação estrutural 30

4.5.1 Ensaio por método destrutivo 31

4.5.2 Ensaio por método não-destrutivo 31

4.6 Ensaios deflectométricos e equipamentos – Avaliação não-destrutiva 32

4.6.1 Carregamento quase-estático 32

4.6.2 Carregamento vibratório 33

4.6.3 Carregamento por impacto 33
4.7 Viga Benkelman 34
4.7.1 Aferição da viga Benkelman 38
4.8 Parâmetros deflectométricos 39
4.8.1 Deformação nos pavimentos 39
4.8.2 Deflexão nos pavimentos 40
4.8.3 Fatores que influenciam nos levantamentos deflectométricos 45
4.8.4 Análise estatística das deflexões elásticas 47
4.9 Critérios para Avaliação Estrutural 48
5 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS 50
5.1 Equipamentos 50
5.2 Metodologia 50
5.2.1 Aferição da viga Benkelman 51
5.2.2 Segmento viário escolhido e demarcação das estações de ensaio 52
5.2.3 Pesagem do caminhão 58
5.2.4 Avaliação em campo 59
6 RESULTADOS 64
6.1 Aferição da viga Benkelman 64
6.2 Avaliação em campo 67
6.3 Cálculo dos parâmetros de avaliação estrutural 70
6.3.1 Número de tráfego “N” 70
6.3.2 Deflexão real ou de projeto 71
6.3.3 Raio de Curvatura 72
6.3.4 Deflexão admissível 73
6.4 Avaliação estrutural das estacas 74
6.5 Avaliação estrutural global dos segmentos 79
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 81

7.1 Conclusões principais.....81

7.2 Sugestões 82

REFERÊNCIAS.....83

APÊNDICES 85

APÊNDICE A.....86

APÊNDICE B.....88

APÊNDICE C 90

APÊNDICE D 93

APÊNDICE E.....94

APÊNDICE F 98

1 INTRODUÇÃO

Com intenção de conseguir melhores condições de acesso às áreas cultiváveis e fontes de madeira, rochas, minerais e água, o homem criou o que é conhecido hoje como estrada, onde as primeiras surgiram na China e foram aperfeiçoadas pelos romanos, que começaram a construí-las instalando pavimento e drenagem, com o intuito de torná-las mais duradouras (BALBO, 2007).

Muito utilizado atualmente, o pavimento é uma estrutura finita construída a partir de uma camada final de terraplenagem, projetado para resistir aos esforços relativos ao volume de tráfego de veículos e ao clima, e assegurar aos usuários condições adequadas de rolamento, segurança e conforto (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo o DNIT (2006), os pavimentos são classificados como rígidos, semirrígidos e flexíveis. Os rígidos são aqueles que possuem um revestimento de elevada rigidez em comparação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões oriundas do carregamento aplicado. Os semirrígidos são caracterizados por possuírem uma base cimentada como por exemplo, uma camada de solo cimento sobreposta por revestimento asfáltico. Já os flexíveis são aqueles que quando submetidos a um carregamento, sofrem deformação elástica significativa em todas as camadas, distribuindo a carga em parcelas aproximadamente iguais entre as camadas.

Geralmente, os pavimentos flexíveis são associados aos pavimentos asfálticos, e compostos por camada asfáltica superficial, chamada de revestimento, apoiada sobre camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, formadas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem injeção de agentes cimentantes. Conforme o número de tráfego, a resistência de suporte do subleito, a rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, pode-se eliminar uma ou mais camadas (BERNUCCI et al., 2008).

Nestes pavimentos, normalmente é esperado que a camada de revestimento contribua para a capacidade estrutural do pavimento, oferecendo maior resistência à fadiga e fendilhamento, causados, respectivamente, pela ação do tráfego e clima, e além disso, que a camada de desgaste conserve as condições superficiais adequadas de drenagem, atrito e baixa emissão de ruído de circulação (O’FLAHERTY, 1988).

O critério de avaliação de um pavimento pode ser funcional ou estrutural. A avaliação funcional está relacionada à observação da superfície dos pavimentos e como esta condição afeta na segurança do usuário, conforto ao rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, irregularidades e defeitos. A avaliação estrutural está relacionada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento. Os defeitos estruturais são ocasionados especialmente pela repetição das cargas e relacionam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes. As deformações elásticas são analisadas por equipamentos próprios genericamente chamados de deflectômetros por medirem a “deflexão” do pavimento ou deslocamentos verticais. As deformações plásticas são acumulativas durante os anos de vida de um pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Alguns dos equipamentos utilizados nas avaliações estruturais são: ensaio de placa e viga Benkelman (carregamento quase-estático), Dynaflect (carregamento vibratório), Falling Weight Deflectometer (FWD) (carregamento por impacto). Esses equipamentos são capazes de medir os seguintes parâmetros: deflexão máxima (deslocamento sob o centro das rodas duplas de um eixo simples); raio de curvatura (arco de parábola que passa por dois pontos da bacia de deflexão); deformada, bacia deflectométrica ou bacia de deflexão (medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pontos a partir do centro do carregamento) (BERNUCCI et al., 2008).

Para a realização da avaliação estrutural de um pavimento flexível, mesmo com a existência de equipamentos mais modernos, de maior precisão e rapidez, a viga Benkelman por ser um equipamento de baixo custo, grande utilização no país e pela sua simplicidade, pode e deve ser usada para medição das deflexões, especialmente na versão automatizada (MEDINA et al., 1994).

A viga Benkelman foi criada pelo engenheiro Alvin Carlton Benkelman, na década de 1950, na WASHO Road Test, nos Estados Unidos. Desde então, o equipamento tem sido amplamente utilizado por órgãos rodoviários para trabalhos de pesquisa, avaliação estrutural e projeto de reforço de pavimentos em todo mundo (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

No Brasil, é notório a experiência em medições deflectométricas e é comum entre os engenheiros rodoviários a “auscultação” de um pavimento através de

medidas de deflexão, pelo menos como uma primeira fase, que pode ser também a única, de avaliação da condição estrutural (DNER, 1979).

Com base nisso, a viga Benkelman será de fundamental importância para a realização deste trabalho, visto que sua operacionalidade é simples e bem difundida no campo da avaliação estrutural de pavimentos flexíveis através de medições deflectométricas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a condição estrutural do pavimento asfáltico de vias internas da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), na Cidade Universitária Paulo VI, utilizando a viga Benkelman.

2.2 Específicos

- Medir as deformações elásticas ou deflexões reversíveis no pavimento asfáltico;
- Calcular as deflexões a partir das medições realizadas;
- Avaliar a capacidade estrutural do pavimento.

3 JUSTIFICATIVA

O pavimento asfáltico está sujeito a fatores que causam deficiências não só no revestimento, mas em toda a sua estrutura, que podem ser deficiências de projeto, deficiências de drenagem, falhas de fundação ou falhas construtivas na estrutura do pavimento (DNER, 1994a).

É de conhecimento, que as vias internas do Campus foram incluídas, há 01 ano, no programa Mais Asfalto, do Governo do Estado, e compreende obras de abertura de vias e recuperação asfáltica para compor o novo traçado viário, organizando a instituição em grandes quadras, facilitando o acesso das pessoas aos prédios e a circulação de veículos

Considerando que a Cidade Universitária Paulo VI, possui 04 centros de ensino que são: Centro de Ciências Agrárias (CCA), Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA), Centro de Educação, Ciências Exatas e Naturais (CECEN) e Centro de Ciências Tecnológicas (CCT); e por consequência a ocorrência de alto e constante fluxo de transporte coletivo (ônibus), que transportam os acadêmicos, associado ainda a presença de caminhões diversos, o trabalho apresentará informações atualizadas relativas às condições estruturais das vias internas do campus, possibilitando avaliar a qualidade técnica dos serviços recém executados e a criação de banco de dados para as políticas de planejamento das obras de manutenção, para o setor Divisão de Obras da prefeitura do campus.

O trabalho será desenvolvido de acordo com as normas atuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), avaliando a existência ou não de sobrecarga diária no pavimento, oriundo do tráfego existente. O equipamento (viga Benkelman) pertence ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LSP) da UEMA e até então, embora seja de extrema importância para pesquisas de avaliação estrutural em pavimentos flexíveis, de simples manuseio e fácil calibração, poucos são os trabalhos acadêmicos desenvolvidos na instituição que o utilizam.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Histórico da pavimentação

Há mais de 5.000 anos, a invenção da roda, na Mesopotâmia, gerou a necessidade da utilização de materiais mais resistentes na construção de estradas. Sabe-se muito pouco sobre as primeiras estradas construídas. Uma das mais antigas que se tem vestígios, está na Grécia e foi revestida com pedra e construída, provavelmente, 1500 anos antes de Cristo. Entre 400 a.C. e 200 d.C., os romanos construíram um vasto sistema de estradas, com uma extensão de mais de 75.000 milhas, abrangendo todo o Império (PREGO, 2001).

Entre as numerosas vias romanas, a Via Appia, construída para estabelecer comunicação entre a sede romana e as províncias orientais, ligando Roma a Taranto, foi uma das primeiras a receber atenções técnicas específicas no que se refere à pavimentação (BALBO, 2007).

Na América Latina, as estradas construídas pela avançada civilização Inca merecem destaque. Os mesmos construíram uma rede viária de pelo menos 17.000 km, que compreendia terras hoje da Colômbia até o Chile e a Argentina. As estradas foram construídas sempre acima do nível dos rios para fugir de inundações (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil, o modal rodoviário tem sido há anos a principal escolha para o transporte de pessoas e bens: na matriz de transporte de cargas, detém a maior participação (61,1%), e no transporte de passageiros, o modal predomina com 95% de participação. Além disso, é o principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte, contribuindo expressivamente para o desenvolvimento socioeconômico do País (CNT, 2016).

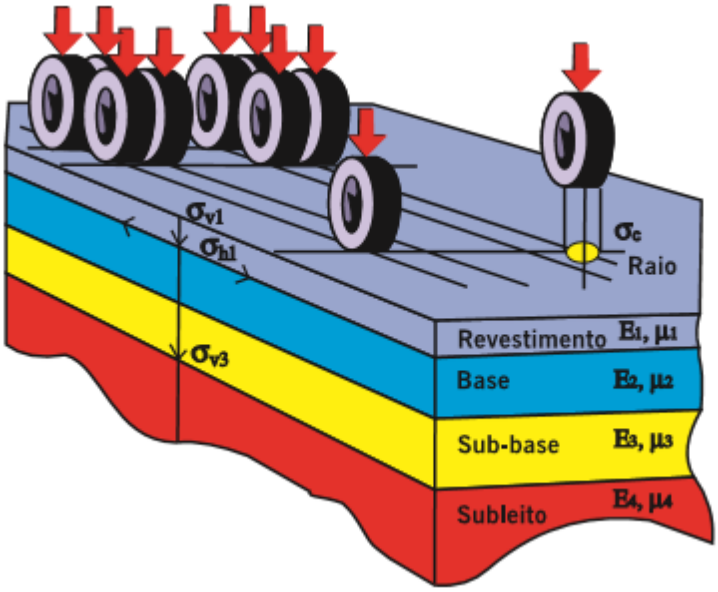
Segundo a CNT (2016), considerando vias federais, estaduais e municipais, a malha rodoviária brasileira possui 1.720.756 km de estradas implantadas. Onde 211.468 km (12,3%) correspondem a rodovias pavimentadas, considerando pavimentos rígidos e flexíveis.

4.2 Pavimento

4.2.1 Conceito

Segundo Bernucci et al. (2008), pavimento é uma estrutura composta de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, dimensionada para resistir aos esforços provenientes do tráfego e clima, proporcionando conforto e segurança ao usuário (Figura 1).

Figura 1 - Sistema de camadas do pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Para o DNIT (2006), pavimento de uma rodovia é a superestrutura formada por um conjunto de camadas de espessuras finitas, estáveis acima de um semi-espaço – o terreno de fundação, usualmente denominado de subleito - teoricamente considerado como infinito. Sua estrutura de camadas possui materiais de diferentes resistências e deformabilidades que são colocadas em contato elevando o grau de complexidade em relação ao cálculo de tensões e deformações.

Pavimentos rodoviários são basicamente classificados em dois tipos: rígidos e flexíveis. Para designar o tipo de revestimento do pavimento, ultimamente há uma tendência a se utilizar a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou apenas concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente (BERNUCCI et al., 2008).

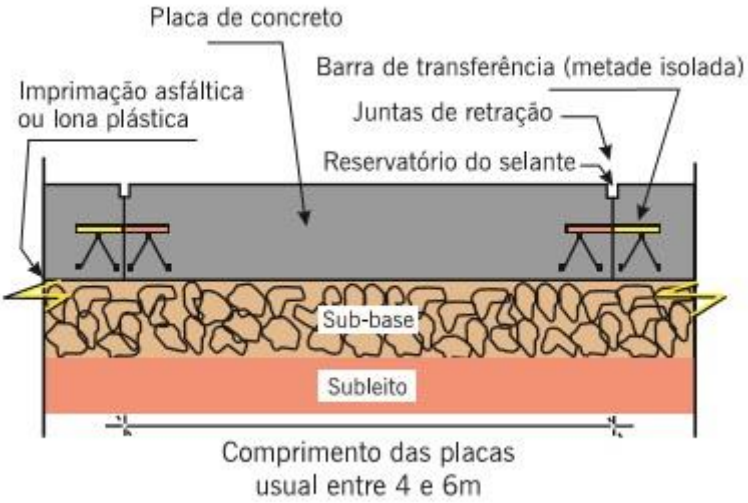
4.2.2 Classificação dos pavimentos

O DNIT (2006), classifica os pavimentos em rígidos, semirrígidos e flexíveis.

4.2.2.1 Pavimento Rígido

Para Bernucci et al. (2008), pavimentos rígidos ou, pavimentos de concreto-cimento, são aqueles em que o revestimento é constituído por uma placa de concreto de cimento Portland, que podem ser armadas ou não com barras de aço. A espessura do revestimento nesses pavimentos é determinada de acordo com a resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas inferiores. Constantemente denomina-se a camada inferior ao revestimento como sub-base, visto que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (Figura 2).

Figura 2 - Estrutura do pavimento rígido

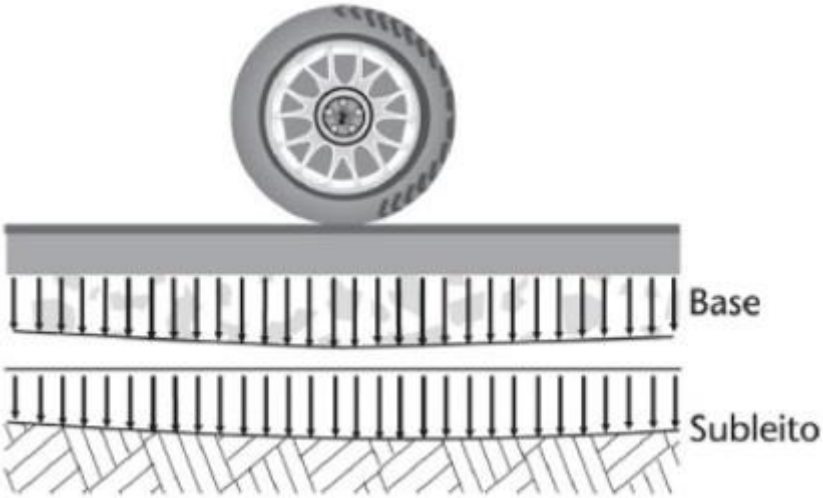


Fonte: Bernucci et al. (2008)

Os pavimentos rígidos podem ser construídos de várias formas como, por exemplo, com concreto simples, armado, protendido, com adição de fibras, com concreto rolado ou com concreto de alta resistência. Que podem ser assentados sobre o solo, sobre a sub-base, ou sobre pavimentos antigos, de concreto ou asfalto (OLIVEIRA, 2000).

Pavimentos rígidos são os que absorvem quase todas as tensões resultantes do carregamento aplicado por possuir revestimento de elevada rigidez em comparação às camadas inferiores (Figura 3) (DNIT, 2006).

Figura 3 - Resposta mecânica ao carregamento no pavimento rígido



Fonte: Balbo (2007)

Atualmente, em alguns casos, a escolha pelo pavimento rígido começa a ser considerada uma solução recomendável, tendo em vista algumas particularidades do projeto de pavimentos flexíveis e a atual situação mundial de abastecimento de petróleo (PREGO, 2001).

4.2.2.2 Pavimento Semirrígido

Para Balbo (2007), os pavimentos semirrígidos são aqueles constituídos por revestimento asfáltico e sua base ou sub-base é composta por material tratado com cimento de elevada rigidez.

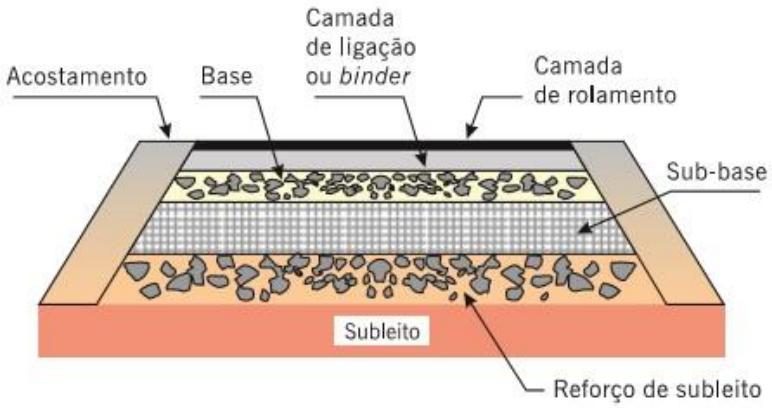
Os pavimentos semirrígidos possuem uma base cimentada por algum aglutinante com qualidades cimentícias, como uma camada de solo-cimento coberta por uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

4.2.2.3 Pavimento Flexível

Os pavimentos flexíveis, ou asfálticos, são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Esse pavimento possui revestimento composto por uma mistura formada basicamente de agregados e ligantes asfálticos. O revestimento asfáltico pode ser constituído por camada de rolamento, que está em contato direto com as rodas dos veículos, e por camadas de ligação, ocasionalmente chamadas de binder. A estrutura desses pavimentos é determinada de acordo com o tráfego e os materiais disponíveis,

podendo ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura são estabilizadas sobre o subleito, ou seja, a base da estrada formada ao final da terraplenagem (Figura 4) (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 4 - Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Revestimento é a camada que sofre diretamente a ação do rolamento dos veículos, e se destina a melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança, e resistir ao desgaste (esforços horizontais) tornando mais durável a estrutura (SENÇO, 2007).

