

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAQUEL VELOSO CASTRO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE EM PAVIMENTOS COM
PARALELEPÍPEDO RESTAURADOS COM CONCRETO ASFÁLTICO NO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**

ALEGRETE

2023

RAQUEL VELOSO CASTRO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE EM PAVIMENTOS COM
PARALELEPÍPEDO RESTAURADOS COM CONCRETO ASFÁLTICO NO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

ALEGRETE

2023

RAQUEL VELOSO CASTRO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE EM PAVIMENTOS COM
PARALELEPÍPEDO RESTAURADOS COM CONCRETO ASFÁLTICO NO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 22 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2023, às 23:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2023, às 07:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2023, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1064227** e o código CRC **51ED106C**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que com seu perfeito e infinito amor me alcançou. Sendo sempre meu auxílio e meu socorro bem presente. Agradeço por toda sabedoria e graça, mesmo quando as tempestades e os dias maus chegavam, a mão do senhor me sustentou e retirou todo medo, me dando forças para continuar.

Ao meu noivo Gabriel Roggia, que sempre me auxiliou, incentivou e compreendeu os diversos momentos que eu estava ausente. Obrigada por todo companheirismo, paciência, cuidado e amor, foram pilares essenciais que auxiliaram para que eu pudesse concluir esta jornada.

À minha família que sempre, me concedeu todo suporte e motivação, sendo sempre fontes de incentivo para que eu pudesse alcançar este sonho. Em especial aos meu pai Francisco e minha mãe France Luciana, irmã Carine e as minhas avós Zaide e Eriane. Vocês são a base de toda minha formação profissional, pessoal e moral, agradeço por toda atenção, preocupação, dedicação e amor, sem vocês nada disso teria sido possível. Todos ensinamentos desde a minha formação, todo incentivo e todas sementes lançadas, hoje começam a dar frutos, que eu possa honrar e trazer muita felicidade a vida e ao coração de vocês.

Ao meu orientador Diego Arthur Hartmann, por todo conhecimento compartilhado, dedicação e todas as críticas construtivas possibilitando este trabalho ser concluído.

Aos professores da UNIPAMPA, por todos esses anos de dedicação e aprendizado, compartilhando seus conhecimentos com muita competência, concederam a base necessária para formar a futura profissional que serei.

A toda equipe da Secretaria de Planejamento, a qual fiz parte durante dois anos, em especial a minha amiga e diretora Érica Gonçalves de Vargas, que durante esse período orientou, compartilhou conhecimento e advertiu, sempre com muita tranquilidade e sabedoria, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional. E ao restante da equipe que deixaram muitas lembranças e saudades deste tempo de convívio.

A empresa Terrapias a qual faço parte atualmente, em especial seu Naury Pias, que tem compartilhado seu conhecimento e incentivado meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas de graduação, que estiveram comigo nesta jornada, por todos os momentos que ficarão para sempre na memória, os quais tenho muita consideração, carinho e admiração.

Aos meus amigos que sempre torceram por mim e me incentivaram, sempre dando forças e estando ao meu lado, entendendo as minhas ausências.

Não fiquem lembrando o que aconteceu no passado - isso não é nada comparado ao que Eu estou para fazer, uma coisa completamente nova! Algo que eu já comecei a realizar; será que vocês ainda não perceberam? Vou abrir uma grande estrada no deserto, e no meio da terra seca, farei correr rios.

Isaías 43:18-19

RESUMO

Dentre os modais de transportes utilizados, a malha rodoviária é a mais utilizada no Brasil, sendo um dos principais materiais utilizados para construção dessas vias o concreto asfáltico. Dessa forma, as pavimentações no país vêm crescendo de maneira rápida, principalmente as pavimentações em vias urbanas. Porém devido ao rápido crescimento urbano, essas vias que hoje precisam receber pavimentação asfáltica para melhorar as condições de fluxo, rolamento e conforto aos usuários, anteriormente foram pavimentadas com paralelepípedo. Assim sendo, tornou-se comum a aplicação de camada asfáltica diretamente sobre a pavimentação existente, por ser uma solução rápida e com custos iniciais menores. No entanto, a vida útil estimada para esses pavimentos é baixa se comparada aos outros métodos de pavimentação, em razão das patologias frequentes nesse tipo de pavimento. O presente estudo buscou através da utilização da Viga Benkelman, realizar o levantamento deflectométrico em via do município de Alegrete – RS executada em paralelepípedo, antes e depois da execução da restauração de revestimento asfáltico. Nesse sentido, foi utilizado o software BackMeDiNa para realização da retroanálise dos dados obtidos a partir dos ensaios com a Viga Benkelman, a mesma apresentou resultado satisfatório na realização das leituras. Após análise dos resultados, foi possível realizar a avaliação estrutural de todas as camadas do pavimento. Pela análise do raio de curvatura das bacias deflectométricas foi verificado que o pavimento não possui condições estruturais em quatro dos cinco pontos analisados. Desta forma, após a retroanálise, os módulos de resiliência obtidos nas camadas do pavimento são coerentes aos encontrados na literatura para a maioria dos pontos analisados, no entanto a camada de areia não apresentou módulo adequado para ser utilizado em pavimentação.

Palavras-chave: Paralelepípedo; Viga Benkelman; Reflexão de trincas; Retroanálise.