A função principal do revestimento é receber as cargas estáticas ou dinâmicas, sem sofrer consideráveis deformações plásticas ou elásticas, fragmentação dos agregados ou, perda de compactação. Por questões técnicas, construtivas e de custo, os revestimentos asfálticos são subdivididos em duas ou mais camadas como, por exemplo, camada de rolamento e camada de ligação (BALBO, 2007).

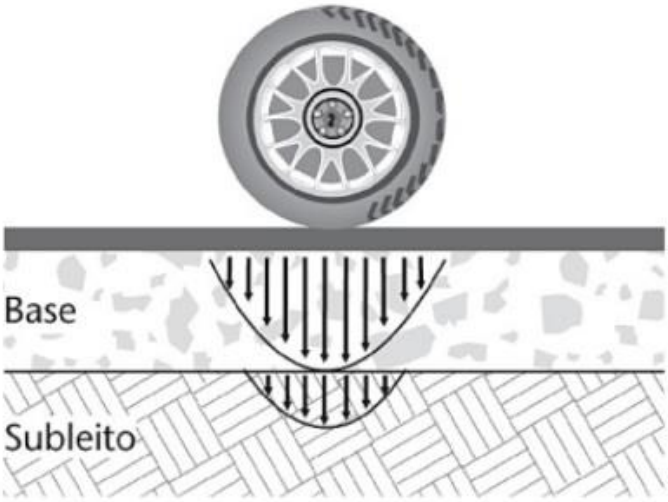
A base é a camada designada a resistir e distribuir as cargas verticais causadas pela ação do tráfego. O pavimento pode ser composto apenas por revestimento e base, podendo ser complementado pela sub-base e pelo reforço do subleito (SENÇO, 2007).

Quando a camada de base necessária é muito espessa, procura-se dividi-la, por questões econômicas e construtivas, em duas camadas: base e sub-base - esta sendo geralmente de menor custo (BALBO, 2007).

Segundo Medina e Motta (2015), o subleito é a camada final de terraplenagem, designada como o solo de fundação do pavimento. Entre esta camada e a sub-base, admite-se, ainda, uma camada de reforço do subleito, para melhorar a fundação.

A carga aplicada nos pavimentos flexíveis se distribui de forma quase igualitária entre as camadas e, consequentemente, todas as camadas sofrem deformação elástica (Figura 5) (DNIT, 2006).

Figura 5 - Resposta mecânica ao carregamento no pavimento flexível



Fonte: Balbo (2007)

A absorção dos esforços nesses pavimentos dá-se de forma dividida entre diversas camadas e as tensões verticais nas camadas inferiores estão concentradas em região próxima da área de aplicação da carga (BALBO, 2007).

No Brasil, o tipo de pavimento mais utilizado é o flexível, constituído de revestimentos betuminosos delgados e bases granulares (PREGO, 2001).

Segundo a ABEDA (2010), de 211 mil km de extensão da malha rodoviária brasileira pavimentada, considerando rodovias federais, estaduais e municipais, cerca de 97% possuem pavimento flexível.

4.3 Critérios de avaliação do tráfego em pavimentos

Segundo o DNIT (2006), a avaliação correta da solicitação de tráfego que o pavimento avaliado já sofreu é fundamental para o diagnóstico preciso do pavimento existente. Para dimensionar o reforço ou definir outras intervenções é necessário determinar o tráfego futuro. Em todos os casos, é preciso definir os seguintes elementos relacionados ao tráfego:

a) Volume médio diário anual (VMDa);

b) Classificação da frota;

c) Carregamento da frota;

d) Fator de equivalência de carga;

e) Número equivalente “N”.

4.3.1 Volume médio diário (VMDa)

A melhor forma de qualificar os volumes de veículos que utilizam a via são as contagens em campo. Porém, são viáveis apenas quando a via já existe e são realizadas quando se projetam duplicações, melhoramentos, restauração de pavimentos, entre outros (BALBO, 2007).

O tráfego futuro estimado terá como ponto de partida a avaliação do tráfego atual, obtido através de pesquisas de campo. A sua projeção ao longo do período de projeto terá como base as taxas de crescimento do tráfego e o conhecimento de eventuais intervenções previstas para o sistema de transporte da região (DNIT, 2006).

4.3.2 Classificação da frota

Conforme o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006), a classificação mínima útil para avaliar o tráfego compreende as seguintes subclasses de veículos de carga: ônibus, caminhão leve, caminhão médio, caminhão pesado e reboque/semirreboque. A Figura 6 mostra alguns exemplos desta classificação:

Figura 6 - Veículos utilizados na classificação do DNER

SÍMBOLO	CONFIGURAÇÃO	DESCRIÇÃO
		Automóvel
		Utilitário
2c		Ônibus
2c		Caminhão
3c		Caminhão
4c		Caminhão
2s1		Semi-reboque
2s2		Semi-reboque
2s3		Semi-reboque
3s2		Semi-reboque
3s3		Semi-reboque
2c2		Reboque
2c3		Reboque

Fonte: Adaptado do DNIT (2006)

4.3.3 Carregamento da frota

Segundo o DNIT (2006), para avaliar o efeito do tráfego sobre o pavimento é necessário ter conhecimento a respeito das cargas por eixo com as quais os veículos de carga solicitam a estrutura. Isto pode ser feito especialmente através de pesagens

levadas a efeito no próprio trecho, ou em trecho com tráfego semelhante. Os procedimentos de pesagem existentes são: balanças fixas, balanças portáteis e sistemas automáticos de pesagem, que possibilitam pesagem contínua por meio de longos períodos.

4.3.4 Fator de equivalência de carga

O fator de equivalência de carga (FEC) converte todos os efeitos resultantes da repetição de cargas de eixos de diversas configurações em repetições do eixo-padrão equivalente. Logo, através dos FECs, todo o tráfego será transformado em um número “N” de repetições equivalentes ao eixo-padrão (BALBO, 2007).

4.3.5 Número equivalente “N”

Para Ferreira (2007), o número “N” retrata o carregamento gerado pelo tráfego que o pavimento deverá suportar em um determinado período de projeto ou de avaliação. Equivale ao número de passadas do eixo-padrão de 8,2 toneladas de forma acumulada no período observado.

4.4 Avaliação dos Pavimentos

A condição de um pavimento retrata o grau de degradação consequente de fatores, como meio ambiente, e o seu uso frequente pelo tráfego. A avaliação desta condição é possível em razão do conhecimento de diversos parâmetros de referência, já normatizados, que permitem determinar as condições de superfície, condições estruturais, condições de rugosidade longitudinais, avaliação do número de tráfego e as condições de aderência pela interação pneu/pavimento (DNIT, 2006).

A avaliação da condição dos pavimentos pode ser realizada de duas formas: funcional e estrutural (MÜLLER, 2005).

Segundo Prestes (2001), a avaliação da superfície dos pavimentos permite analisar condições funcionais e estruturais, seguindo metodologias normatizadas de medições e observações. Para realizar levantamentos desta natureza são necessárias medições e ou verificações da presença de patologias encontradas na superfície dos pavimentos. Estes defeitos são causados por uma série de fatores

como clima, ação do tráfego, métodos construtivos e características físicas dos materiais, que podem atuar simultaneamente ou separados.

Conforme Bernucci et al. (2008), os pavimentos são estruturas que geralmente deterioram-se funcional e estruturalmente de forma gradativa e acumulada a partir de sua abertura ao tráfego e, portanto, não apresentam ruptura repentina. A avaliação dos pavimentos tem como conceitos associados:

a) Serventia: diz respeito a qualidade do pavimento em relação a segurança e ao conforto ao rolamento;
b) Desempenho: variação da serventia ao longo da vida útil do pavimento;
c) Gerência: destinada a administração, gestão e otimização dos recursos aplicada ao planejamento, projeto, construção, manutenção e avaliação dos pavimentos;
d) Restauração: conjunto de intervenções realizadas com a finalidade de restabelecer total ou parcialmente as características técnicas originais de um pavimento;
e) Manutenção Preventiva: operação de correções localizadas que não englobam a maioria da superfície do pavimento, repondo pequena parcela da condição de serventia;
f) Reforço: operação de restauração aproveitando o valor residual da estrutura do pavimento acrescentando nova camada de mistura asfáltica, comumente chamada de recapeamento;
g) Reconstrução: operação de refazer completamente o pavimento desde o subleito, ou a partir da sub-base por retirada total dos materiais de base e revestimentos antigos substituindo-os por novos materiais ou por reciclagem dos mesmos sem ou com adição de estabilizantes.

4.4.1 Avaliação Funcional

A análise funcional trata da qualidade operacional da via e relaciona o conforto e segurança no rolamento com a condição da superfície do pavimento (MEDINA, MOTTA, 2015).

Segundo Nóbrega (2003), o conhecimento dos tipos de defeitos superficiais nos pavimentos e a sua relevância, com a intenção de registrá-los e quantificá-los, é

de fundamental importância. Basicamente, há duas formas de avaliar a condição funcional do pavimento:

a) Avaliações subjetivas, que definem o estado de degradação do pavimento com base em conceitos qualitativos, atribuindo notas ao pavimento, como mostrado na norma PRO-009/2003 (DNIT, 2003);
b) Avaliações objetivas, onde é realizado um levantamento quantitativo, em determinados locais, dos defeitos nos pavimentos, que podem ter diversos níveis de severidade, como apresentado nas normas PRO-006/2003 e PRO-007/2003 (DNIT, 2003).

Os defeitos de superfície nos pavimentos flexíveis são os danos ou deteriorações que podem ser identificados a olho nu e são classificados segundo a norma DNIT 005/2003 – TER. As principais deficiências presentes nos revestimentos asfálticos catalogadas pela norma brasileira são: fendas (fissuras e trincas), afundamentos, ondulações transversais ou corrugação, exsudação, panela ou buraco, remendo, desgaste ou desagregação (BERNUCCI et al., 2008).

4.4.2 Avaliação Estrutural

A capacidade estrutural de um pavimento flexível é solicitada por meio do número de repetições dos eixos dos veículos, entretanto, o pavimento está sujeito a outros fatores que causam deficiências no revestimento e na sua estrutura, que podem ser falhas da fundação, deficiências de projeto, deficiências de drenagem ou falhas construtivas na estrutura do pavimento (DNER, 1994a).

A avaliação estrutural é realizada a partir do estudo das características de resistência e de deformabilidade das camadas do pavimento verificando sua capacidade de carga. As cargas oriundas das rodas dos veículos causam deformações no pavimento em serviço. Os principais tipos de deformações sofridos pelos pavimentos são as deformações permanentes e as reversíveis (BORGES, 2001).

A deformabilidade elástica dos pavimentos é medida segundo uma carga conhecida, correspondente a um eixo comercial, geralmente denominada de deflexão e possui valor típico da ordem de centésimos de milímetro, maior em pavimentos flexíveis (asfálticos) do que nos rígidos (concreto). O valor deste parâmetro varia ao longo da vida útil do pavimento, desde a sua construção, aumentando com o tempo e

com a frequente passagem das rodas, devido ao aparecimento de trincas, inicialmente não identificadas visualmente. São estas deflexões que provocam a fadiga do revestimento a cada passagem da roda (MEDINA; MOTTA, 2015).

A avaliação estrutural é capaz de encontrar defeitos em camadas de materiais subjacentes ao revestimento que, muitas vezes, não são detectados pela avaliação visual superficial, como as deformações plásticas intensas, rupturas e contaminação em camadas granulares, inclusive fissuras de retração e fadiga em bases cimentadas (que ainda não se disseminaram para a superfície do revestimento asfáltico) (BALBO, 2007).

Segundo o DNIT (2006), um pavimento existente pode ter sua capacidade estrutural avaliada de duas formas:

a) Destrutiva, que avalia as características de resistência dos materiais das camadas do pavimento;
b) Não-destrutiva, que constituem na maneira mais apropriada para determinar a condição estrutural do pavimento e é realizada por meio de ensaios deflectométricos.

O procedimento de ensaio de ambas as formas é normatizado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) através das seguintes normas:

a) DNER 010/1979 – PRO: Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Procedimento A;
b) DNER 011/1979 – PRO: Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Procedimento B;
c) DNER 269/1994 – PRO: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis: TECNAPAV.

4.5 Métodos de avaliação estrutural

Segundo o DNIT (2006), a avaliação estrutural do pavimento pode ser realizada com base nos levantamentos dos defeitos de superfície, nos ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos.

4.5.1 Ensaio por método destrutivo

A avaliação estrutural por método destrutivo tem como objetivo a completa caracterização física da estrutura do pavimento: determinar as camadas existentes, definindo os materiais constituintes e suas espessuras, e ainda mostrar o estado de degradação presente de todas as camadas. Uma avaliação destrutiva pode ser executada de duas formas: manual ou mecanicamente. Os procedimentos mais utilizados são: abertura de cavas a pá e picareta; abertura de furos a trado; abertura de trincheiras transversais a pista; sondagens rotativas para remoção de amostras de revestimentos e bases (BALBO, 2007).

As principais desvantagens da avaliação estrutural de um pavimento utilizando ensaios destrutivos são: suspensão do tráfego da rodovia por um período de tempo significativo; introdução de defeitos nas seções do pavimento e o caráter destrutivo dos ensaios; ensaios onerosos, exigem muita mão-de-obra e consomem muito tempo; resultados dos ensaios retratam o estado dos materiais apenas em um ponto específico (DNIT, 2006).

4.5.2 Ensaio por método não-destrutivo

Os ensaios por métodos não-destrutivos medem a deflexão elástica na superfície do revestimento (D_0) e são bastante apropriados e utilizados na avaliação da capacidade estrutural (DNIT, 2006).

Além da caracterização da estrutura do pavimento, como a determinação do tipo, espessura e estado presente das camadas, é importante determinar a sua capacidade estrutural, que se faz por meio de provas de carga. Nesse caso, a estrutura é submetida a uma carga conhecida e medem-se as deflexões que lhe são impostas (BALBO, 2007).

Segundo Nóbrega (2003), os ensaios não-destrutivos proporcionam a avaliação das condições estruturais do pavimento sem danificá-los utilizando equipamentos para a medição das bacias de deformação. A viga Benkelman é o aparelho mais utilizado para este fim, entretanto o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados possibilitou melhorias em relação as avaliações estruturais como: aumento da precisão das medidas; aumento da produtividade dos ensaios; simulação das condições de carregamento do tráfego mais realísticas; redução dos custos dos

ensaios; obtenção de dados da análise estrutural dos pavimentos de forma mais simples.

Em pistas de grandes extensões e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, para acompanhar a variação do desempenho estrutural com o tempo, a avaliação mais adequada é a não-destrutiva (BERNUCCI et al., 2008).

4.6 Ensaios deflectométricos e equipamentos – Avaliação não-destrutiva

Para Bernucci et al. (2008), os equipamentos mais utilizados para avaliar a condição estrutural de um pavimento de forma não-destrutiva, podem ser divididos em:

a) Carregamento quase-estático;
b) Carregamento vibratório;
c) Carregamento por impacto;

4.6.1 Carregamento quase-estático

Para o DNIT (2006), os deflectômetros de carregamento quase-estáticos ou vigas de deflexão, são equipamentos desenvolvidos com base na tradicional viga Benkelman, de simples manuseio e fácil calibração em qualquer laboratório de solos que possui uma prensa para ensaios de Índice Suporte Califórnia (ISC), que foi aperfeiçoada com a automatização do processo de leituras das deflexões. Sua principal característica é que o carregamento aplicado ao pavimento move-se a baixas velocidades, geralmente da ordem de 3 km/h, e são cargas de eixos de caminhões. As deflexões medidas com estes aparelhos expressam bem o desempenho dos pavimentos flexíveis e semirrígidos. Entretanto, não podem ser utilizados em pavimentos rígidos, por falta de precisão na leitura de deflexões menores que 0,01 mm. São exemplos desses equipamentos: viga Benkelman, Deflectógrafo Lacroix, Califórnia Traveling Deflectometer, viga Benkelman automatizada, etc.

A medição das deflexões da estrutura do pavimento com a utilização de provas de cargas com pneus de caminhões foi iniciada aproximadamente em 1953, em razão da pista experimental da Western Association of State Highway Officials (WASHO), no Oeste dos Estados Unidos, graças ao engenheiro norte-americano A. C. Benkelman (MEDINA; MOTTA, 2015).

4.6.2 Carregamento vibratório

Os equipamentos que utilizam o modo dinâmico de carregamento tem como princípio a aplicação de cargas dinâmicas obtidas por indução de uma vibração harmônica estável e medem as deflexões dinâmicas por meio de sensores sísmicos (geofones) em vários pontos da superfície do pavimento (ROCHA FILHO, 1996).

Segundo o DNIT (2006), esses equipamentos possibilitam a determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos dos materiais das camadas, por meio da retroanálise das bacias deflectométricas medidas. A desvantagem desses ensaios é a necessidade de aplicar uma pré-carga estática da ordem de três vezes a carga dinâmica, com a finalidade de evitar o repique da placa de carga na superfície do pavimento, o que altera completamente o estado de tensões do pavimento. Alguns exemplos de equipamentos que fazem parte desta categoria são: Road Rater, Dynaflect, etc.

4.6.3 Carregamento por impacto

O equipamento que utiliza o impacto como forma de carregamento para medição das deflexões é o Falling Weight Deflectometer (FWD). Seu princípio de funcionamento é caracterizado pela queda de um conjunto de pesos sobre um sistema de amortecedores transferindo o carregamento aplicado a uma placa circular firmada no pavimento, provocando as deflexões registradas por sensores posicionados radialmente em relação ao ponto de aplicação da carga. São utilizados em quaisquer tipos de pavimentos, inclusive na avaliação de junta, detecção de vazios sob placas de concreto-cimento e condições de suporte dos pavimentos rígidos (ROCHA FILHO, 1996).

Esses equipamentos que aplicam cargas impulsivas, simulam cargas de roda a velocidades da ordem de 70 km/h. Não exigem aplicação de pré-carga estática e podem ser aplicadas cargas equivalentes aos eixos de caminhões ou dos trens de pouso de aeronaves (DNIT, 2006).

4.7 Viga Benkelman

A viga Benkelman é um aparelho que foi desenvolvido com a finalidade de medir deflexões obtidas em um extensômetro acionado por uma alavanca interfixa cuja relação entre os comprimentos dos braços é conhecida (DNER, 1994a).

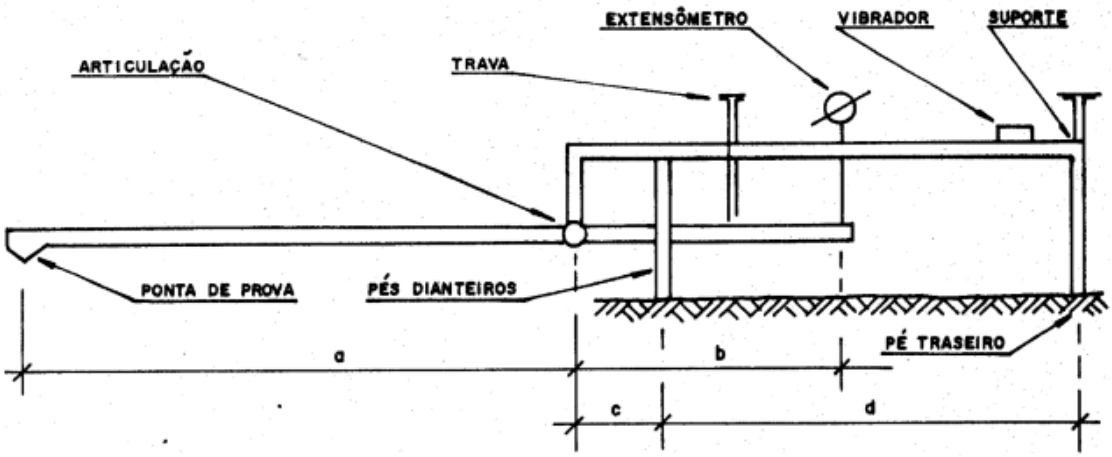
Segundo Ferreira (2007), a viga Benkelman mede a flecha máxima da linha de deflexão elástica do pavimento quando submetido a ação de uma carga.

Este equipamento é, provavelmente, o ensaio de campo que avalia as deflexões de um pavimento submetido a condições de carregamento, mais conhecido entre os engenheiros e projetistas de pavimentação pela sua grande disseminação e longo tempo de uso. O equipamento tem operação simples e possui grande versatilidade (BORGES, 2001).

A medição de deflexão dos pavimentos utilizando a viga Benkelman iniciou-se no país na década de 1960. A iniciativa veio dos engenheiros Nestor José Aratangy (1962) e Francisco Bolívar Lobo Carneiro (1965) (MEDINA; MOTTA, 2015).

A viga Benkelman, como mostra a Figura 7, é composta principalmente de uma parte fixa e uma viga móvel. A parte fixa fica apoiada no pavimento por meio de três pés reguláveis, acoplando-se a viga móvel a esta através de uma articulação, ficando a ponta de prova, localizada em uma das extremidades, em contato com o pavimento, e a outra extremidade acionando um extensômetro com precisão de 0,01 mm. Possui um pequeno vibrador que tem como objetivo vencer o atrito entre as peças móveis e evitar erros acidentais do ponteiro do extensômetro. A viga móvel deve possuir uma relação conhecida entre as distâncias da ponta de prova à articulação (a) e desta ao ponto que aciona o extensômetro (b). Em geral a relação a/b é: 2/1, 3/1 ou 4/1 (ROCHA FILHO, 1996).

Figura 7 - Viga Benkelman esquematizada



Fonte: DNER (1994a)

Onde:

(a) – Distância entre a articulação e a ponta de prova;

(b) – Distância entre o extensômetro e a articulação;

(c) – Distância entre a articulação e os pés dianteiros;

(d) – Distância entre os pés dianteiros e o pé traseiro;

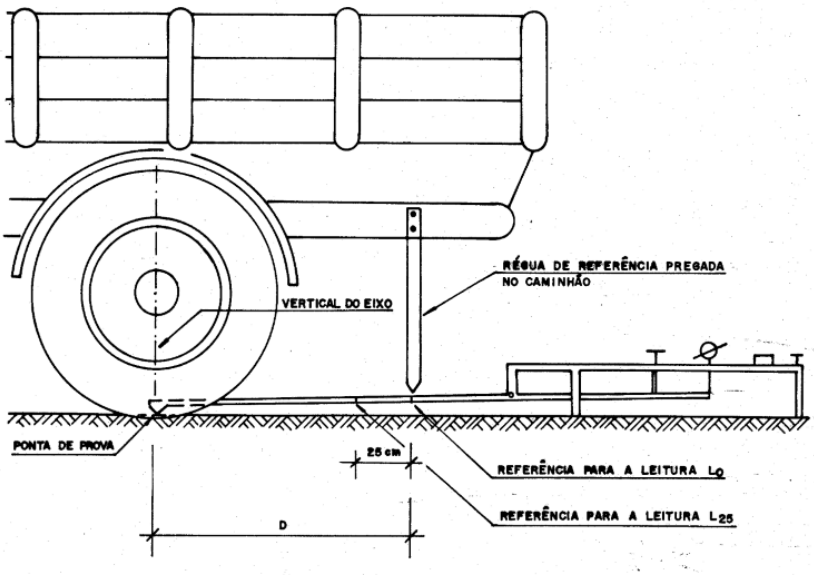
A viga Benkelman é um equipamento muito simples que precisa de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2 t, para aplicar a carga submetendo o pavimento a uma deformação elástica (BERNUCCI et al., 2008). Os pneus devem ter as dimensões 1.000 x 20 ou 900 x 20, com 12 lonas, tipo “com câmara” e com frisos na faixa de rodagem, e devem estar calibrados à pressão 0,56 Mpa (5,6 kgf/cm² ou 80 lb/pol²) (DNER, 1994a).

Conforme o DNER (1994a), após a instalação da ponta de prova no centro de carga da roda dupla (Figura 8), o vibrador é acionado e realiza-se uma leitura inicial (L_0) no extensômetro. Quando o caminhão desloca-se para frente do ponto de ensaio, e é decorrido um tempo suficiente para a superfície do pavimento retornar a seu plano original quando não estava carregada, é realizada a segunda leitura (L_f). A deflexão máxima (D_0) é obtida através da equação:

$$D_0 = (L_0 - L_f)\ x\ F \qquad (1)$$

Sendo (F) a constante da viga, ou seja, a relação entre a parte maior e a menor do braço de prova (a/b).

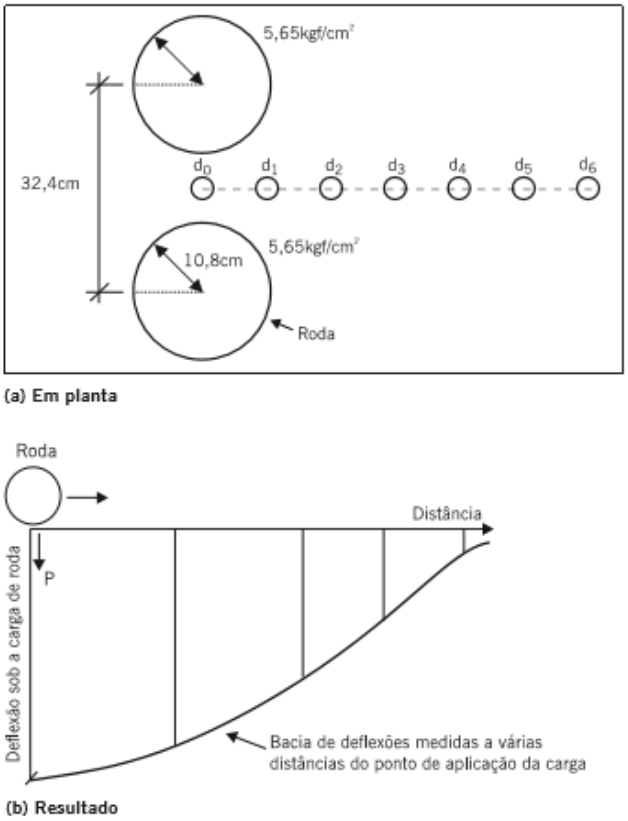
Figura 8 - Posicionamento da viga Benkelman



Fonte: DNER (1994a)

Para se obter a bacia de deflexão com a viga Benkelman, adota-se o esquema de leitura apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema de leituras da bacia de deflexão



Fonte: Nóbrega (2003) apud Bernucci et al. (2008)

Os pontos de ensaio do pavimento em que serão realizadas as medições das deflexões devem ser devidamente marcados e estarem localizados a uma

distância preestabelecida da borda do revestimento, como mostra a tabela a seguir (DNER, 1994a):

Tabela 1 - Localização dos pontos

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 (1994a)

Segundo Borges (2001), as principais dificuldades relacionadas à operação da viga Benkelman são:

a) Dificuldade para determinar a curvatura e tamanho da bacia deflectométrica;
b) Grande difusão das leituras pela baixa repetibilidade dos ensaios;
c) Impossibilidade de afirmar que as bases de apoio da viga estejam fora da deformada;
d) O sensor mede a deflexão parada, ou seja, não possui sensibilidade com o veículo em movimento;
e) Ensaios demorados;

As principais vantagens da viga Benkelman são (BORGES, 2001):

a) Facilidade de execução;
b) Necessidade de mão de obra pouco qualificada;
c) Ensaio de baixo custo;
d) O valor medido representa de forma realística a deformação do pavimento, apesar dos ensaios possuírem baixa repetibilidade.

Atualmente, a utilização deste equipamento, no Brasil, é normatizada pelo DNER através da norma ME-024/94.

Atualmente já existe o equipamento viga Benkelman automatizado, também chamado de deflectógrafo digital. A automação da leitura da viga Benkelman com transformador diferencial variável linear (LVDT) e o registro do deslocamento do caminhão tornam o procedimento mais eficaz e a análise dos dados mais rápida (MEDINA; MOTTA, 2015).

Dentre as principais vantagens da viga Benkelman automatizada, destacam-se: a sensibilidade das medições, bacia deflectométrica mais precisa e o

registro automático das deflexões e da distância radial em relação ao ponto de aplicação do carregamento (NÓBREGA, 2003).

4.7.1 Aferição da viga Benkelman

Aferição é a operação que verifica se uma determinada viga Benkelman está em condições de ser utilizada e define o valor da constante utilizada para calcular as deflexões (DNER, 1994b).

Por ser um instrumento sensível à contratempos tais como quedas, choques e outros efeitos do próprio uso em campo, a viga Benkelman deve ser periodicamente aferida para verificar se houve variação no valor de suas constantes e se estas variações são admissíveis (FERREIRA, 2007).

O procedimento de aferição deste equipamento deflectométrico é normatizada pelo DNER-PRO 175/94 – Aferição de viga Benkelman.

Para realização da aferição, os equipamentos necessários são (DNER, 1994b):

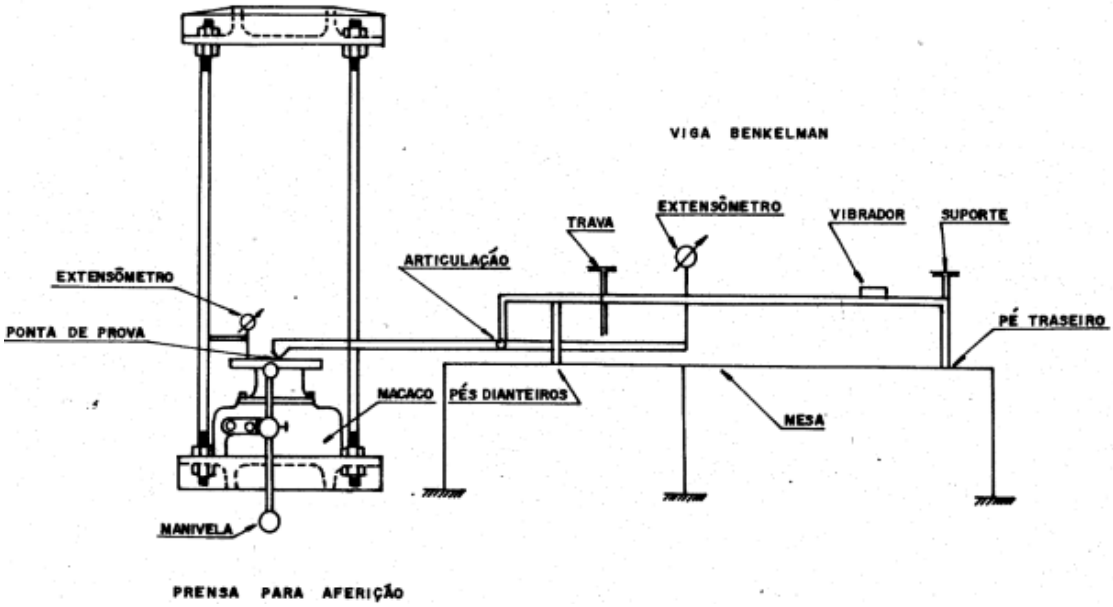
a) Prensa para determinação do Índice de Suporte Californiano (ISC) ou semelhante;

b) Extensômetro digital ou analógico de sensibilidade mínima de 0,01 mm;

c) Conjunto para fixação do extensômetro no tirante de aço da prensa.

A Figura 10 mostra a aferição sendo executada utilizando a prensa:

Figura 10 - Aferição da viga Benkelman



Fonte: DNER (1994b)

Devem ser feitas pelo menos duas séries de leituras para que se tenha o mínimo de 30 dados para realizar a calibração, de acordo com exigência da norma PRO 175/94 (DNER, 1994b).

4.8 Parâmetros deflectométricos

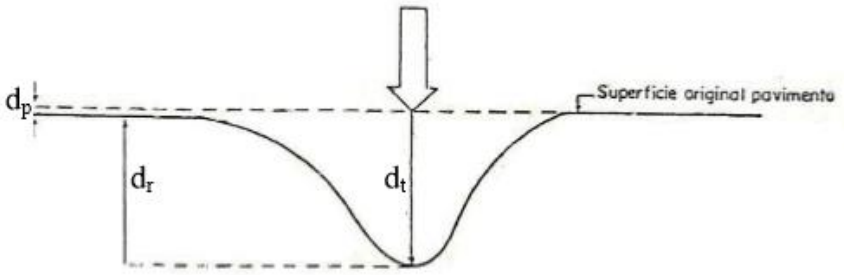
4.8.1 Deformação nos pavimentos

A elasticidade de um material refere-se à sua capacidade de absorver energia de deformação, que é completamente dissipada após a retirada de forças externas que agem sobre a matéria. Logo, sob essas condições, a deformação é chamada de deformação elástica. Quando é medida em uma linha vertical em relação à superfície do pavimento, de preferência sob o centro de aplicação das cargas, essa deformação total é chamada de deflexão (BALBO, 2007).

As deformações reversíveis ocorrem quando em um processo elástico, o pavimento recupera sua forma original após terminado o efeito da carga, fazendo desaparecer a deformação previamente observada. As deformações permanentes surgem quando, por efeitos plásticos, o pavimento ainda conserve uma deformação remanescente que continue mesmo após cessado o efeito da carga (FERREIRA, 2007).

A Figura 11 retrata as deformações sofridas por um pavimento sob a ação de cargas:

Figura 11 - Deformações no pavimento



Fonte: Ferreira (2007)

$$d_t = d_r + d_p \quad (2)$$

Onde:

d_t – deformação total gerada pela carga;

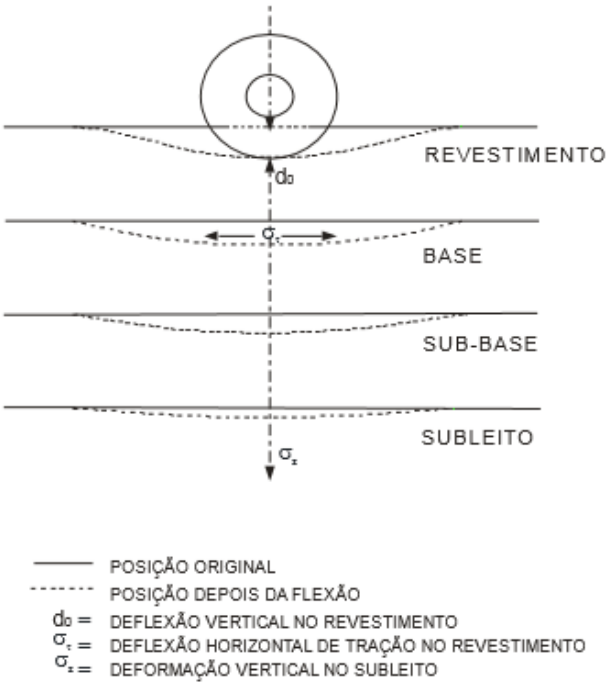
d_r – deformação reversível ou elástica;

d_p – deformação permanente ou plástica;

4.8.2 Deflexão nos pavimentos

A resposta das camadas estruturais e do subleito de um pavimento à ação de cargas é retratada pelas deflexões. Quando aplica-se uma carga em um ponto ou área da superfície do pavimento, todas as camadas sofrem flexão em consequência às tensões e às deformações causadas pelo carregamento. A Figura 12 mostra como o valor da deflexão diminui em cada camada geralmente com a profundidade e com o afastamento do ponto de aplicação do carregamento e depende ainda do módulo de resiliência das camadas. A partir de certas distâncias e profundidades as deflexões podem ser desconsideradas (DNIT, 2006).

Figura 12 - Deflexões no pavimento flexível



Fonte: DNIT (2006)

Atualmente é o dado mais utilizado no meio rodoviário para avaliação estrutural de pavimentos. A deflexão depende da rigidez das camadas, expressa pelos valores dos módulos de resiliência. Geralmente, seu valor diminui com a profundidade do ponto de aplicação da carga (BORGES, 2001).

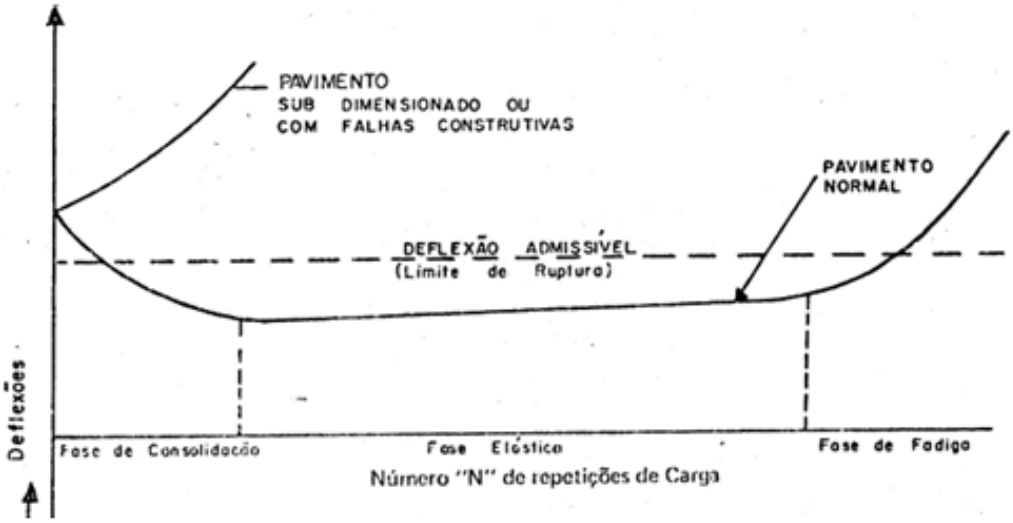
Os pavimentos estruturalmente mais saudáveis sofrem menos flexão do que outros pavimentos mais degradados. A diferença considerável na “resposta” entre os pavimentos saudáveis e debilitados indica os efeitos no desempenho estrutural. Logo, pavimentos com deflexões menores resistem a um número de solicitações de tráfego maior (DNIT, 2006).