ABSTRACT

Among the modes of transport used, the road network is the most used in Brazil, with asphalt concrete being one of the main materials used for the construction of these roads. Thus, paving in the country has been growing rapidly, especially paving in urban roads. However, due to rapid urban growth, these roads that today need to be paved with asphalt to improve flow conditions, rolling and user comfort, were previously paved with parallelepipeds. Therefore, it has become common to apply an asphalt layer directly over the existing paving, as it is a quick solution with lower initial costs. However, the estimated service life for these pavements is low compared to other paving methods, due to the frequent pathologies in this type of pavement. The present study sought, through the use of the Benkelman Beam, to carry out a deflectometric survey on a road in the municipality of Alegrete - RS, executed in parallelepiped, before and after the execution of the restoration of the asphalt coating. In this sense, the BackMeDiNa software was used to carry out the back analysis of the data obtained from the tests with the Benkelman Beam, which presented a satisfactory result in carrying out the readings. After analyzing the results, it was possible to carry out a structural evaluation of all layers of the pavement. By analyzing the radius of curvature of the deflectometric basins, it was verified that the pavement does not have structural conditions in four of the five analyzed points. Thus, after the retroanalysis, the resilience modulus obtained in the pavement layers are consistent with those found in the literature for most of the analyzed points, however the sand layer did not present an adequate modulus to be used in paving.

Keywords: Parallelepiped; Benkelman Beam; Crack reflection; Retroanalysis

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação do funcionamento de um equipamento FWD..... | 18 |
| Figura 2 - Esquema de um deflectômetro de impacto | 18 |
| Figura 3 - Sistema da Viga Benkelman | 20 |
| Figura 4 - Composição da Viga Benkelman..... | 20 |
| Figura 5 - Relações matemáticas das hastes do equipamento | 21 |
| Figura 6 - Comparação entre bacias deflectométricas..... | 23 |
| Figura 7 - Diferença entre bacias deflectométricas | 23 |
| Figura 8 - Pavimento degradado em estágio avançado de reflexão de trincas | 25 |
| Figura 9 - Distribuição de tensões em revestimentos asfálticos trincados | 27 |
| Figura 10 - Estágios da formação de trincas..... | 28 |
| Figura 11 - Processo de reflexão de trincas | 28 |
| Figura 12 - Seção de pavimento com SAMI | 32 |
| Figura 13 - Seção Pavimento com geotêxtil..... | 33 |
| Figura 14 - Parâmetros para retroanálise | 35 |
| Figura 15 - Fluxograma de desenvolvimento do trabalho..... | 39 |
| Figura 16 - Localização dos pontos de análise na rua Vereador Carbonel..... | 40 |
| Figura 17 – Situação da via antes da restauração asfáltica..... | 41 |
| Figura 18 - Seção do pavimento a ser executado | 42 |
| Figura 19 – Caminhão e calibragem dos pneus..... | 43 |
| Figura 20 - Esquema de montagem para coleta de dados com câmera e trena | 44 |
| Figura 21 - Interface do software de vídeo..... | 45 |
| Figura 22 - Demarcação dos pontos no ensaio | 45 |
| Figura 23 - Relações entre dimensões da Viga Benkelman | 47 |
| Figura 24 - Bacia de deflexões com todos os pontos coletados | 48 |
| Figura 25 - Bacia deflectométrica com pontos ajustados | 49 |
| Figura 26 - Interface do programa BackMeDiNa..... | 50 |
| Figura 27 - Bacias deflectométricas dos ensaios | 52 |
| Figura 28 - Módulos de resiliência camada asfáltica | 57 |
| Figura 30 - Módulos de resiliência camada de paralelepípedo | 58 |
| Figura 31 - Módulos de resiliência camada de colchão de areia..... | 60 |
| Figura 32 - Módulos de resiliência subleito | 61 |
| Figura 33 - Comparação entre módulos do paralelepípedo..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 - Comparação entre módulos da camada de areia..... | 62 |
| Figura 35 - Comparação entre os módulos do subleito | 62 |

LISTAS DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Camadas do pavimento | 42 |
| Tabela 2 - Raios de curvatura | 53 |
| Tabela 3 - Módulos de resiliência antes do reforço | 56 |
| Tabela 4 - Módulos de resiliência após o reforço..... | 56 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------------|--|
| AEMC | Análise Elástica de Múltiplas Camadas |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| BPR | <i>Bureau of Public Roads</i> |
| CAP | Concreto Asfáltico de Petróleo |
| CBUQ | Concreto Betuminoso Usinado a Quente |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| <i>e.g.</i> | Exempli Gratia |
| ESRD | Eixo Simples de Roda Dupla |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FNR | Fundo Nacional rodoviário |
| FWD | <i>Falling Weight Deflectometer</i> |
| MR | Módulo de Resiliência |
| SAMI | <i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i> |
| TSCE | Teoria de Sistema de Camadas Elásticas |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Objetivos | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 1.2 | Justificativa | 14 |
| 1.3 | Estrutura do Trabalho | 16 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | Equipamentos de avaliação estrutural | 17 |
| 2.1.1 | FWD | 17 |
| 2.1.2 | Viga Benkelman | 19 |
| 2.2 | Bacia de Deflexões | 22 |
| 2.3 | Reflexão de Trincas | 24 |
| 2.3.1 | Causas | 25 |
| 2.3.2 | Consequências do fenômeno | 29 |
| 2.3.3 | Prevenção | 29 |
| 2.3.4 | Camadas Intermediárias | 30 |
| 2.4 | Retroanálise | 34 |
| 3 | METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 | Definição e caracterização do local de estudo | 40 |
| 3.2 | Realização do ensaio - Viga Benkelman | 42 |
| 3.3 | Ajuste dos dados | 46 |
| 3.4 | Determinação das bacias deflectométricas | 47 |
| 3.5 | Retroanálise | 49 |
| 4 | RESULTADOS | 51 |
| 4.1 | Bacias deflectométricas | 51 |
| 4.2 | Módulos de resiliência obtidos por retroanálise | 55 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 63 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 63 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| | APÊNDICE A | 67 |

1 INTRODUÇÃO

As primeiras pavimentações no Brasil iniciaram para o transporte do ouro no século XVIII, as quais foram crescendo conforme a necessidade dos novos produtos comercializados no país, que determinavam as rotas e regiões de crescimento populacional e de escoamento da produção, sendo as primeiras pavimentações construídas com rocha de macadame hidráulico ou rochas similares a esta.