Conforme o DNER (1979), considerando o comportamento de um pavimento bem construído, levando em conta que ao longo de seu período de vida é solicitado não só pelo tráfego, que o expõe a diversos esforços de compressão, cisalhamento e flexão, como também pelo clima, precipitações pluviométricas e mudanças de temperatura, ocasionando fadiga de toda a estrutura do mesmo, em relação à deflexão, pode distinguir-se as seguintes fases da vida do pavimento:

a) Fase de consolidação: sucede imediatamente à construção e é caracterizada por uma diminuição desacelerada do valor da deflexão estabilizando-se ao fim desta primeira fase;
b) Fase elástica: sucede à de consolidação, e durante esta fase o valor da deflexão do pavimento se mantém aproximadamente constante ou cresce moderadamente, definindo a vida útil do pavimento;
c) Fase de fadiga: sucede à elástica, caracterizando-se por um crescimento acelerado do valor da deflexão do pavimento. Esta fase é identificada pelo aparecimento de fissuras, trincas e trilhas de roda.

A Figura 13 mostra a vida de um pavimento delimitando suas fases, de acordo com o DNER (1979):

Figura 13 - Fase da vida de um pavimento



Fonte: DNER (1979)

Obviamente, quanto maior for a fase elástica de um pavimento flexível bem projetado, melhor ele será técnica e economicamente. Esta fase é limitada pelo número de tráfego e por diversos fatores que causam deficiências no revestimento e na estrutura do pavimento (DNER, 1979).

Segundo o DNER (1979), a intensidade das deflexões (e do raio de curvatura equivalente) e o surgimento de defeitos nos pavimentos flexíveis estão correlacionados.

Logo, a medição metodizada da deflexão ajuda a diagnosticar precocemente o aparecimento de trincas, permitindo programar as intervenções de reforço estrutural, caso sejam necessárias (MEDINA; MOTTA, 2015).

4.8.2.1 Deflexão admissível

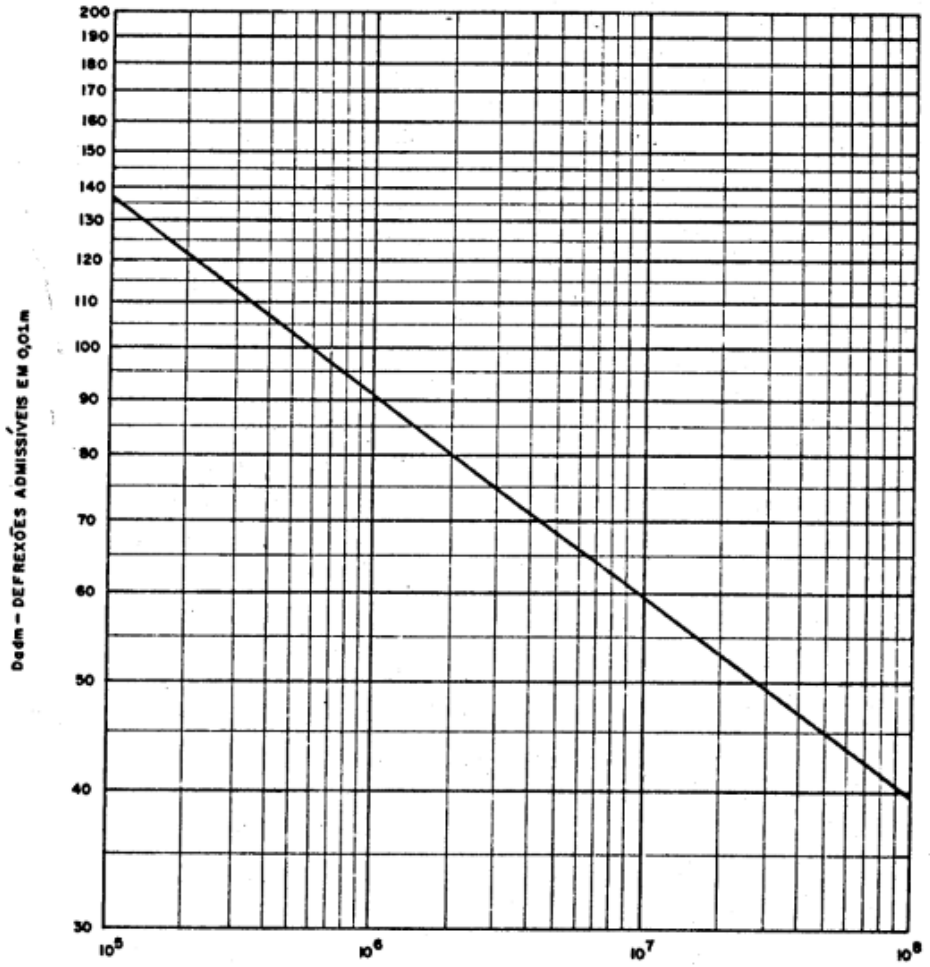
Deflexão admissível é a máxima deflexão que um pavimento pode apresentar para resistir a uma carga conhecida ou projetada de tráfego antes de atingir a fase de fadiga (FERREIRA, 2007). Em pavimentos flexíveis compostos de revestimento de concreto betuminoso executado sobre base granular, o valor da deflexão admissível (D_{adm}) em 0,01 mm é obtido através da seguinte expressão (DNER, 1979):

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

Sendo (N) o número equivalente de operações do eixo padrão 8,2 t (19.000 lb) no ano do levantamento.

Esta equação pode ser representada graficamente pelo ábaco da Figura 14.

Figura 14 - Deflexão admissível para revestimentos com concreto betuminoso

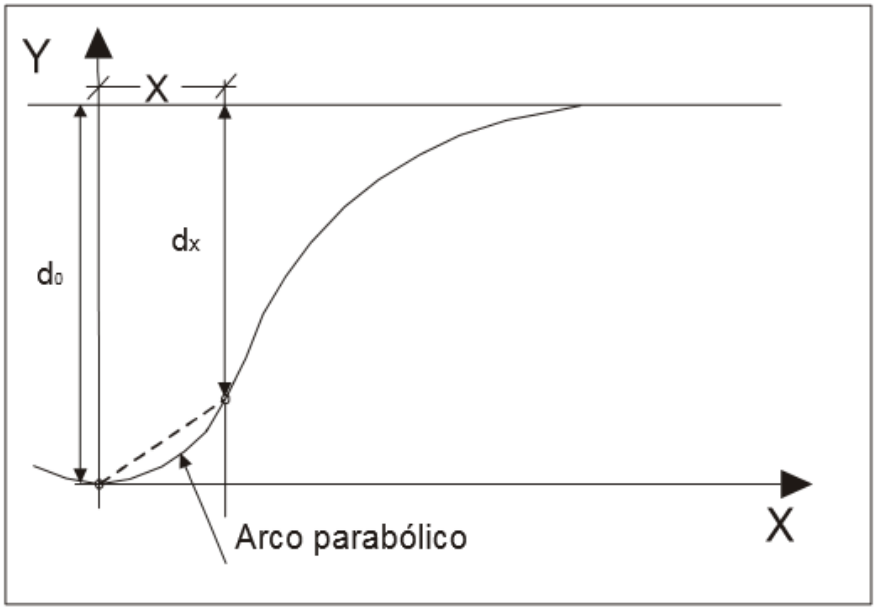


Fonte: DNER (1979)

4.8.2.2 Raio de curvatura

Segundo o DNIT (2006), entre os parâmetros ligados à forma das deformadas, que auxiliam na avaliação estrutural, talvez o mais difundido seja o chamado raio de curvatura (R), parâmetro que indica o arqueamento da deformada na sua parcela mais crítica, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Raio de curvatura e deformada



Fonte: DNIT (2003)

Conforme Medina e Motta (2015), quando se deseja determinar o raio de curvatura, R, mede-se a deflexão máxima (D_0) e a deflexão estando o caminhão com o eixo a 25 cm adiante (D_{25}), e tem-se:

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \tag{4}$$

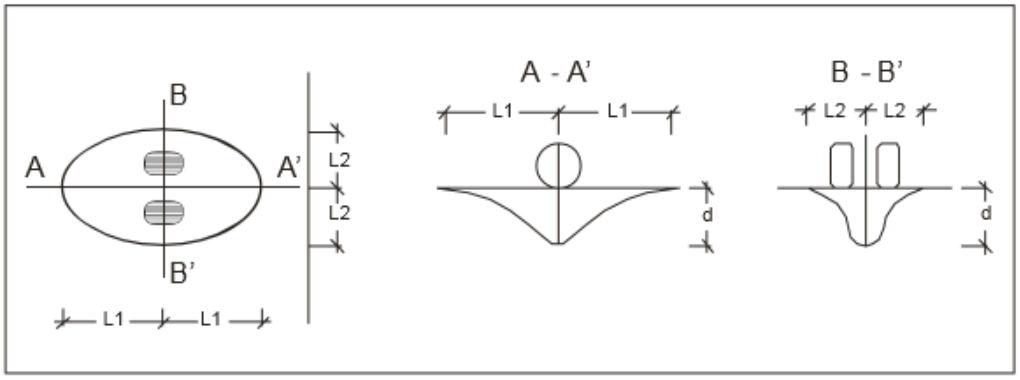
Onde D_0 e D_{25} estão em centésimos de milímetros (1/100 mm), e obtém-se R em metros.

4.8.2.3 Bacia de deformação

Na década de 1960, a avaliação estrutural baseava-se apenas no valor da deflexão máxima que, posteriormente, foi considerada insuficiente para analisar a condição estrutural do pavimento. Logo, adicionaram às avaliações leituras de deflexões a um conjunto de distâncias do ponto de aplicação da carga, sendo esta série de valores denominada como bacia deflectométrica (NÓBREGA, 2003).

Quando o deslocamento elástico é medido em vários pontos a partir de uma carga de roda dupla estática, tem-se a chamada bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto de aplicação do pavimento (Figura 16) (DNER, 1994).

Figura 16 - Bacia de deflexão e seções longitudinal e transversal



Fonte: DNIT (2006)

Uma seção longitudinal da bacia de deformação mostra que a deflexão máxima gerada pelo carregamento localiza-se sobre o centro de carga, e que seus raios horizontais são equivalentes. A linha correspondente a esta seção longitudinal é chamada de deformada. Já uma seção transversal à bacia de deformação mostra que seus raios horizontais também são simétricos, entretanto possuem valor inferior ao dos raios horizontais da seção longitudinal (DNIT, 2006).

4.8.3 Fatores que influenciam nos levantamentos deflectométricos

Os ensaios deflectométricos mostram as deflexões no exato momento de sua realização retratando as condições estruturais do pavimento. Logo, isto atenta para a importância do conhecimento de que fatores ambientais, como a temperatura, influenciam na variação da deflexão durante o dia, e a umidade, principalmente do subleito, varia a deflexão durante o ano. Outros fatores como: modo de carregamento utilizado, confiabilidade e precisão dos equipamentos, a posição e a espessura das camadas na estrutura do pavimento, também influenciam na intensidade das deflexões (ROCHA FILHO, 1996).

4.8.3.1 Influência da temperatura

Conforme Ferreira (2007), as deflexões obtidas de um pavimento asfáltico em um mesmo ponto sofrem influência da temperatura do pavimento no momento da realização da leitura visto que a elasticidade de uma camada asfáltica é influenciada diretamente pela temperatura. Para eliminar o efeito da temperatura sobre a medida das deflexões, se convertem as leituras registradas em diferentes temperaturas (D_t)

para uma deflexão equivalente à temperatura padrão de 20°C ($D_{20°C}$) utilizando a fórmula:

$$D_{20°C} = \frac{D_t}{[10^{-3} \,.\, e \,.\, (t - 20°C)] + 1} \tag{5}$$

Onde:

$D_{20°C}$ – Deflexão corrigida para a temperatura padrão de 20°C;

D_t – Deflexão elástica medida na temperatura (t) em centésimos de milímetro (0,01 mm);

t – Temperatura em °C medida no interior da camada do pavimento asfáltico;

e – espessura da camada asfáltica em centímetros;

4.8.3.2 Influência da sazonalidade

Embora as rodovias brasileiras não estejam expostas ao fenômenos do “degelo da primavera”, no decorrer da estação chuvosa o teor de umidade do subleito pode aumentar, diminuindo a sua capacidade de suporte. A deflexão superficial sob o centro da carga aplicada depende das características de todas as camadas que compõem o pavimento. Porém, a resistência e a intensidade das deflexões no pavimento estão completamente correlacionadas com o comportamento do subleito (ROCHA FILHO, 1996).

Segundo o DNER (1979), a época que sucede a estação chuvosa é a mais indicada para a realização das medidas deflectométricas, pois o subleito está com o máximo de umidade. Entretanto, como isto nem sempre é possível, é comum utilizar fatores de correção sazonal para obter medidas de deflexão em qualquer época, com o objetivo de corrigi-las para a época mais desfavorável. Estes fatores de correção sazonal são obtidos a partir de pesquisas regionais e são sugeridos como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação do Fator de Correção Sazonal

Natureza do subleito	**Fator de Correção Sazonal - Fs**	
	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)

A deflexão característica corrigida ou deflexão real (D_R) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$D_R = D_{20°C}\ x\ F_s \tag{6}$$

Onde:

D_R – Deflexão real ou deflexão característica corrigida, em 0,01 mm;

$D_{20°C}$ – Deflexão característica corrigida pela temperatura, obtida no levantamento deflectométrico;

F_s – Fator de correção sazonal.

4.8.4 Análise estatística das deflexões elásticas

Após serem realizadas as medições das deflexões nos trechos homogêneos da via, deve ser realizado o cálculo estatístico da deflexão característica correspondente da seguinte forma (DNER, 1979):

a) Relacionar as deflexões recuperáveis (D_R) obtidas;

b) Calcular a média aritmética (D) dos valores individuais (média da amostra):

$$D = \frac{\sum D_R}{n} \tag{7}$$

Sendo (n) o número de valores individuais obtidos.

c) Determinar o desvio-padrão da amostra (σ) pela equação:

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

d) Determinar o coeficiente de variação (cv) para cada uma das distribuições:

$$\mathrm{cv} = \frac{\sigma}{D} \tag{9}$$

e) Calcular a deflexão de projeto para cada uma das distribuições pela expressão:

$$D_p = D + \sigma \tag{10}$$

Onde:

D – Média aritmética da amostra;

σ – Desvio-padrão da amostra;

4.9 Critérios para Avaliação Estrutural

Para que não surjam trincas no revestimento, é necessário que a deflexão de projeto (D_p) permaneça abaixo de um valor máximo (D_{adm}) e que o raio de curvatura (R) do pavimento seja mantido acima de um certo valor mínimo. Isto garante que a tensão de tração (σ_t) que corresponde à deformação na face inferior do revestimento, não ultrapasse um determinado valor. Caso ultrapasse, o revestimento betuminoso romperá por fadiga (DNER, 1979).

Segundo a norma PRO – 011/79 do DNER (1979), ainda não existem critérios universalmente aceitos para se facilitar a tomada de posição em relação a avaliação estrutural dos pavimentos. Logo, no que diz respeito as dificuldades que englobam o problema, existe um critério proposto com a finalidade de fixar diretrizes a serem adotadas para efeito da avaliação estrutural dos pavimento. Procura-se formular cinco casos típicos, considerando que a maioria das situações que ocorrem nos subtrechos homogêneos possa se enquadrar, aproximadamente, em uma das hipóteses apresentadas. Para isto, são considerados os seguintes parâmetros, obtidos durante os estudos realizados:

N - Número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t;

D_p - Deflexão de projeto;

R - Raio de curvatura;

D_{adm} - Deflexão admissível;

I.G.G. - Índice de Gravidade Global.

Após realizadas as correções das deflexões obtidas em campo, é possível avaliar estruturalmente o pavimento a partir do quadro da Figura 17.

Figura 17 - Critérios para avaliação estrutural

Hipótese	Dados Deflectométricos obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$Dp \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$Dp > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $Dp \leq 3\ D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectrométrico	Reforço
		Se $Dp > 3\ D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$Dp \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$Dp > D_{adm}$ $R < 100$	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 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

5.1 Equipamentos

Para a realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) Viga Benkelman tradicional, com relação entre os braços de alavanca (a/b) de 2:1;
b) Caminhão basculante com eixo simples de roda dupla, tipo toco;
c) Balança Rodoviária;
d) Extensômetro analógico;
e) Prensa de ensaio CBR – Marshall;
f) Termômetro digital;

5.2 Metodologia

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre pavimentação asfáltica, parâmetros deflectométricos e avaliação estrutural por meio da viga Benkelman. Seguido de uma capacitação com treinamento do autor para a utilização correta e padronizada da viga Benkelman, para que não houvessem equívocos nas medições durante a pesquisa.

Após a capacitação, foi realizada uma avaliação estrutural não-destrutiva em trechos definidos das principais vias internas da Cidade Universitária Paulo VI, da Universidade Estadual do Maranhão, através da viga Benkelman.

Para a utilização da viga Benkelman, a mesma foi previamente aferida conforme DNER-PRO 175/94 - Aferição de viga Benkelman - Procedimento.

Em seguida, foram selecionados os segmentos viários onde foram medidas as deflexões.

Antes da realização das medições no pavimento, o caminhão foi carregado e pesado.

Posteriormente, foram feitas as medições das deflexões utilizando a viga conforme a norma DNER-ME 024/94 – Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman – Método de Ensaio.

Nessa avaliação foi utilizado um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla, com aproximadamente 8,2 t de carga no eixo traseiro, simetricamente distribuída em relação às rodas.

Os resultados obtidos foram comparados e analisados conforme as normas DNER 010/79 - PRO – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A e DNER 011/79 – PRO – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B, para avaliar as deflexões no pavimento asfáltico.

5.2.1 Aferição da viga Benkelman

O procedimento de aferição da viga Benkelman é padronizado pela norma DNER 175/94 – PRO, e deve ser realizado frequentemente devido aos contratempos em que o equipamento está sujeito, que podem afetar seu perfeito funcionamento, como quedas, choques, entre outros. Além de fixar as condições de aceitabilidade do equipamento para seu uso em uma determinada campanha de medições, a aferição da viga Benkelman tradicional possibilita determinar o valor da constante a ser usada para o cálculo das deflexões.

Para a realização deste procedimento utilizou-se uma prensa de ensaio CBR (Marshall), dois extensômetros analógicos para medir os deslocamentos verticais do prato da prensa e um conjunto para fixação do extensômetro no tirante de aço da prensa.