Dessa forma, com o crescimento do país e com o avanço da frota de veículos surgiu a necessidade da construção de novas vias e rodovias. No entanto, o país desenvolveu-se lentamente na área de pavimentação e na área de planejamento de desenvolvimento, refletindo esses atrasos até os dias atuais. Nesse sentido, foi de grande relevância o desenvolvimento do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), pelo presidente Getúlio Vargas em 1937. No entanto, foi somente durante a guerra em 1942, que aconteceu o primeiro contato entre engenheiros brasileiros e norte-americanos, a partir da necessidade de execução de pistas de aeroportos e vias de acesso. Nesse ano o país contava com um dos menores índices de rodovias pavimentadas, somente 1.300 km (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Após isso destacam-se a criação do Decreto lei N.º 8.463, de 27 de dezembro de 1945, onde foi estabelecido o Fundo Rodoviário Nacional e reestruturou o DNER e a instituição do Fundo Nacional rodoviário (FNR) em 1946, imposto sobre os combustíveis que impulsionou a construção de rodovias.

O avanço nas pavimentações passou a ser de grande valor econômico, caracterizando um elevado patrimônio, é possível perceber isso pelas quantidades executadas anualmente anteriormente em pouca escala com as atuais em elevada taxa de quilômetros executados, que por consequência trouxe grande avanço nesta área por parte de todos setores envolvidos, desde estudos teóricos a técnicas e controles de execução, conservação e restauração (SENÇO, 2001).

A partir disso, torna-se evidente a necessidade de que as pavimentações garantam sua qualidade e vida útil, pois são um bem público e que não devem ter sua execução menosprezada, devendo sempre buscar soluções que garantam a qualidade da obra. Além disso, o pavimento deve ser desenvolvido com técnica determinada e economicamente desenvolvida a resistir aos esforços de solicitação do tráfego de veículos e do clima, garantindo aos condutores condições de rolamento, conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008). Porém esta não é a realidade em muitas vias em paralelepípedo, pois recebem uma camada asfáltica logo acima destes elementos.

Desse modo como são executadas muitas das pavimentações no Brasil, as quais não obedecem ao sistema construtivo de camadas, o revestimento asfáltico acaba recebendo tensões as quais não é dimensionado, desse modo, o sistema estrutural não trabalha adequadamente reduzindo a vida útil do pavimento.

Dessa maneira, este trabalho busca avaliar estruturalmente a execução de restauração asfáltica com concreto betuminoso usinado a quente, executado sobre paralelepípedo. Sendo assim a Viga Benkelman será utilizada para a realização dos ensaios deflectométricos, onde será utilizado o programa BackMeDiNa para retroanálise.

A escolha da via foi baseada na informação dos planos de pavimentação do município Alegrete/RS, onde a via Vereador Carbonel apresentava as características necessárias para o desenvolvimento do estudo e seria pavimentada durante o desenvolvimento do trabalho com capa asfáltica. Dessa forma, serão realizados levantamentos deflectométricos antes e depois da execução da capa asfáltica, em diversos pontos da via. Com os dados deflectométricos retirados a partir do ensaio de Viga Benkelman será realizada a retroanálise com o software BackMeDiNa, a fim de se obter os valores de módulo de resiliência do trecho em análise e posteriormente, será realizada a análise estrutural.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar estruturalmente a execução da restauração com concreto asfáltico de um pavimento de paralelepípedo em Alegrete-RS a partir de ensaios de Viga Benkelman e do programa MeDiNa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a aplicabilidade da Viga Benkelman em pavimentos de paralelepípedo;
- Comparar bacias deflectométricas antes e após a execução de uma camada de restauração.

1.2 Justificativa

As vias são uma importante parcela do sistema de infraestrutura das cidades, o trânsito nos conecta a lugares todos os dias, no entanto, a situação das pavimentações é um assunto recorrente pois apresentam diversas patologias que dificultam e causam transtorno aos usuários,

sendo este setor alimentado fundamentalmente com dinheiro público, garantir a qualidade das vias é de suma importância a todos cidadãos que contribuem com o estado.

Dessa forma, é importante buscar soluções para problemas já recorrentes, pensando em soluções e desenvolvendo métodos para garantir a qualidade dos pavimentos. Aliado a isto, a análise de deflexões é de grande importância para a avaliação da estrutura do pavimento, permitir a retroanálise do trecho e assim gerar diversas informações estruturais, auxiliando no desenvolvimento de soluções. Desse modo, busca-se aprimorar os métodos construtivos, procurando atingir resultados satisfatórios a todos com pavimentos de qualidade.

Uma forma muito recorrente de pavimentação são os pavimentos asfálticos sobre paralelepípedos, os mesmos apresentam diversas patologias, sendo assim necessário aprofundar estudos nessa área para conhecer o funcionamento estrutural e apresentar inovações.

À vista disso, na cidade de Alegrete-RS, que tem em sua malha viária urbana uma quantidade expressiva de pavimentos em paralelepípedo, há necessidade de melhorar a qualidade do fluxo de veículos, pois com o desenvolvimento da cidade e aumento do tráfego as vias em paralelepípedo foram ou estão sendo revestidas com uma camada de restauração em revestimento asfáltico. Desse modo, ao analisar a realidade das pavimentações da cidade, busca-se com o trabalho avaliar restaurações com concreto asfáltico no município, visto que a execução de camadas asfálticas diretamente sobre paralelepípedos é uma prática recorrente.

Sendo assim, o presente estudo será realizado na rua Vereador Carbonel na cidade de Alegrete, localizada na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, no bairro Vila Nova na região norte da cidade. A presente via de estudo é uma importante ligação de acesso a escolas, comércio e ao hospital da cidade, sendo utilizada também como rota do transporte público. A execução desta pavimentação proporcionará conforto e segurança aos diversos usuários que a utilizam.

Por conseguinte, busca compreender a transmissão dos esforços mecânicos no pavimento, contribuindo para a melhoria da qualidade das pavimentações urbanas nas cidades. A pavimentação que será executada foi dimensionada utilizando o método empírico do DNIT, no entanto este método em determinadas situações não é o adequado, resultando em um dimensionamento falho e deficiente, o qual não proporcionará uma vida útil adequada ao projeto.

Dessa forma, a análise das bacias deflectométricas proporcionará uma melhor avaliação da condição real da estrutura do pavimento, possibilitando determinar as melhores condições estruturais para o dimensionamento correto da via e todas as vantagens que isso proporcionará.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos para apresentação do estudo desenvolvido, sendo organizado da seguinte forma:

Está apresentado no primeiro capítulo a introdução do trabalho, os objetivos gerais e específicos do trabalho, assim como justifica a escolha do objeto de estudo. Desse modo, traz um resumo dos principais temas abordados nos capítulos seguintes.

No segundo capítulo está apresentado a revisão bibliográfica, com as contribuições teóricas que sustentam este estudo, abordando os principais objetos de estudo para o trabalho. Com a finalidade de abordar e explicar o funcionamento desse pavimento, a avaliação estrutural através das medidas de deflexão com a Viga Benkelman e o estudo de reflexão de trincas.

Está apresentado no terceiro capítulo toda metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Com a definição e caracterização do local de estudo apresentando toda descrição do trecho de via analisado, descreve o procedimento de realização utilizado no ensaio com a Viga Benkelman. Sendo também descrito todo processo de análise dos dados obtidos e o modo como foi desenvolvida a retroanálise dos pontos de estudo.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados obtidos no estudo e sua análise.

Está apresentado no quinto capítulo as considerações finais do presente trabalho.

Por fim, o trabalho é composto ainda pelas referências bibliográficas utilizadas para elaboração do estudo, assim como os anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Equipamentos de avaliação estrutural

Bernucci *et.al* (2008) destacam a importância do levantamento estrutural em todas as fases de uma via desde o projeto, construção, reparos e reforços dos pavimentos. Dessa forma, o estudo da estrutura dos pavimentos demonstra capacidade estrutural e de carga do pavimento, Branco, Pereira, Santos (2006) indicam que a capacidade estrutural é analisada a partir dos seguintes indicadores:

- Módulo de elasticidade dos materiais componentes em todas as seções do pavimento;
- Determinação da espessura das camadas de acordo com a vida útil desejada para o pavimento;
- Deflexão vertical do pavimento, em resposta às solicitações de cargas aplicadas.

Os equipamentos para medidas de deflexão podem ser classificados em dois grupos: deflectógrafos e deflectômetro. A diferença entre eles é basicamente como os equipamentos medem as deflexões. Deflectógrafos são medidores em movimento, dessa forma, eles podem coletar os dados em deslocamento com velocidade em torno de 3 a 18 km/h. Já os deflectômetros são medidores estacionários, neste caso, o equipamento deve parar no local requerido para realizar o ensaio, no entanto neste mesmo grupo já existem dois modelos de equipamentos a Viga Benkelman aparelho mais antigo e manual e o deflectômetro de impacto equipamento moderno que processa os dados através de sensores (BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

A partir disso os aparelhos denominados deflectômetros são: Viga Benkelman e Deflectômetro de Impacto (FWD). Dentre os modelos de deflectógrafos podem ser citados o curviâmetro e deflectógrafo FLASH.

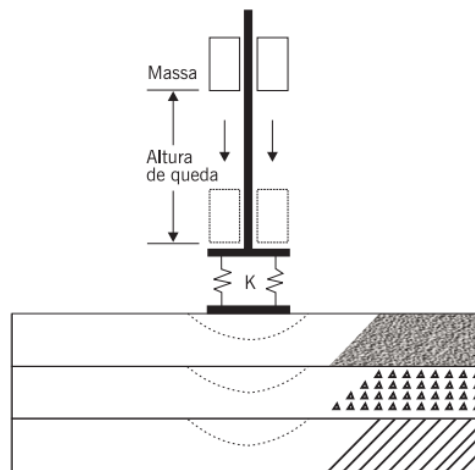
2.1.1 FWD

O *Falling Weight Deflectometer* (FWD) foi desenvolvido nos anos 1980 e implantado no Brasil em 1994. Equipamento rebocado por veículo leve, consiste em vários sensores que leem e processam as informações, as quais derivam de uma carga de impacto que é um peso que cai sobre amortecedores e transmitem a solicitação a placa rígida em aço sobre a camada

do pavimento. O equipamento coleta dados estruturais do pavimento a partir da resposta do mesmo a uma carga de impacto como está exposto na Figura 1. Os dados são lidos através de sensores instalados em posições pré-determinadas a fim de obter as leituras para a bacia de deflexões, desta maneira os dados recolhidos não têm influência dos operadores como na Viga Benkelman (DNER, 1996; BERNUCCI *et.al*, 2008; BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