Foram realizadas 02 aferições no mesmo dia para melhor caracterização da constante de aferição e confiabilidade do procedimento (Figuras 18 e 19).

Figura 18 - Processo de aferição da viga Benkelman

Fonte: O autor (2017)

Figura 19 - Acionamento da manivela

Fonte: O autor (2017)

Os procedimentos detalhados de montagem e aferição da viga Benkelman podem ser encontrados, respectivamente, nos Apêndices A e B.

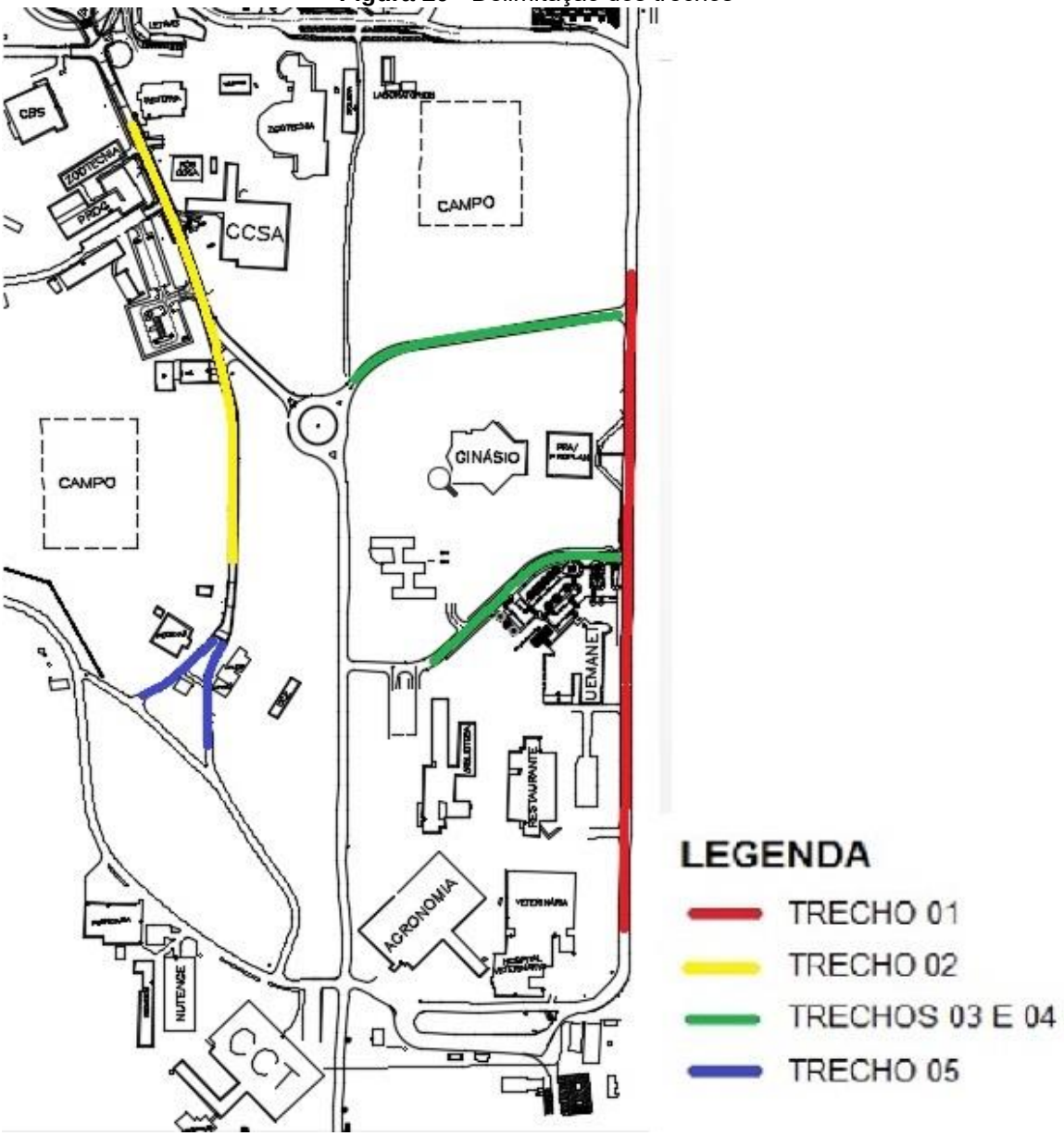
Durante o processo de aferição da viga, foram observadas as relações entre os deslocamentos ocorridos no prato da prensa e os deslocamentos registrados no extensômetro da viga tradicional. Após as leituras dos deslocamentos verticais, foi determinada a constante usada no cálculo das deflexões e em seguida verificou-se a aceitação ou não da viga, tomando como base os intervalos de confiança propostos pela norma DNER 175/94 – PRO.

5.2.2 Segmento viário escolhido e demarcação das estações de ensaio

Os trechos escolhidos para a realização desta pesquisa e levantamento dos parâmetros deflectométricos estão localizados no campus Paulo VI da UEMA, como mostra a Figura 20. Os segmentos compreendem vias recapeadas, vias construídas e vias sem intervenção de restauração e/ou reforço, os quais foram divididos em trechos 01, 02, 03, 04 e 05.

O ensaio foi realizado considerando a segurança dos operadores, tendo em vista que as medições ocorreram dentro do campus e em horário normal de circulação de ônibus e veículos de passeio.

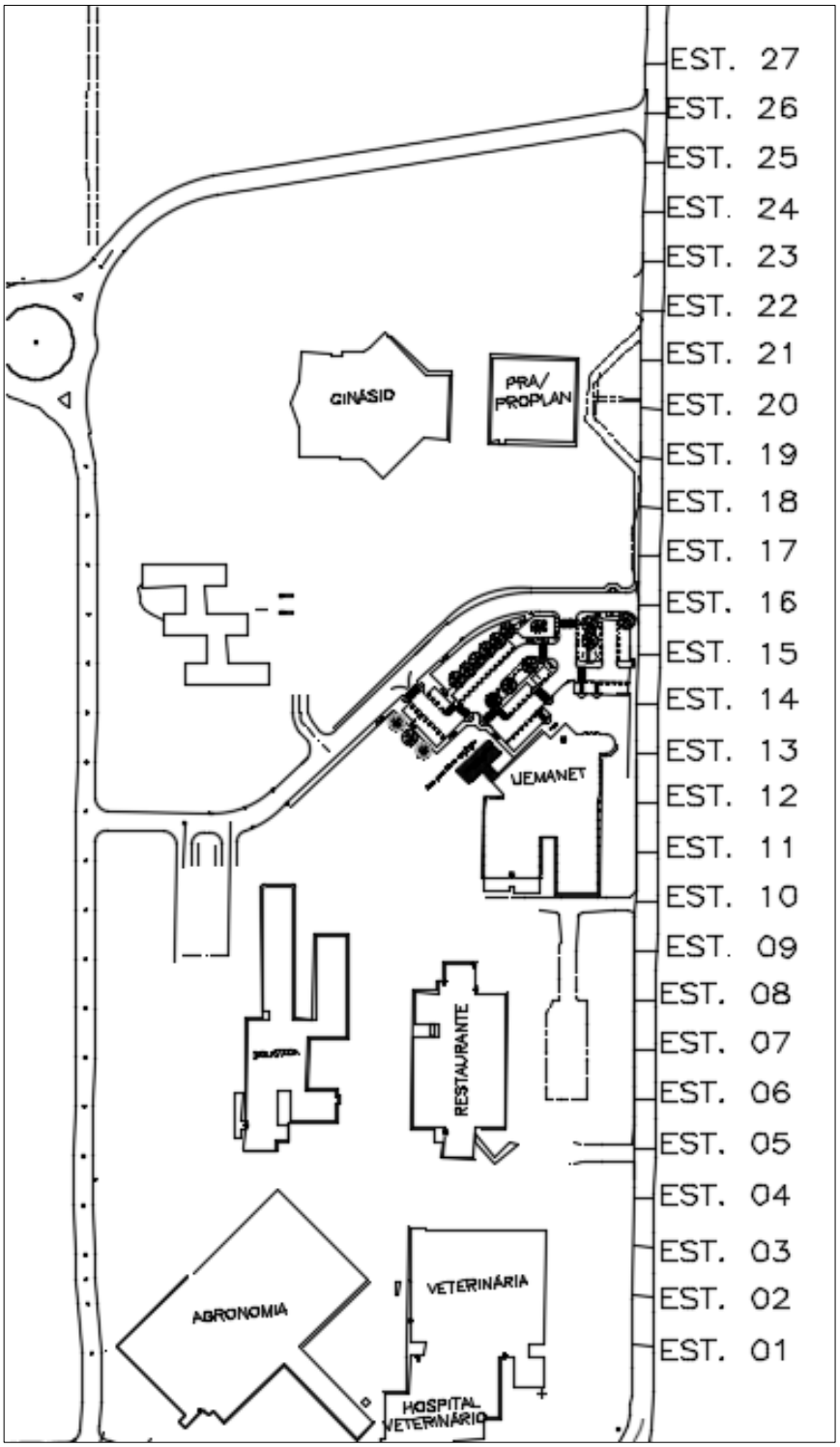
Figura 20 - Delimitação dos trechos



Fonte: O autor (2017)

O trecho 01 (Figura 21) é composto por via recapeada e possui solicitações de tráfego gerados pela circulação de ônibus. Contém extensão de 540 m, largura média de 8,50 m e foi dividido em 27 (vinte e sete) estacas.

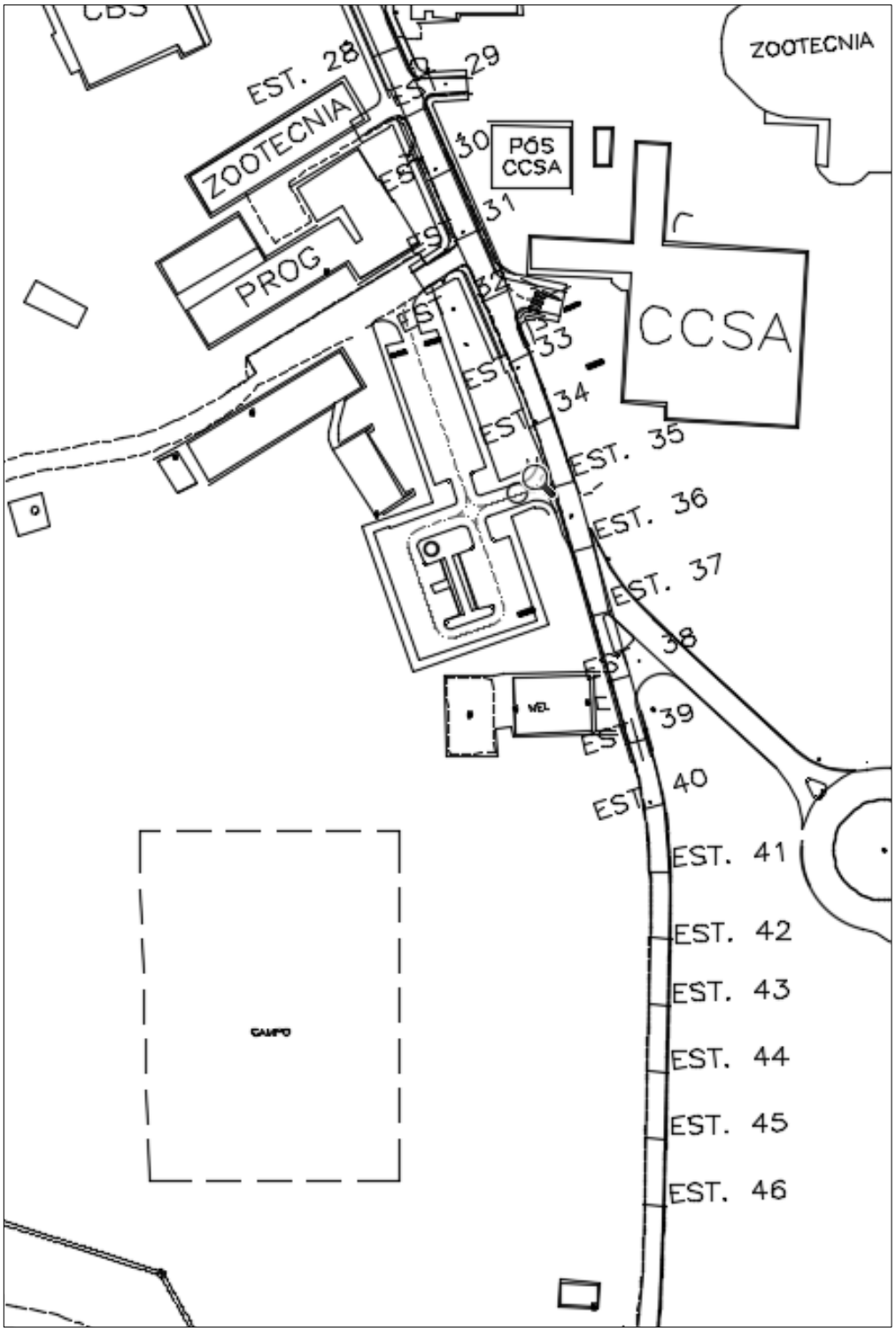
Figura 21 - Estacas do trecho 01



Fonte: O autor (2017)

O trecho 02 (Figura 22) é composto por via recapeada e solicitada apenas por veículos de passeios. Possui extensão de 380 m, largura média de 6,33 m e foi dividido em 19 (dezenove) estacas.

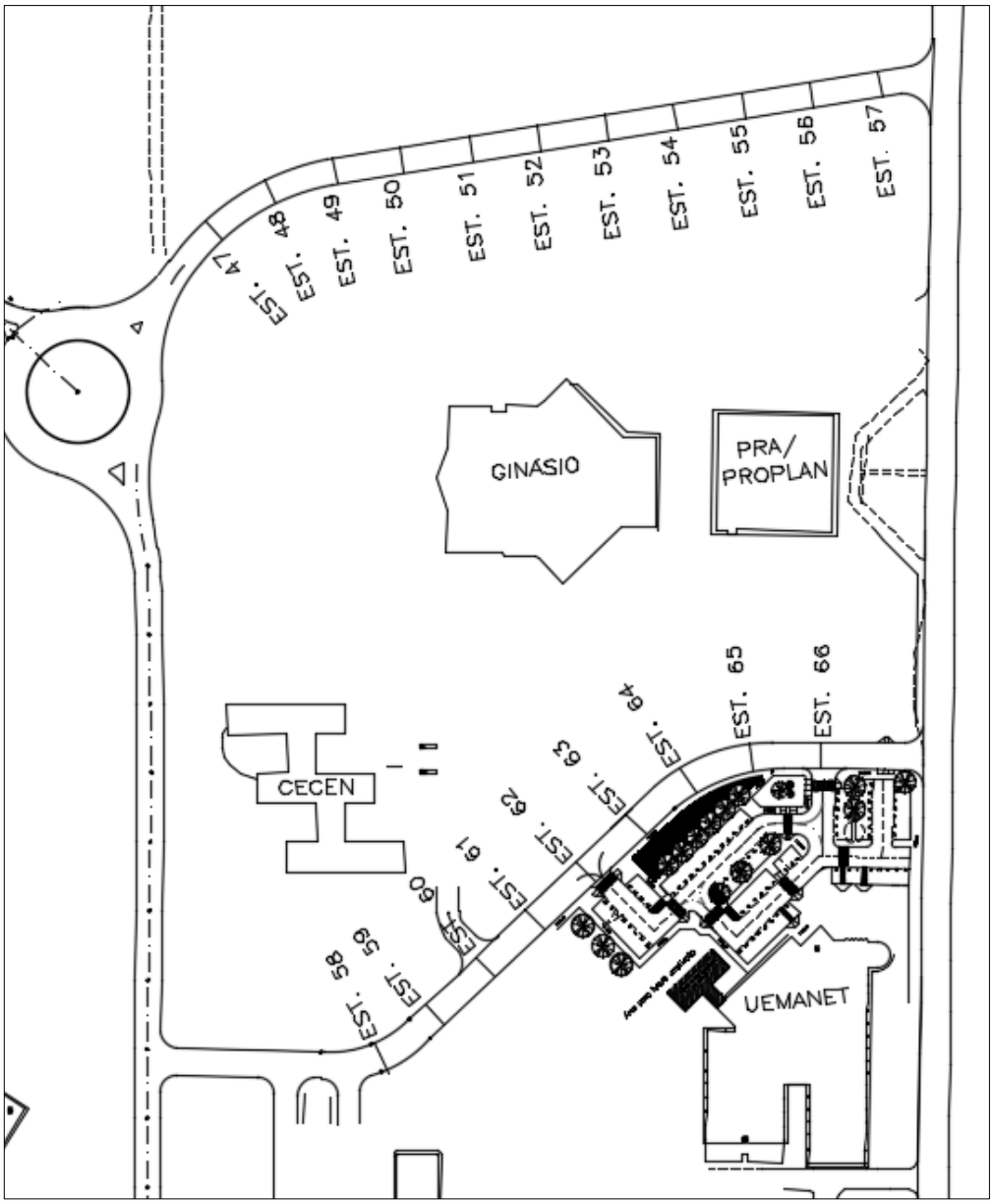
Figura 22 - Estacas do trecho 02



Fonte: O autor (2017)

Os trechos 03 e 04 (Figura 23) são compostos por vias construídas e solicitadas apenas por veículos de passeios. Possuem extensão total de 400 m, largura média de 7,35 m e foram divididos em 20 (vinte) estacas.

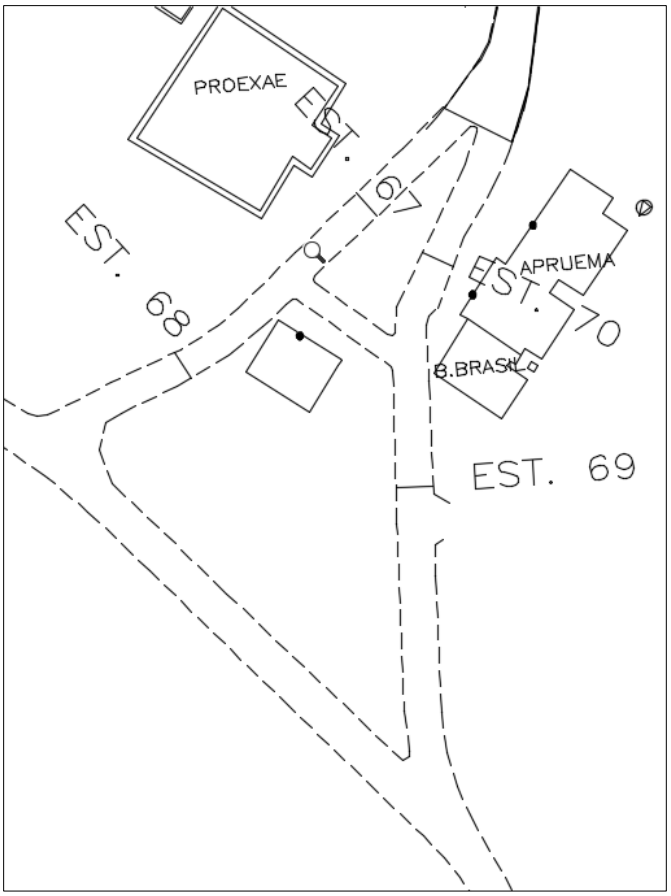
Figura 23 - Estacas dos trechos 03 e 04



Fonte: O autor (2017)

O trecho 05 (Figura 24) está localizado em uma via que não sofreu intervenção recentemente e é solicitada apenas por veículos de passeios. Possui extensão de 80 m, largura média de 5,48 m e foi dividido em 04 (quatro) estacas.

Figura 24 - Estacas do trecho 05

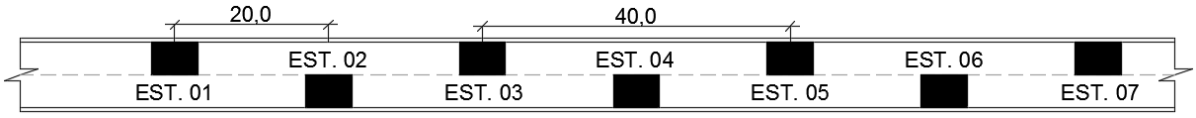


Fonte: O autor (2017)

Em função dos trechos 01, 02, 03 e 04 serem de pista única com duas faixas de tráfego, as superfícies de avaliação foram demarcadas a cada 20 m alternados em relação ao eixo da pista de rolamento, ou seja, a cada 40 m em relação a cada faixa de tráfego como recomendam a DNER 010/79 – PRO (Procedimento A) e a DNER 011/79 – PRO (Procedimento B).

Esquematicamente, a distribuição das estacas ao longo dos trechos 01, 02, 03 e 04 foi ordenada como mostra a Figura 25.

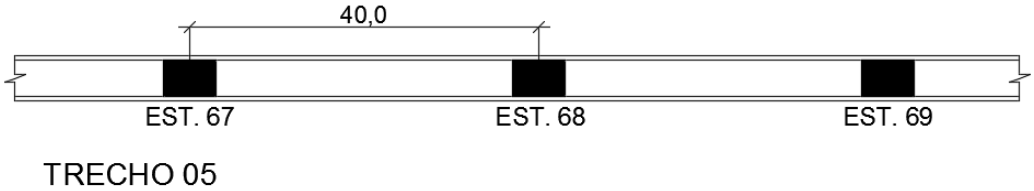
Figura 25 - Distribuição das estacas ao longo dos trechos 01, 02, 03 e 04



Fonte: O autor (2017)

O trecho 05, por ser de pista única com apenas uma faixa de tráfego, as estações de ensaio foram demarcadas a cada 40 m, como apresenta a Figura 26.

Figura 26 - Distribuição das estacas ao longo do trecho 05



Fonte: O autor (2017)

5.2.3 Pesagem do caminhão

No levantamento das deflexões em campo foi utilizado um caminhão da marca Mercedes-Benz, modelo MB 1313 e ano 1973. Conforme a DNER 024/94 – ME, o caminhão utilizado possui no eixo traseiro, uma carga de aproximadamente 8,2 toneladas distribuída uniformemente, eixo traseiro simples com roda dupla e pneus com as dimensões 1000 x 20 calibrados com 80 lb/pol².

Uma retroescavadeira foi utilizada para carregar o caminhão com resíduos de construção no bairro São Bernardo como mostra a Figura 27, e uma balança particular da empresa Sucata Maranhão localizada na Travessa Riachuelo, Tirirical, para pesar a carga no eixo traseiro do caminhão até que se obtivesse o valor aproximado de 8,2 toneladas exigido pela norma.

Figura 27 - Caminhão sendo carregado

Fonte: O autor (2017)

O valor obtido na pesagem do eixo traseiro do caminhão foi de 8,18 toneladas. As Figuras 28 e 29 mostram esse procedimento.

Figura 28 - Pesagem do caminhão

Fonte: O autor (2017)

Figura 29 - Valor obtido na balança

Fonte: O autor (2017)

5.2.4 Avaliação em campo

Para a realização deste ensaio foi formada uma equipe constituída por 05 pessoas: 01 motorista de caminhão, 01 operador de viga Benkelman, 01 auxiliar responsável por preencher a planilha de campo, 01 auxiliar para aferir a temperatura no pavimento com um termômetro digital e 01 auxiliar para informar ao motorista do caminhão quanto ao seu correto posicionamento em relação às estações de ensaio, ao eixo da via e verificar a distância correta dos pneus traseiros em relação à borda

do revestimento. O ensaio estava programado para ser realizado em 01 dia, mas uma das auxiliares passou mal devido a temperatura elevada. Logo, o levantamento foi realizado em dois dias consecutivos (17/11/2017 e 18/11/2017).

Inicialmente foram realizadas as demarcações das estacas na pista, cujos instrumentos utilizados foram: tinta, pincel e trena (fita de fibra de vidro de 30m) (Figura 30). Após a demarcação das estacas foi feita a medição da largura da pista (Figura 31). Em seguida, delimitou-se a linha de aplicação da carga em relação à borda do revestimento que variou de 0,90 m a 0,45 m, dependendo da largura da pista no local da estaca, conforme a Tabela 1 (Figura 32).

Figura 30 - Demarcação da estaca inicial em campo

Fonte: O autor (2017)

Figura 31 - Medição da largura da pista

Fonte: O autor (2017)

Figura 32 - Demarcação da linha de aplicação da carga

Fonte: O autor (2017)

O deslocamento do veículo foi realizado de forma padronizada e orientado por um auxiliar para o deslocamento de 25 cm para o cálculo de curvatura (Figura 33) e após 10 m do ponto inicial para obter a leitura final da deflexão.

Figura 33 - Demarcação da posição intermediária de 25cm

Fonte: O autor (2017)

Em todas as estações de ensaio foram determinadas as deflexões máximas recuperáveis do pavimento e intermediárias (D_{25}) para o raio de curvatura. O Apêndice C mostra detalhadamente o procedimento de execução do ensaio em campo com a viga Benkelman.

Alguns momentos da realização deste ensaio estão retratados nas Figuras 34 a 38.

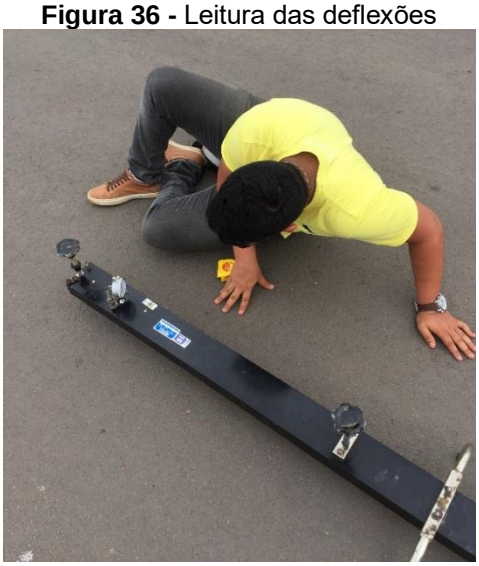
Figura 34 - Posicionamento da viga no pavimento

Fonte: O autor (2017)

Figura 35 - Liberação da trava de segurança

Fonte: O autor (2017)

Figura 36 - Leitura das deflexões



Fonte: O autor (2017)

Figura 37 - Aferição da temperatura do pavimento

Fonte: O autor (2017)

Figura 38 - Posicionamento da ponta de prova entre os pneus

Fonte: O autor (2017)

Após a realização dos levantamentos deflectométricos em campo, os dados obtidos foram tratados e analisados por meio de planilhas eletrônicas, para calcular as deflexões recuperáveis máximas e os raios de curvatura de cada estação de ensaio com maior rapidez e confiabilidade.

6 RESULTADOS

6.1 Aferição da viga Benkelman

Os valores do intervalo de confiança admitidos na aferição da viga Benkelman tradicional foram α_i = 1,90 e β_i = 2,10, devido a relação entre braços (a/b) da viga ser de 2:1, como mostra a Tabela 3, segundo o DNER 175/94 – PRO.

Tabela 3 - Intervalos de confiança em função da relação entre braços da viga

Relação entre braços da viga (a/b)	Intervalo de confiança αi - βi
2:1	1,90 - 2,10
3:1	2,85 - 3,15
4:1	3,80 - 4,20

Fonte: DNER (1994b)

As leituras obtidas no extensômetro da viga foram organizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Leituras no extensômetro da viga

Leitura de Prensa Xpi	Leitura da viga Xvi (centímetros de mm)	
(0,01 mm)	1ª determinação	2ª determinação
0	0	0
10	4	4
20	7	7
30	10	10
40	15	14
50	20	18
60	22	23
70	27	28
80	31	33
100	39	42
120	52	50
140	62	61
160	70	71
180	81	82
200	93	90
220	103	99

Fonte: O autor (2017)

Para as duas operações realizadas, as relações entre as leituras obtidas no extensômetro solidário à prensa (X_{pi}) e as equivalentes lidas no extensômetro da viga (X_{vi}) foram:

$$X_i = \frac{X_{pi}}{X_{vi}} \tag{11}$$

Tabela 5 - Relações entre extensômetros

Relação: Xpi/Xvi	
1ª determinação	**2ª determinação**
0	0
2,50	2,50
2,86	2,86
3,00	3,00
2,67	2,86
2,50	2,78
2,73	2,61
2,59	2,50
2,58	2,42
2,56	2,38
2,31	2,40
2,26	2,30
2,29	2,25
2,22	2,20
2,15	2,22
2,14	2,22

Fonte: O autor (2017)

A média aritmética da relação é calculada da seguinte forma:

$$X_m = \frac{\sum X_i}{N} \; ; \; X_m = 2{,}495 \tag{12}$$

Onde:

X_m – Média aritmética;

X_i – Relações entre leituras;

N – Quantidade de leituras (N≥30).

Cálculo do desvio-padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{N-1}} \; ; \; \sigma = 0{,}258 \tag{13}$$

Onde:

σ – Desvio-padrão;

X_m – Média aritmética;

X_i – Relações entre leituras;

N – Quantidade de leituras (N≥30).

Cálculo do desvio-padrão da média:

$$\sigma(X_m) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \; ; \; \sigma(X_m) = 0{,}046 \tag{14}$$

Onde:

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

σ – Desvio-padrão;

N – Quantidade de leituras (N≥30).

Cálculo do erro de estimativa da média:

$$\varepsilon = 2{,}045 \, . \sigma(X_m) \; ; \; \varepsilon = 0{,}093 \tag{15}$$

Onde:

ε – Erro de estimativa da média;

$\sigma(X_m)$ – Desvio-padrão da média.

Cálculo dos limites dos intervalos de confiança da estimativa da média:

$$L_i = X_m - \varepsilon \; ; \; L_i = 2{,}402 \tag{16}$$

$$L_s = X_m + \varepsilon \; ; \; L_s = 2{,}589 \tag{17}$$

Onde:

L_i – Limite inferior;

L_s – Limite superior;

X_m – Média aritmética;

ε – Erro de estimativa da média.

De acordo com os critérios de aceitação ou rejeição propostos pela norma DNER 175/94 – PRO e apresentados na Tabela 6, a viga é aceita, estando inclusa no CASO III.

Tabela 6 - Critérios de aceitação e rejeição da viga

CASO I	Se $L_i \geq \alpha_i$ e $L_s \leq \beta_i$ a viga é aceita
CASO II	Se $L_i < \alpha_i$ e $L_s > \beta_i$ a viga é rejeitada
CASO III	Se [($L_i > \alpha_i$ e $L_s > \beta_i$) ou ($L_i < \alpha_i$ e $L_s < \beta_i$)] mas $\varepsilon < (\beta_i - \alpha_i)/2$ a viga é aceita
CASO IV	Se [($L_i > \alpha_i$ e $L_s > \beta_i$) ou ($L_i < \alpha_i$ e $L_s < \beta_i$)] mas $\varepsilon \geq (\beta_i - \alpha_i)/2$ a viga é rejeitada

Fonte: DNER (1994b)

Como a viga foi aceita de acordo com o CASO III, a constante (K) a ser adotada para calcular as medidas de deflexões, segue o que está descrito na Tabela 7.

Tabela 7 - Critérios para o cálculo da constante da viga

CASO I	$K = \alpha_i + (\beta_i - \alpha_i)/2$
CASO III	$K = X_m$

Fonte: DNER (1994b)

Logo, a constante da viga será $K = 2{,}495$.

Após a realização da aferição da viga Benkelman tradicional, foi elaborada uma planilha automatizada no programa Microsoft Excel 2013 para o tratamento dos dados obtidos pretendendo avaliar a aceitação ou rejeição da mesma e determinar o valor da constante a ser adotado no cálculo das deflexões. O desenvolvimento da planilha teve como finalidade otimizar o processo, diminuir o tempo de cálculo, aumentar a precisão e confiabilidade nos valores apresentados, servindo como comprovação documental (Apêndice D) de aprovação ou rejeição da mesma em laboratório.

6.2 Avaliação em campo

Durante a campanha de medições foram aferidas as temperaturas em cada estaca ao longo dos trechos, conforme apresenta a Tabela 8.

Tabela 8 - Temperatura na superfície do revestimento

Trecho	Estaca	Temperatura do pavimento (°C)	Trecho	Estaca	Temperatura do pavimento (°C)
01	01	40	02	36	45
01	02	36	02	37	-
01	03	43	02	38	42
01	04	38	02	39	41
01	05	43	02	40	43

Trecho	Estaca	Temperatura do pavimento (°C)	Trecho	Estaca	Temperatura do pavimento (°C)
01	06	39	02	41	39
01	07	44	02	42	45
01	08	41	02	43	39
01	09	44	02	44	40
01	10	39	02	45	39
01	11	46	02	46	42
01	12	41	03	47	40
01	13	46	03	48	43
01	14	-	03	49	41
01	15	47	03	50	41
01	16	42	03	51	45
01	17	40	03	52	41
01	18	42	03	53	42
01	19	44	03	54	43
01	20	43	03	55	39
01	21	44	03	56	45
01	22	43	03	57	38
01	23	43	04	58	41
01	24	42	04	59	41
01	25	44	04	60	41
01	26	43	04	61	41
01	27	43	04	62	41
02	28	45	04	63	41
02	29	40	04	64	41
02	30	45	04	65	40
02	31	41	04	66	41
02	32	44	05	67	36
02	33	43	05	68	37
02	34	49	05	69	35
02	35	42	05	70	36

Fonte: O autor (2017)

Em seguida foram medidas as deflexões máximas recuperáveis, intermediárias e finais em cada estaca. Posteriormente, foi feita a correção nos valores das deflexões máximas por efeito da temperatura em cada estaca ao longo dos trechos, conforme mostra a Tabela 9, considerando a espessura do revestimento igual a 4 cm (valor obtido na empresa responsável pela execução do projeto geométrico das vias). Não foi possível realizar as medições nas estacas 14 e 37 devido a carros estacionados sobre a estaca.

Tabela 9 - Deflexões corrigidas pelo efeito da temperatura

Estaca	Deflexão Máxima (10^{-2}mm)	Deflexão Máxima Corrigida pela Temperatura (10^{-2}mm)	Estaca	Deflexão Máxima (10^{-2}mm)	Deflexão Máxima Corrigida pela Temperatura (10^{-2}mm)
01	81,75	75,69	36	37,25	33,86
02	32,5	30,55	37	-	-
03	22,5	20,6	38	28,75	26,42
04	43	40,11	39	28,25	26,06
05	97,5	89,29	40	31,25	28,62
06	56,25	52,28	41	34,75	32,3
07	88,75	80,98	42	35	31,82
08	61,25	56,5	43	34,25	31,83
09	128,75	117,47	44	19,5	18,06
10	67,5	62,73	45	41,5	38,57
11	63,75	57,74	46	25,25	23,21
12	37,75	34,82	47	52,75	48,84
13	60	54,35	48	105,5	96,61
14	-	-	49	33,75	31,13
15	67,5	60,92	50	33,75	31,13
16	52,75	48,48	51	27,5	25
17	59,25	54,86	52	52,5	48,43
18	63,75	58,59	53	67	61,58
19	43,75	39,92	54	37,25	34,11
20	56,75	51,97	55	45,5	42,29
21	37,25	33,99	56	30	27,27
22	59,25	54,26	57	46,75	43,61
23	33,75	30,91	58	39,5	36,44
24	64,25	59,05	59	59,25	54,66
25	63,25	57,71	60	42,75	39,44
26	40,25	36,86	61	29,25	26,98
27	58,75	53,8	62	33,75	31,13
28	35	31,82	63	41,25	38,05
29	31,5	29,17	64	76,5	70,57
30	32,5	29,55	65	40	37,04
31	28,25	26,06	66	62	57,2
32	31,5	28,74	67	2,5	2,35
33	26,25	24,04	68	4	3,75
34	34	30,47	69	40,5	38,21
35	12,5	11,49	70	270	253,76

Fonte: O autor (2017)

No levantamento deflectométrico dos trechos 03 e 04, o extensômetro da viga sofreu oscilações frequentes causadas pelo vento. Os demais trechos não

sofreram interferência desta natureza em função da via estar paralela à direção do vento.

O Apêndice E mostra as planilhas desenvolvidas para o levantamento deflectométrico utilizando a viga Benkelman tradicional e preenchidas com as leituras do extensômetro, os valores das deflexões e raios de curvatura das estacas de cada trecho analisado.

6.3 Cálculo dos parâmetros de avaliação estrutural

6.3.1 Número de tráfego "N"

Para o cálculo estimativo do número de tráfego no trecho 01, foram utilizados os seguintes dados:

a) Fator direcional (F_D): 100%;
b) Fator regional (F_R): 1,0;
c) Fator de correção sazonal (F_s): 1,0.

O número de veículos (V_0) que trafegam diariamente em cada faixa de tráfego do trecho 01 foi obtido por meio de entrevista com fiscal da empresa de transportes coletivos, no ponto final de ônibus do campus e equivale a 162 ônibus.

Cálculo do volume total de tráfego atual, em um sentido:

$$V_t = 365 \,.\, V_0 \;;\; V_t = 0{,}6 \,.\, 10^5 \text{ veículos} \tag{18}$$

Onde:

V_t – Volume total de tráfego;

V_0 – Volume médio diário;

Cálculo do fator de veículo:

$$F_V = \frac{\sum Feq}{nº\ eixos} \;;\; FV = 1{,}785 \tag{19}$$

O Apêndice F apresenta a tabela de obtenção do fator de equivalência (Feq) e do número de eixos.