O impacto transmite solicitações de cargas ao pavimento, desta forma, as respostas do pavimento a este impacto são medidas. Também são medidos os deslocamentos verticais na placa rígida e nos acelerômetros anexados ao sistema. A carga de impacto pode variar de 30 a 240 kN de acordo com a altura adotada para o peso, desta forma representa a passagem de um veículo entre 60 e 80 km/h (BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006). A partir disso, o esquema de montagem do equipamento pode ser visualizado na Figura 2, onde o equipamento é anexado a um reboque que estará acoplado a um veículo

Figura 1 - Representação do funcionamento de um equipamento FWD



Fonte: BERNUCCI *et.al*, (2008, p.450)

Figura 2 - Esquema de um deflectômetro de impacto



Fonte: BERNUCCI *et.al*, (2008, p.452)

2.1.2 Viga Benkelman

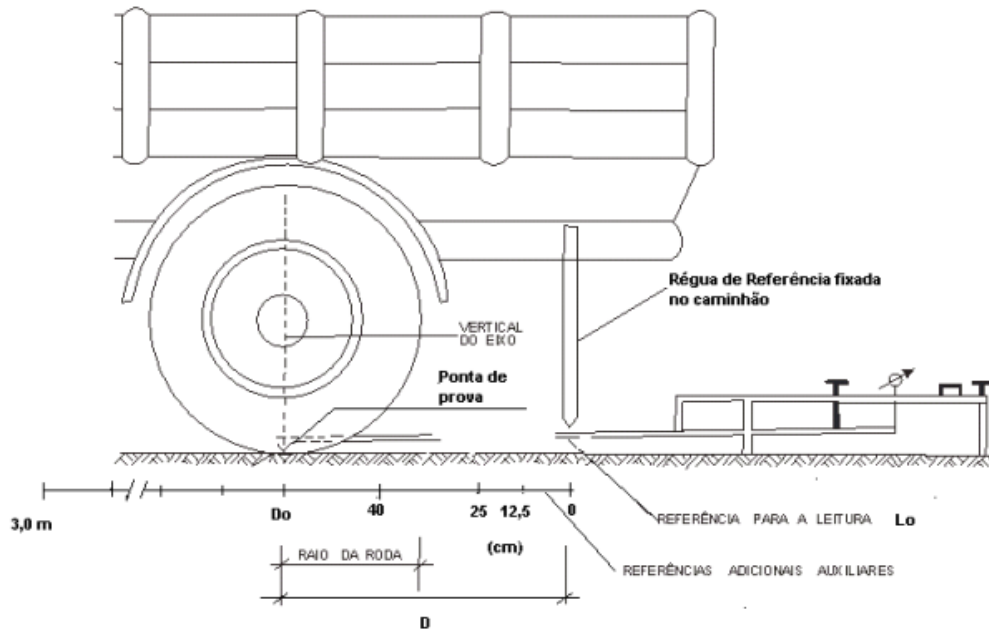
A Viga Benkelman é um equipamento empregado para aferir as deflexões em um pavimento (DNER-ME 024/94; DNIT 133/2010-ME). Recebeu este nome pois foi desenvolvido no ano de 1953, pelo engenheiro A.C. Benkelman, que trabalhava no *Bureau of Public Roads* (BPR) nos EUA, a Viga Benkelman é o aparelho mais utilizado e propagado no país, pois inclusive as normas de projetos rodoviários possuem seus modelos de cálculo seguindo os padrões deflectométricos da Viga Benkelman (BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006; BALBO, 2007).

Assim sendo, a Viga Benkelman foi, e ainda é, um dos aparelhos mais utilizados no mundo para realizar o levantamento deflectométrico e posteriormente analisar a capacidade estrutural do trecho em estudo. É utilizada de forma abrangente pois trata-se de um aparelho simples e de fácil manuseio e utilização, a mão de obra consegue aprender facilmente, o que auxilia sua utilização (ROCHA FILHO E RODRIGUES, 1998).

Inicialmente, para a realização do ensaio é de extrema importância que se conheça a viga a ser utilizada e que a mesma passe por uma aferição, cujo objetivo é verificar se o aparelho está em condições de uso e definir a constante de calibração que será empregada nos cálculos das deflexões. Para isto, utiliza-se a norma DNER-PRO 175/94, na qual estão descritas e fixadas as condições de aprovação ou reprovação da Viga Benkelman para realização do ensaio, e mediante aprovação também mostra o valor de constante para determinar as deflexões. À vista disso, a norma regulamentadora do ensaio é a DNIT 133/2010-ME, que determina todo o procedimento de ensaio, aparelhagem, posicionamentos, leituras e como desenvolver os cálculos para determinar as bacias de deflexões.

Isto posto, o equipamento é simples e composto por um conjunto de hastes metálicas, que com o auxílio de um caminhão de eixo simples de rodas duplas carregado com uma carga padronizada de 8,2 t, afere as deformações dos trechos (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; DNIT 133/2010-ME). Estão representados na Figura 3 e Figura 4 o esquema de orientação no equipamento com o caminhão e o detalhamento da composição da Viga Benkelman.

Figura 3 - Sistema da Viga Benkelman

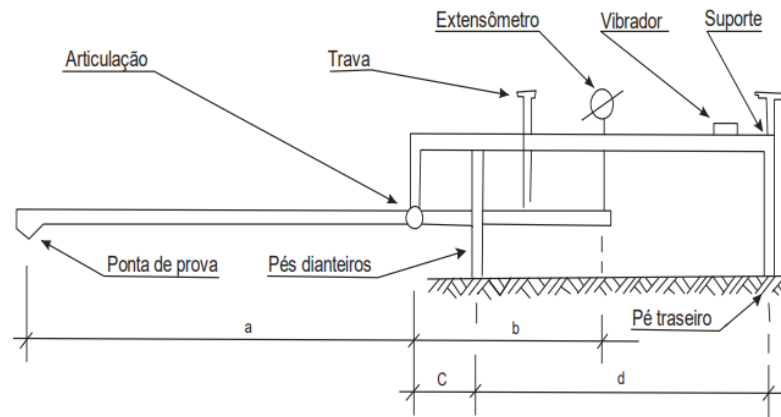


ONDE:

D = Distância marcada no braço maior da Viga Benkelman, de modo que a ponta de prova fique na vertical do eixo quando a régua de referência está em cima da marca

Fonte: DNIT 133/2010-ME.

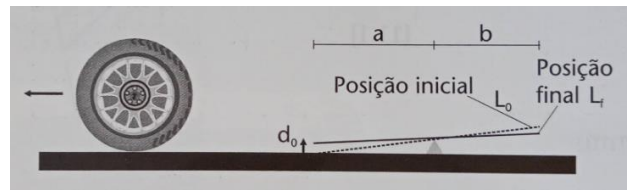
Figura 4 - Composição da Viga Benkelman



Fonte: DNIT 133/2010-ME.

O ensaio constitui-se em um braço de alavanca que é acionado quando o caminhão inicia seu trajeto. A ponta do equipamento, localizada entre as rodas duplas do caminhão, tende a retornar ao seu nível de origem à medida que o veículo se afasta desta. Esta mudança de nível movimentada a ponta da haste em contato com o extensômetro. As medidas extraídas do extensômetro são basicamente uma semelhança de triângulos, como demonstrado na Figura 5 (BALBO, 2007).

Figura 5 - Relações matemáticas das hastes do equipamento



Fonte: BALBO (2007, p.408)

Deste modo, para a realização do ensaio são necessários o caminhão com o eixo de carga carregado com 8,2 t, pneus calibrados com pressão de 80 psi, e equipamentos de medição como o extensômetro e trenas (DNIT 133/2010-ME). O procedimento de ensaio prescrito na norma DNIT 133/2010-ME é o seguinte:

- Localizar os pontos de ensaio respeitando as distâncias de borda;
- Posicionar o caminhão com uma das rodas no centro do ponto;
- Instalar a Viga Benkelman com a ponta de prova no centro da roda dupla, sob o eixo;
- Destruar o equipamento;
- Regular a posição da viga com o pé traseiro;
- Acionar o vibrador;
- Inicia o deslocamento do caminhão e iniciam-se as leituras;
- Leituras podem ser finalizadas após 10 m ou quando o extensômetro não apresentar mais variação.

Dessa maneira, após as leituras com os dados levantados pode-se calcular as deformações elásticas do pavimento, sendo a deflexão expressa pela Equação 1.

$$D_0 = (L_0 - L_f) * a/b \quad \dots (1)$$

Onde:

D_0 = Deflexão inicial em centésimos de milímetros;

L_0 = Leitura inicial em centésimos de milímetros;

L_f = Leitura final em centésimos de milímetros;

a/b = Dimensões das hastes da Viga Benkelman em centímetros.

De acordo com o Manual de restauração de pavimentos asfálticos (2006), a partir dos dados retirados é possível calcular o raio de curvatura, o qual indica o arqueamento da bacia na sua região mais crítica. Sendo assim, a Equação 2 expressa o raio de curvatura.

$$R = \frac{10 \cdot x^2}{2(d_0 - d_x)} \quad \dots (2)$$

Onde:

R = Raio de curvatura em metros;

D₀ = Deflexão máxima em centésimo de milímetros;

D_x = Deflexão no deslocamento a x cm da ponta de prova, em centésimo de milímetros.

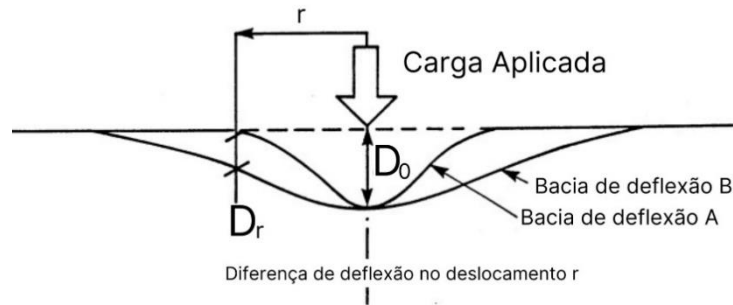
Segundo Branco, Pereira e Santos (2006), por se tratar de um equipamento manual e antigo, a leitura dos pontos no ensaio de Viga Benkelman é realizada ponto a ponto, dessa forma em trechos de grande extensão demanda muito tempo para realização completa do ensaio. Por este motivo o ensaio é limitado a pequenos trechos ou situações em que não há a disponibilidade de equipamentos mais modernos. Dentre os aspectos limitantes dos ensaios estáticos, destacam-se:

- Reduzida produtividade, é possível coletar dados somente de 10 a 50 km por dia;
- Dificuldade com a mobilização do trânsito no local, por parte de agentes de trânsito organizadores e dos técnicos que operarão o equipamento;
- Os dados levantados não representam as solicitações do trânsito em um fluxo normal de velocidade por ser estático.