Cálculo do número de solicitações no ano do levantamento do eixo-padrão no trecho 01:

$$N = V_t \,.\, F_V \,.\, F_D \,.\, F_R \,.\, F_s \;;\; N = 1{,}07 \,.\, 10^5 \tag{20}$$

Logo, o número de solicitações atual de tráfego no trecho 01 será de $1{,}07 \,.\, 10^5$, e nos trechos 02, 03, 04 e 05 será adotado o mínimo, que equivale a 10^5 (tráfego leve).

6.3.2 Deflexão real

Após a correção das deflexões máximas recuperáveis pelo efeito da temperatura, realizou-se a correção pelo efeito da sazonalidade para a obtenção das deflexões máximas reais que estão apresentadas na Tabela 10.

O fator de correção sazonal utilizado foi 1,20.

$$D_R = D_{20°C} \; x \; F_s \tag{6}$$

Onde:

D_R – Deflexão real ou deflexão característica corrigida, em 0,01 mm;

$D_{20°C}$ – Deflexão característica corrigida pela temperatura, obtida no levantamento deflectométrico;

F_s – Fator de correção sazonal.

Tabela 10 - Deflexões máximas reais

Trecho	Estaca	Deflexão Máxima Real (10^{-2}mm)	Trecho	Estaca	Deflexão Máxima Real (10^{-2}mm)
01	01	90,83	02	36	40,63
01	02	36,66	02	37	-
01	03	24,72	02	38	31,7
01	04	48,13	02	39	31,27
01	05	107,15	02	40	34,34
01	06	62,74	02	41	38,76
01	07	97,18	02	42	38,18
01	08	67,8	02	43	38,2
01	09	140,96	02	44	21,67
01	10	75,28	02	45	46,28
01	11	69,29	02	46	27,85
01	12	41,78	03	47	58,61
01	13	65,22	03	48	115,93
01	14	-	03	49	37,36
01	15	73,1	03	50	37,36
01	16	58,18	03	51	30
01	17	65,83	03	52	58,12

Trecho	Estaca	Deflexão Máxima Real (10^{-2}mm)	Trecho	Estaca	Deflexão Máxima Real (10^{-2}mm)
01	18	70,31	03	53	73,9
01	19	47,9	03	54	40,93
01	20	62,36	03	55	50,75
01	21	40,79	03	56	32,72
01	22	65,11	03	57	52,33
01	23	37,09	04	58	43,73
01	24	70,86	04	59	65,59
01	25	69,25	04	60	47,33
01	26	44,23	04	61	32,38
01	27	64,56	04	62	37,36
02	28	38,18	04	63	45,66
02	29	35	04	64	84,68
02	30	35,46	04	65	44,45
02	31	31,27	04	66	68,64
02	32	34,49	05	67	2,82
02	33	28,85	05	68	4,5
02	34	36,56	05	69	45,85
02	35	13,79	05	70	304,51

Fonte: O autor (2017)

6.3.3 Raio de Curvatura

Para calcular o raio de curvatura das estações de ensaio, foram necessárias as deflexões inicial (D_0) e intermediária correspondente a 25 cm da ponta de prova (D_{25}), em centésimos de milímetros e utilizou-se a seguinte expressão:

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \tag{4}$$

A Tabela 11 apresenta os valores dos raios de curvatura obtidos em cada estaca.

Tabela 11 - Raios de curvatura das estacas

Trecho	Estaca	Raio de Curvatura (m)	Trecho	Estaca	Raio de Curvatura (m)
01	01	284	02	36	156
01	02	250	02	37	-
01	03	481	02	38	417
01	04	313	02	39	272
01	05	51	02	40	192

Trecho	Estaca	Raio de Curvatura (m)	Trecho	Estaca	Raio de Curvatura (m)
01	06	114	02	41	154
01	07	100	02	42	250
01	08	100	02	43	133
01	09	51	02	44	255
01	10	100	02	45	102
01	11	158	02	46	171
01	12	154	03	47	236
01	13	167	03	48	368
01	14	-	03	49	481
01	15	120	03	50	192
01	16	167	03	51	46
01	17	151	03	52	156
01	18	84	03	53	179
01	19	100	03	54	198
01	20	104	03	55	208
01	21	266	03	56	147
01	22	79	03	57	202
01	23	245	04	58	250
01	24	110	04	59	160
01	25	137	04	60	96
01	26	250	04	61	121
01	27	205	04	62	357
02	28	417	04	63	236
02	29	260	04	64	160
02	30	313	04	65	208
02	31	223	04	66	68
02	32	195	05	67	2500
02	33	833	05	68	6250
02	34	162	05	69	250
02	35	521	05	70	12

Fonte: O autor (2017)

6.3.4 Deflexão admissível

Para o cálculo da deflexão admissível no trecho 01, adota-se $\mathrm{N} = 1{,}07\,.\,10^5$. Logo, tem-se:

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

$$D_{adm} = 10^{(3{,}01 - 0{,}176 \log 1{,}07\,.\;10^5)}$$

$$D_{adm} = 133{,}30\,.\,10^{-2}\ mm$$

Já para o cálculo da deflexão admissível nos trechos 02, 03, 04 e 05, adota-se $\mathrm{N} = 10^5$. Logo, tem-se:

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

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

$$D_{adm} = 134{,}90\,.\,10^{-2}\ mm$$

Onde:

D_{adm} – Deflexão admissível em centésimos de milímetro;

N – Número de solicitações do eixo padrão no ano do levantamento;

6.4 Avaliação estrutural das estacas

Mediante os resultados dos critérios de avaliação estrutural, as Tabelas 12 a 16 apresentam resumidamente esses parâmetros para os trechos 01, 02, 03, 04 e 05.

Tabela 12 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 01

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
01	90,83	284		
02	36,66	250	133,30	$1{,}07\,.\,10^5$
03	24,72	481		
04	48,13	313		
05	107,15	51		
06	62,74	114		
07	97,18	100		
08	67,8	100		
09	140,96	51		
10	75,28	100		
11	69,29	158		
12	41,78	154		
13	65,22	167		
14	-	-		
15	73,1	120		
16	58,18	167		
17	65,83	151		
18	70,31	84		
19	47,9	100		

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
20	62,36	104		
21	40,79	266	133,30	$1{,}07 \,.\, 10^5$
22	65,11	79		
23	37,09	245		
24	70,86	110		
25	69,25	137		
26	44,23	250		
27	64,56	205		

Fonte: O autor (2017)

Tabela 13 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 02

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
28	38,18	417		
29	35	260	134,9	10^5
30	35,46	313		
31	31,27	223		
32	34,49	195		
33	28,85	833		
34	36,56	162		
35	13,79	521		
36	40,63	156		
37	-	-		
38	31,7	417		
39	31,27	272		
40	34,34	192		
41	38,76	154		
42	38,18	250		
43	38,2	133		
44	21,67	255		
45	46,28	102		
46	27,85	171		

Fonte: O autor (2017)

Tabela 14 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 03

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
47	58,61	236		
48	115,93	368	134,9	10^5
49	37,36	481		
50	37,36	192		
51	30	46		
52	58,12	156		
53	73,9	179		
54	40,93	198		

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
55	50,75	208		
56	32,72	147	134,9	10^5
57	52,33	202		

Fonte: O autor (2017)

Tabela 15 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 04

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
58	43,73	250		
59	65,59	160	134,9	10^5
60	47,33	96		
61	32,38	121		
62	37,36	357		
63	45,66	236		
64	84,68	160		
65	44,45	208		
66	68,64	68		

Fonte: O autor (2017)

Tabela 16 - Critérios de avaliação estrutural no trecho 05

Estaca	D_R (10^{-2}mm)	Raio de curvatura (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	N
67	2,82	2500		
68	4,5	6250	134,9	10^5
69	45,85	250		
70	304,51	12		

Fonte: O autor (2017)

Para melhor visualização, as planilhas de classificação das hipóteses para avaliação estrutural seguem a formatação descrita na Tabela 17.

Tabela 17 - Classificação das hipóteses

	BOA
	REGULAR
	REGULAR PARA MÁ
	MÁ

Fonte: O autor (2017)

As Tabelas 18 a 22 mostram a avaliação estrutural de cada estaca em cada trecho de acordo com as hipóteses e medidas corretivas propostas pela norma DNER PRO – 011/79.

Tabela 18 – Medidas corretivas nas estacas do trecho 01

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
01	I	Apenas correções de superfície
02	I	Apenas correções de superfície
03	I	Apenas correções de superfície
04	I	Apenas correções de superfície
05	III	Reforço ou Reconstrução
06	I	Apenas correções de superfície
07	I	Apenas correções de superfície
08	I	Apenas correções de superfície
09	IV	Reforço ou Reconstrução
10	I	Apenas correções de superfície
11	I	Apenas correções de superfície
12	I	Apenas correções de superfície
13	I	Apenas correções de superfície
14	-	-
15	I	Apenas correções de superfície
16	I	Apenas correções de superfície
17	I	Apenas correções de superfície
18	III	Reforço ou Reconstrução
19	I	Apenas correções de superfície
20	I	Apenas correções de superfície
21	I	Apenas correções de superfície
22	III	Reforço ou Reconstrução
23	I	Apenas correções de superfície
24	I	Apenas correções de superfície
25	I	Apenas correções de superfície
26	I	Apenas correções de superfície
27	I	Apenas correções de superfície

Fonte: O autor (2017)

Tabela 19 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 02

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
28	I	Apenas correções de superfície
29	I	Apenas correções de superfície
30	I	Apenas correções de superfície
31	I	Apenas correções de superfície
32	I	Apenas correções de superfície
33	I	Apenas correções de superfície
34	I	Apenas correções de superfície
35	I	Apenas correções de superfície
36	I	Apenas correções de superfície
37	-	-
38	I	Apenas correções de superfície
39	I	Apenas correções de superfície

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
40	I	Apenas correções de superfície
41	I	Apenas correções de superfície
42	I	Apenas correções de superfície
43	I	Apenas correções de superfície
44	I	Apenas correções de superfície
45	I	Apenas correções de superfície
46	I	Apenas correções de superfície

Fonte: O autor (2017)

Tabela 20 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 03

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
47	I	Apenas correções de superfície
48	I	Apenas correções de superfície
49	I	Apenas correções de superfície
50	I	Apenas correções de superfície
51	III	Reforço ou Reconstrução
52	I	Apenas correções de superfície
53	I	Apenas correções de superfície
54	I	Apenas correções de superfície
55	I	Apenas correções de superfície
56	I	Apenas correções de superfície
57	I	Apenas correções de superfície

Fonte: O autor (2017)

Tabela 21 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 04

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
58	I	Apenas correções de superfície
59	I	Apenas correções de superfície
60	III	Reforço ou Reconstrução
61	I	Apenas correções de superfície
62	I	Apenas correções de superfície
63	I	Apenas correções de superfície
64	I	Apenas correções de superfície
65	I	Apenas correções de superfície
66	III	Reforço ou Reconstrução

Fonte: O autor (2017)

Tabela 22 - Medidas corretivas nas estacas do trecho 05

Estaca	Hipótese	Medidas Corretivas
67	I	Apenas correções de superfície
68	I	Apenas correções de superfície
69	I	Apenas correções de superfície
70	IV	Reforço ou Reconstrução

Fonte: O autor (2017)

6.5 Avaliação estrutural global dos segmentos

Para realizar uma avaliação estrutural de forma global em um segmento é necessário analisar estatisticamente as deflexões recuperáveis obtidas na campanha de medição. Logo, foi calculada a média aritmética e o desvio-padrão das deflexões elásticas e dos raios de curvatura. E posteriormente, foi calculada a deflexão característica e o raio de curvatura característico para cada trecho.

A deflexão característica no trecho 01 foi calculada da seguinte forma:

Cálculo da média aritmética (D):

$$D = \frac{\sum D_R}{n} \; ; \; D = 66{,}66 \tag{7}$$

Onde:

D – Média aritmética das deflexões;

D_R – Deflexões recuperáveis reais obtidas em campo, já corrigidas;

n - Número de valores individuais obtidos.

Cálculo do desvio-padrão (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_R - D)^2}{n-1}} \; ; \; \sigma = 24{,}98 \tag{8}$$

Cálculo da deflexão característica do trecho 01 (D_{p1}):

$$D_{p1} = D + \sigma \; ; \; D_{p1} = 91{,}64 \tag{10}$$

O cálculo do raio de curvatura característico foi realizado da seguinte maneira:

Cálculo da média aritmética (R):

$$R = \frac{\sum R_i}{n} \; ; \; R = 167 \tag{21}$$

Onde:

R – Raio de curvatura característico do trecho;

R_i – Raios de curvatura individuais;

n - Número de valores individuais obtidos.

Analogamente, foi realizada a análise estatística das deflexões elásticas e raios de curvatura para todos os trechos. Posteriormente, os trechos foram avaliados estruturalmente segundo a norma DNER PRO – 011/79 e obteve-se os resultados apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Avaliação estrutural dos segmentos

Trecho	D_p (10^{-2}mm)	R (m)	D_{adm} (10^{-2}mm)	Hipótese	Medidas Corretivas
01	89,71	167	133,3	I	Apenas correções de superfície
02	40,83	279	134,9	I	Apenas correções de superfície
03	78,02	219	134,9	I	Apenas correções de superfície
04	69,21	184	134,9	I	Apenas correções de superfície
05	234,19	2253	134,9	II	Reforço

Fonte: O autor (2017)

Segundo Ferreira (2007), quando um trecho possui baixas deflexões e grandes raios de curvatura significa que o pavimento está em bom estado. Tanto as camadas superiores como as inferiores estão dentro dos padrões de qualidade se a deflexão elástica superficial está obedecendo o valor máximo admissível. Que é o apresentado nos trechos 01, 02, 03 e 04.

Quando um trecho possui altas deflexões elásticas e grandes raios de curvatura, a princípio significa grandes deflexões no subleito que deve possuir materiais de baixa qualidade ou estar com umidade excessiva. O problema de qualidade do material do subleito independe dos materiais das camadas superiores que podem ter qualidade satisfatória ou não (FERREIRA, 2007). Que é o caso do trecho 05.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões principais

A partir da metodologia proposta, dos dados obtidos no levantamento deflectométrico e dos parâmetros estruturais avaliativos calculados, foi possível verificar a condição estrutural de cada trecho no segmento viário determinado, critério esse muito importante para definir o melhor conceito a ser adotado para o projeto de reforço ou restauração.

Logo, pode-se observar que os trechos 01, 02, 03 e 04, por possuírem baixas deflexões, estão em boas condições e com capacidade estrutural adequada para suportar as solicitações oriundas do tráfego.

O trecho 05 apresentou deflexão característica alta, logo, está em condição regular e precisa de medidas corretivas como reforço ou recapeamento do pavimento.

O trecho 01 foi o que apresentou deflexão máxima mais próxima da deflexão admissível. Portanto, é necessário dar prioridade para a execução de medidas corretivas na superfície do revestimento em razão do frequente tráfego de ônibus, como pintura asfáltica leve, selagem de trincas, entre outros.

Caso futuramente a Prefeitura do campus deseje alterar o sentido de circulação dos ônibus, os trechos 03 e 04 (segmentos viários construídos recentemente) e o trecho 02 (segmento recapeado recentemente) possuem capacidade estrutural suficiente para receber esforços oriundos desse tráfego.

A proposta de comparação das deflexões entre os trechos levantados serve apenas como dados para orientar o projetista na escolha da melhor solução do que pode ser executado.

Os ensaios executados comprovaram que os trechos 01, 02, 03 e 04, onde foram realizadas intervenções, estão com a qualidade técnica exigida por norma. O trecho 05, que ainda não sofreu intervenção, mas foi objeto de comparação, apresentou o que era esperado: necessidade de melhorias corretivas como reforço.

7.2 Sugestões

- Realizar avaliação funcional dos mesmos trechos para complementação desta pesquisa;
- Fazer estudo para determinar a espessura do reforço necessário para o trecho 05;
- Utilizar a viga Benkelman eletrônica para comparação dos dados obtidos com a viga tradicional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO - ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas.** Rio de Janeiro, 2. ed. 2010.

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

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

BORGES, C.B.S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**. Disponível em: < http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf>. Acesso em: 27 out. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS – DNER. **PRO 010/79**. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A. v. 1, Rio de Janeiro, 1979.

DNER. **PRO 011/79**. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B. v. 1, Rio de Janeiro, 1979.

DNER. **ME 024/94**. Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994a.

DNER. **PRO 175/94**. Aferição de viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **006/2003 – PRO**. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

DNIT. **PRO 007/2003**. Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

DNIT. **PRO 009/2003**. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

DNIT - **Manual de Estudos de Tráfego**. Publicação IPR-723. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT –. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-719. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Publicação IPR-720. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, Eng. Clovis Madruga. **Apostila Trabalhando com viga Benkelman**. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.xa.yimg.com/kq/groups/13240622/808742709/name/Deflectometria+2007.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.

HAAS, R.; HUDSON, W.R; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1994.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G. E ALBERNAZ, C.A.V. **Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para a avaliação estrutural de pavimentos**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, 1994.

MEDINA, J. de, MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2015.

MÜLLER; R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto.** Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

O'FLAHERTY, C. A. **Highway Engineering**. 3rd ed. Volume 2. London, 1988.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PREGO, A.S.S. **A Memória da Pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

PRESTES, M. P. **Métodos de avaliação visual de pavimentos flexíveis – Um estudo comparativo.** Dissertação de Mestrado profissionalizante. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de Técnicas para Avaliação Estrutural de Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos.** Dissertação (Mestrado em Ciências de Infraestrutura de Transportes), Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, São Paulo, 1996.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. ampl., São Paulo, Pini, 2007.