2.2 Bacia de Deflexões

Conhecer a bacia de deflexões para análise completa do comportamento do pavimento é muito importante, visto que, somente um valor máximo de deflexão não é capaz de descrever o comportamento completo da estrutura. Na Figura 6 podem ser observadas duas estruturas de pavimentos com o mesmo valor máximo de deflexão, no entanto tratam-se de estruturas com comportamentos completamente distintos (HORAK, 1987).

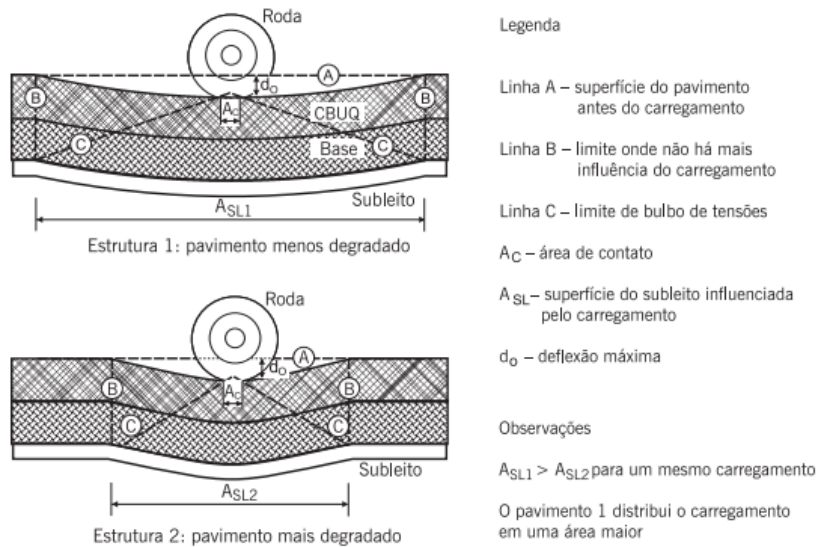
Figura 6 - Comparação entre bacias deflectométricas



Fonte: HORAK (1987)

Os métodos antigos do DNER eram empregados para a avaliação estrutural somente a partir do ponto de deflexão máxima, no entanto, os pontos de deflexão máxima somente descreviam o comportamento das deflexões reversíveis. A partir disso é possível perceber que este dado não é suficiente para avaliar todo comportamento estrutural do pavimento, pois um mesmo valor de deflexão máxima pode descrever diferentes comportamentos estruturais e assim gerar bacias deflectométricas diferentes, como pode ser visualizado na Figura 7 (HORAK, 1987; BERNUCCI *et.al*, 2008). Dessa forma é possível perceber a importância da análise e compreensão das bacias deflectométricas, muito relevantes para posterior retroanálise do pavimento.

Figura 7 - Diferença entre bacias deflectométricas



Fonte: BERNUCCI *et.al*, (2008, p.455)

2.3 Reflexão de Trincas

O ritmo em que a maioria das cidades foram se desenvolvendo foi de maneira desordenada, essa desorganização atingiu também as pavimentações que precisaram acompanhar este crescimento. Dessa maneira, onde anteriormente haviam ruas pouco movimentadas revestidas com paralelepípedos, hoje existem ruas com alto fluxo de veículos. Uma forma geralmente empregada para melhorar o conforto dos usuários é revestir os paralelepípedos com camada asfáltica, no entanto essa solução pode acarretar diversas consequências patológicas, sendo uma delas o trincamento precoce da camada de revestimento.

Rodrigues (1991) menciona que as reflexões de trincas podem ser definidas como o aparecimento de trincas na camada de reforço de um pavimento em decorrência de fissuras ou juntas existentes nas camadas imediatamente abaixo ao reforço no pavimento pré-existente, resultando no surgimento dessas trincas antigas na superfície.

Segundo Lytton (1989), a reflexão de trincas pode se desenvolver em um revestimento logo após a execução ou após vários anos de sua construção. As trincas, aliadas aos seus efeitos no pavimento, são os maiores contribuintes para a deterioração dos revestimentos, pois a reflexão transfere os problemas que deterioraram o pavimento original para o novo revestimento. Dessa forma, a propagação dessas trincas reduz a vida útil dos revestimentos asfálticos.

Devido a ações de tráfego e clima, as trincas se formam no pavimento, as quais provocam descontinuidades na estrutura, afetando a distribuição de tensões. Após a trinca surgir há um aumento progressivo de tamanho e magnitude, provocando a brevidade da degradação e desagregação da camada asfáltica. Desse modo, a reflexão de trincas é um problema usual em camadas de recapeamento simples em concreto asfáltico sem aplicação de camadas intermediárias. Assim sendo, ao receber os ciclos de cargas do trânsito as trincas existentes nas camadas subjacentes antigas, são refletidas para a camada nova, pois as camadas aplicadas geralmente possuem dimensões pequenas que não resistem a intensidade de propagação das trincas. Por outro lado, aumentar as dimensões das camadas pode tornar o projeto economicamente inviável (VILCHEZ, 2002). Está apresentado na Figura 8 um exemplo de pavimento em estágio avançado de degradação por reflexão de trincas ocasionadas pela camada asfáltica executada imediatamente acima do pavimento em blocos irregulares.