APÊNDICES

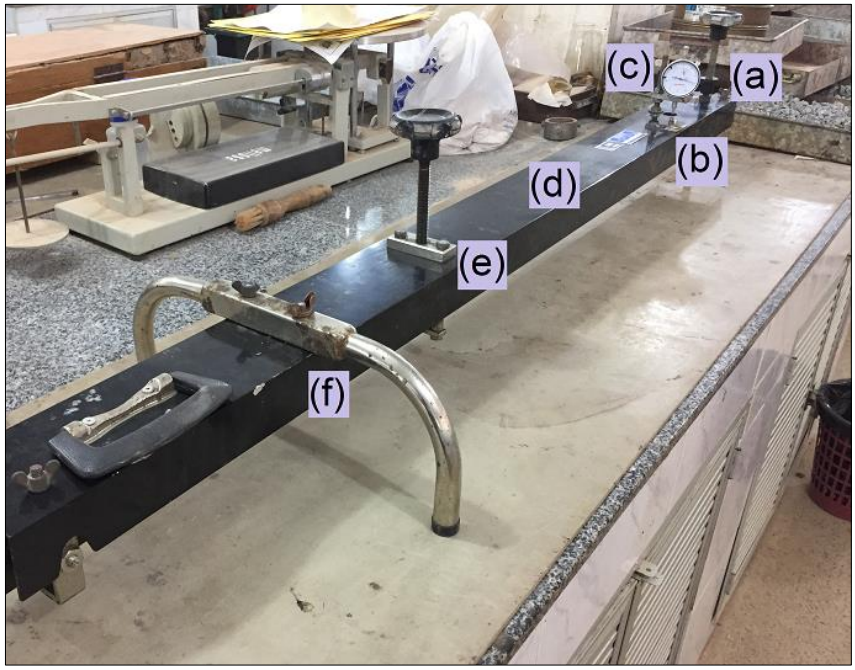
APÊNDICE A – MONTAGEM DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL

Para realizar a montagem da viga Benkelman tradicional é necessário seguir os passos:

1) Fixar a base de apoio ao braço menor da viga e apertar os parafusos;
2) Fixar o manípulo na extremidade do braço menor da viga e apertar os parafusos;
3) Conectar o braço maior, que contém a ponta de prova da viga, ao braço menor formando uma alavanca interfixa, por meio de parafusos;
4) Encaixar a trava de proteção na parte superior do equipamento;
5) O vibrador já é fixo ao equipamento;
6) Fixar o extensômetro analógico na viga;

Ao terminar a montagem, verificar se os parafusos e manípulo estão todos bem apertados. As Figuras 1 e 2 mostram a viga montada:

Figura 1 – Viga Benkelman tradicional



Fonte: O autor (2017)

Figura 2 – Viga Benkelman tradicional

Fonte: O autor (2017)

(a) Manípulo, suporte ou pé traseiro;

(b) Vibrador;

(c) Extensômetro analógico;

(d) Braço menor;

(e) Trava de proteção;

(f) Base de apoio ou pés dianteiros.

(g) Ponta de prova;

(h) Braço maior;

APÊNDICE B - AFERIÇÃO DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL

Segundo a norma DNER – PRO 175/94, o procedimento de aferição da viga Benkelman tradicional deve seguir as etapas:

a) Montagem e posicionamento da viga em uma bancada;
b) Nivelar o prato da prensa com a bancada;
c) Assentar a ponta do extensômetro analógico (ou digital) no prato da prensa e zerá-lo (Figura 1);
d) Apoiar a ponta de prova da viga no prato da prensa, para receber os movimentos verticais gerados pelo braço de alavanca;

Figura 1 – Posicionamento do extensômetro e da ponta de prova no prato da prensa

Fonte: O autor (2017)

e) Liberação da trava de proteção da viga;
f) Acionamento do vibrador, para evitar eventuais inibições do ponteiro do extensômetro;
g) Fixação e ajuste do extensômetro na viga;
h) Acionamento da manivela da prensa a uma velocidade de 0,5 mm/min, realizando as leituras no extensômetro analógico 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. Simultaneamente são feitas as leituras correspondentes no extensômetro fixado à viga.

Figura 2 – Leitura no extensômetro conectado à viga

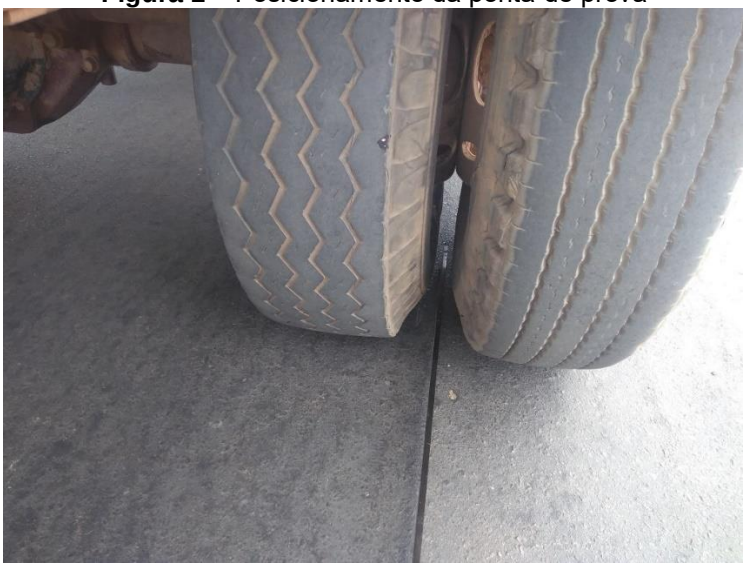
Fonte: O autor (2017)

APÊNDICE C - OPERAÇÃO DA VIGA BENKELMAN TRADICIONAL

A operação e utilização da viga Benkelman para a medição das deflexões segue o proposto pela norma DNER ME 024/94 cujas etapas estão descritas a seguir:

a) Com as estações de ensaio demarcadas, posicionar a roda traseira dupla do veículo de prova a uma distância prefixada da borda do revestimento, na trilha externa. O eixo de carga do caminhão deve ficar perpendicular ao eixo da pista de rolamento;
b) Introduzir a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus de roda dupla, coincidindo com o ponto selecionado;

Figura 1 – Posicionamento da ponta de prova



Fonte: O autor (2017)

Figura 2 – Posicionamento da viga Benkelman

Fonte: O autor (2017)

c) Liberar a trava da viga Benkelman;

Figura 3 – Liberação da trava da viga

Fonte: O autor (2017)

d) Ajustar o pé traseiro da viga de modo que o extensômetro fique, aproximadamente, a meio curso;

Figura 4 – Ajuste do pé traseiro

Fonte: O autor (2017)

e) Ligar o vibrador e fazer a leitura inicial (L_0) quando o extensômetro analógico indicar movimento igual ou menor que 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 (três) minutos da ligação do vibrador;

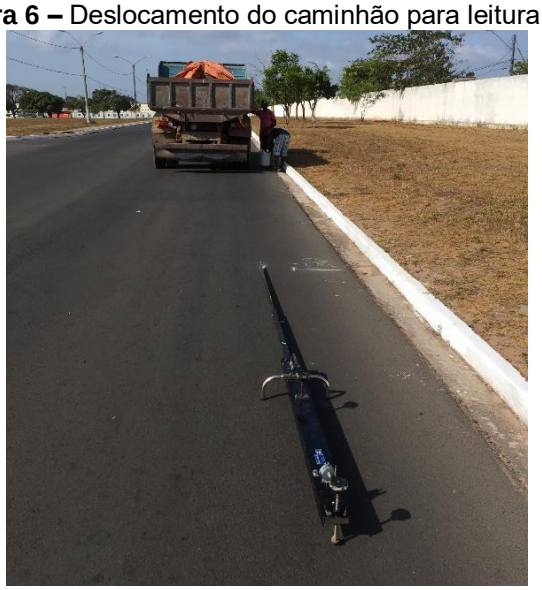
Figura 5 – Acionamento do vibrador

Fonte: O autor (2017)

f) Para a realização das leituras intermediárias, deslocar o caminhão lentamente para frente até que a sua referência atinja 25 cm. Com o caminhão parado e o vibrador ligado, efetuar a 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;

g) Após realizar a leitura intermediária, 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 (L_f) quando o extensômetro analógico indicar movimento igual ou menor que 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 (três) minutos.

Figura 6 – Deslocamento do caminhão para leitura final



Fonte: O autor (2017)

APÊNDICE D - CERTIFICADO DE AFERIÇÃO

AFERIÇÃO DE VIGA BENKELMAN - MÉTODO DNER-PRO 175/94

CERTIFICADO DE AFERIÇÃO

Viga nº.	ÚNICA	**Nº patrim.:**		**Lotação:**	LSP
Responsável pela aferição:	Igor Marcelo Silva Brandão			**Data:**	12/11/2017

Leitura de Prensa Xpi	Leitura da viga Xvi (centímetros de mm)		Relação: Xpi/Xvi	
(0,01 mm)	1ª determinação	2ª determinação	1ª determinação	2ª 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	18	2,50	2,78
60	22	23	2,73	2,61
70	27	28	2,59	2,50
80	31	33	2,58	2,42
100	39	42	2,56	2,38
120	52	50	2,31	2,40
140	62	61	2,26	2,30
160	70	71	2,29	2,25
180	81	82	2,22	2,20
200	93	90	2,15	2,22
220	103	99	2,14	2,22

ESTATÍSTICA

Média Geral - Xm =	2,495	Desvio Padrão - Dp =	0,258
D. padrão da Média - Dp (Xm) =	0,046	Erro de estimativa da Média - Es =	0,093
Limite inferior do intervalo de confiança da média - Li =	2,402	(Bi - Ai)/2 =	0,100
Limite superior do intervalo de confiança da média - Ls =	2,589		

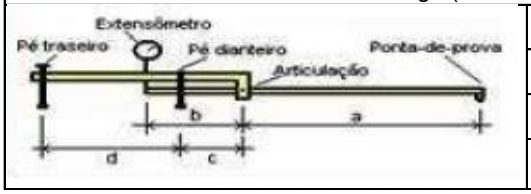
INTERVALO DE CONFIANÇA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS BRAÇOS DA VIGA	Relação entre braços da viga	Intervalo de Confiança	
	a/b	Maior que Ai	Menor que Bi
	2:1	1,90	2,10
	3:1	2,85	3,15
	4:1	3,80	4,20
Intervalo de confiança considerado		1,90	2,10

CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO

CASO I - Se Li >= Ai e Ls <= Bi a viga é aceita
CASO II - Se Li < Ai e Ls > Bi a viga é rejeitada
CASO III - Se [(Li > Ai e Ls > Bi) ou (Li < Ai e Ls < Bi)] mas Es < (Bi - Ai)/2 a viga é aceita
CASO IV - Se [(Li > Ai e Ls > Bi) ou (Li < Ai e Ls < Bi)] mas Es >= (Bi - Ai)/2 a viga é rejeitada

RESULTADO DA AFERIÇÃO

Aceitação/ Rejeição	**CASO III**	**VIGA ACEITA**
Constante para o cálculo das dflexões:	**2,50**	
Relação entre os braços da viga:	**1 : 2**	
Dimensões da Viga (em cm)		OBS:



a =	244
b =	122
c =	25,5
d =	114,3

APÊNDICE E - PLANILHAS DEFLECTOMÉTRICAS

	DEFLECTOMETRIA				
	RODOVIA:	Vias Internas do Campus Paulo VI - UEMA		**TRECHO:**	01
	PISTA:	Simples	**LADO:** DIR/ ESQ	**CARGA:**	8,2 t
OPERADOR:	Igor Brandão	**DATA LEVANTAMENTO:**	17/11/2017	K =	2,50

DEFLEXÕES MÁXIMAS E RAIOS DE CURVATURA	**DEFLEXÕES MEDIDAS NA CAMADA DE:**	
	REVESTIMENTO ASFÁLTICO	
VIGA BENKELMAN - RELAÇÃO: **1:2**	**ESTACA:**	01 a 27

EST/ KM	FLECHA	L_0	L_{25}	L_F	D_0	D_{25}	Raio (m)
01	-	503,5	499,1	470,8	81,75	70,75	284
02	-	461	456	448	32,5	20	250
03	-	583,5	580,9	574,5	22,5	16	481
04	-	472,2	468,2	455	43	33	313
05	-	481	456,5	442	97,5	36,25	51
06	-	473,5	462,5	451	56,25	28,75	114
07	-	483	470,5	447,5	88,75	57,5	100
08	-	449	436,5	424,5	61,25	30	100
09	-	429,5	405	378	128,75	67,5	51
10	-	468,5	456	441,5	67,5	36,25	100
11	-	460	452,1	434,5	63,75	44	158
12	-	473,1	465	458	37,75	17,5	154
13	-	470	462,5	446	60	41,25	167
14	-	-	-	-	-	-	
15	-	517,9	507,5	490,9	67,5	41,5	120
16	-	475	467,5	453,9	52,75	34	167
17	-	427,5	419,2	403,8	59,25	38,5	151
18	-	450	435,2	424,5	63,75	26,75	84
19	-	474,5	462	457	43,75	12,5	100
20	-	467,5	455,5	444,8	56,75	26,75	104
21	-	461,5	456,8	446,6	37,25	25,5	266
22	-	489,9	474	466,2	59,25	19,5	79
23	-	466	460,9	452,5	33,75	21	245
24	-	491,9	480,5	466,2	64,25	35,75	110
25	-	476,1	467	450,8	63,25	40,5	137
26	-	464,5	459,5	448,4	40,25	27,75	250
27	-	474,1	468	450,6	58,75	43,5	205

	DEFLECTOMETRIA					
	RODOVIA:	Vias Internas do Campus Paulo VI - UEMA			**TRECHO:**	02
	PISTA:	Simples	**LADO:**	DIR/ ESQ	**CARGA:**	8,2 t
OPERADOR:	Igor Brandão	**DATA LEVANTAMENTO:**		18/11/2017	K =	2,50

DEFLEXÕES MÁXIMAS E RAIOS DE CURVATURA	**DEFLEXÕES MEDIDAS NA CAMADA DE:**	
	REVESTIMENTO ASFÁLTICO	
VIGA BENKELMAN - RELAÇÃO: **1:2**	**ESTACA:**	28 a 46

EST/ KM	FLECHA	L_0	L_{25}	L_F	D_0	D_{25}	Raio (m)
28	-	481,5	478,5	467,5	35	27,5	417
29	-	479,8	475	467,2	31,5	19,5	260
30	-	484	480	471	32,5	22,5	313
31	-	474,5	468,9	463,2	28,25	14,25	223
32	-	483,6	477,2	471	31,5	15,5	195
33	-	473,5	472	463	26,25	22,5	833
34	-	479,8	472,1	466,2	34	14,75	162
35	-	478,2	475,8	473,2	12,5	6,5	521
36	-	465	457	450,1	37,25	17,25	156
37	-	-	-	-	-	-	-
38	-	476	473	464,5	28,75	21,25	417
39	-	494,5	489,9	483,2	28,25	16,75	272
40	-	468	461,5	455,5	31,25	15	192
41	-	472,2	464,1	458,3	34,75	14,5	154
42	-	476	471	462	35	22,5	250
43	-	477,2	467,8	463,5	34,25	10,75	133
44	-	480,9	476	473,1	19,5	7,25	255
45	-	471,1	458,9	454,5	41,5	11	102
46	-	477,9	470,6	467,8	25,25	7	171

	DEFLECTOMETRIA					
	RODOVIA:	Vias Internas do Campus Paulo VI - UEMA			TRECHO:	03
	PISTA:	Simples	LADO:	DIR/ ESQ	CARGA:	8,2 t
OPERADOR:	Igor Brandão	DATA LEVANTAMENTO:		18/11/2017	K =	2,50

DEFLEXÕES MÁXIMAS E RAIOS DE CURVATURA	DEFLEXÕES MEDIDAS NA CAMADA DE: REVESTIMENTO ASFÁLTICO	
VIGA BENKELMAN - RELAÇÃO: **1:2**	ESTACA:	47 a 57

EST/ KM	FLECHA	L_0	L_{25}	L_F	D_0	D_{25}	Raio (m)
47	-	471,1	465,8	450	52,75	39,5	236
48	-	467,2	463,8	425	105,5	97	368
49	-	473,8	471,2	460,3	33,75	27,25	481
50	-	464	457,5	450,5	33,75	17,5	192
51	-	474	447	463	27,5	-40	46
52	-	484	476	463	52,5	32,5	156
53	-	461	454	434,2	67	49,5	179
54	-	486,3	480	471,4	37,25	21,5	198
55	-	462,2	456,2	444	45,5	30,5	208
56	-	460,5	452	448,5	30	8,75	147
57	-	461,2	455	442,5	46,75	31,25	202

	DEFLECTOMETRIA					
	RODOVIA:	Vias Internas do Campus Paulo VI - UEMA			TRECHO:	04
	PISTA:	Simples	LADO:	DIR/ ESQ	CARGA:	8,2 t
OPERADOR:	Igor Brandão	DATA LEVANTAMENTO:		18/11/2017	K =	2,50

DEFLEXÕES MÁXIMAS E RAIOS DE CURVATURA	DEFLEXÕES MEDIDAS NA CAMADA DE: REVESTIMENTO ASFÁLTICO	
VIGA BENKELMAN - RELAÇÃO: **1:2**	ESTACA:	58 a 66

EST/ KM	FLECHA	L_0	L_{25}	L_F	D_0	D_{25}	Raio (m)
58	-	476	471	460,2	39,5	27	250
59	-	471,2	463,4	447,5	59,25	39,75	160
60	-	442	429	424,9	42,75	10,25	96
61	-	477,2	466,9	465,5	29,25	3,5	121
62	-	467,5	464	454	33,75	25	357
63	-	480,5	475,2	464	41,25	28	236
64	-	535,8	528	505,2	76,5	57	160
65	-	474	468	458	40	25	208
66	-	485	466,5	460,2	62	15,75	68

	DEFLECTOMETRIA					
	RODOVIA:	Vias Internas do Campus Paulo VI - UEMA			**TRECHO:**	05
	PISTA:	Simples	**LADO:**	Direito	**CARGA:**	8,2 t
OPERADOR:	Igor Brandão	**DATA LEVANTAMENTO:**		18/11/2017	K =	2,50

DEFLEXÕES MÁXIMAS E RAIOS DE CURVATURA	**DEFLEXÕES MEDIDAS NA CAMADA DE:**
	REVESTIMENTO ASFÁLTICO
VIGA BENKELMAN - RELAÇÃO: **1:2**	**ESTACA:** 67 a 70

EST/ KM	FLECHA	L_0	L_{25}	L_F	D_0	D_{25}	Raio (m)
67	-	469	468,5	468	2,5	1,25	2500
68	-	381,5	381,3	379,9	4	3,5	6250
69	-	459,2	454,2	443	40,5	28	250
70	-	563	462,5	455	270	18,75	12

APÊNDICE F – FATOR DE EQUIVALÊNCIA

TIPOS DE EIXOS	RODAGEM	CARGAS CONSIDERADAS (tf)	FATOR DE EQUIV. DE CARGA	TIPOS DE VEÍCULOS									TOTAL DE EIXO CARREGADO	∑Feq (TOTAL)
				ÔNIBUS	2C	3C	2 S1	2 S2	2 S3	3 S3	3 S4	3 S6		
Nº DE VEÍCULOS				162										
% DE VEÍCULOS VAZIOS				0										
VEÍCULOS CARREGADOS				162										
EIXO SIMPLES	SIMPLES	6	0,28	1									162	45,36
	+ taxa													
EIXO SIMPLES	DUPLO	10	3,29	1									162	532,98
	+ taxa													
TANDEM DUPLO	DUPLO													
	+ taxa													
TANDEM TRIPLO	DUPLO													
	+ taxa													
												∑EIXOS	324	578,34