Figura 8 - Pavimento degradado em estágio avançado de reflexão de trincas



Fonte: Cava (2018).

2.3.1 Causas

As solicitações do tráfego de veículos geram movimentos entre as paredes das trincas ou juntas em razão das solicitações de tração e cisalhamento, ocasionando o efeito de corte na camada de reforço. Nesta situação e com a existência de um ponto fissurado na camada inferior, tende a iniciar o processo de reflexão de trincas. O desenvolvimento das trincas de reflexão se inicia acima das juntas ou trincas, seja no revestimento ou nas camadas inferiores, e são propagadas no contato da camada inferior fissurada com a camada asfáltica, em decorrência de tensões superiores as admissíveis (VILCHEZ, 2002; BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Desta forma, as fissuras das camadas inferiores geram estados de tensões diferentes apresentando distribuição de tensões não uniforme, facilitando a abertura de trincas nesses locais, assim sendo, as descontinuidades da camada inferior refletirão nestas regiões de máximas solicitações, gerando a propagação das microtrincas, diminuindo a rigidez do material no local. Quando a camada asfáltica está com alto nível de fendilhamento, maior é a magnitude de ação das cargas pela concentração de tensões nas extremidades das trincas (VILCHEZ, 2002; BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

Onde, alguns fatores que podem acentuar seu aparecimento são temperaturas baixas as quais deixam a camada asfáltica rígida favorecendo o aparecimento de trincas, altos volumes de tráfego e cargas de veículos elevadas. Dessa maneira, o alto índice de solicitações e acúmulo de tensões na zona de trincamento resulta na degradação do pavimento (VILCHEZ, 2002; BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

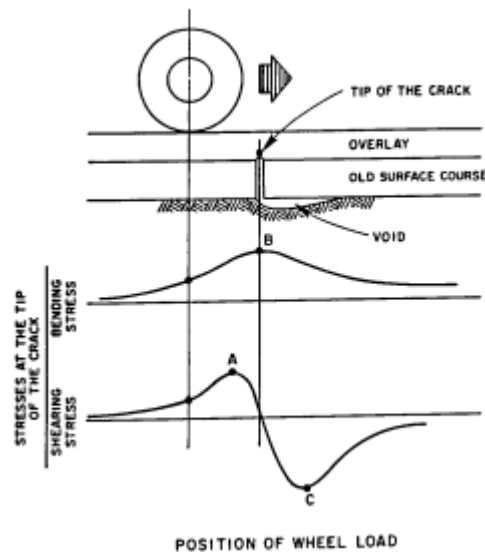
Já Monismith (1980) *apud* Rodrigues (1991) comenta que o surgimento das trincas por reflexão podem atuar de duas maneiras diferentes, a primeira forma quando há uma ligação razoável entre a camada de reforço com o pavimento existente, nesse sentido, a reflexão da trinca para a camada superior será por fadiga, devido ao acúmulo de tensões nas extremidades das trincas. A segunda possibilidade é de que mesmo não acontecendo o acúmulo de tensões, ocorrerá deflexão máxima no local da trinca, pois nessa região haverá uma redução da rigidez devido a camada trincada, desse modo acarretando em tensões máximas de tração no ponto.

Além disso, de acordo com Rodrigues (1991), as reflexões de trincas são o resultado da falta de resistência a tração ou pouca ductilidade na camada asfáltica, para resistir às solicitações de tensões de tração ou cisalhamento. Esta condição independe de qualquer situação adversa a qual o pavimento está exposto como solicitações de tráfego, temperatura ou umidade, durante a vida útil do pavimento. Desse modo, é possível observar que existem regiões de solicitações máximas, e são nessas regiões em que já se encontram as trincas ou juntas existentes no pavimento antigo, quando ocorre a execução da camada de reforço são essas regiões as mais solicitadas pelas cargas do tráfego. Assim, gerando uma carga de deflexão máxima nesses pontos, gerando as trincas de reflexão.

Estas condições de bases subjacentes à camada asfáltica favorecem o rápido desenvolvimento da reflexão das trincas. Desse modo, observa-se que uma mesma carga aplicada em pontos distintos pode desenvolver magnitudes diferentes de acordo com a localização. Uma carga em uma região uniforme tende a ser assim distribuída, já na região da fissura a amplitude da carga tende a ser mais elevada. Sendo assim, certamente nesses pontos falhos as fissuras avançam progressivamente para a superfície, após ter sido provocada a ruptura no material asfáltico (BALBO, 2007).

Outro fator a ressaltar, é que as mudanças de temperatura estão diretamente ligadas à reflexão de trincas, pois produzem movimentações horizontais no pavimento. A capa asfáltica, por ser a camada superficial do pavimento, recebe diretamente as mudanças de temperatura, que variam da sua base ao longo da espessura do revestimento, gerando condições diferentes de retração e dilatação ao longo dos pontos da camada. Estas variações de temperatura desenvolvem movimentos de retração e dilatação de forma cíclica e estão associadas a fadiga e reflexão de trincas por deslocamento horizontal. Outro fator, é que esta variação de temperatura provoca tensões de flexão, que formam e aumentam a incidência das trincas por toda extensão longitudinal do revestimento asfáltico (MEDEIROS, 2020; LYTTON, 1989). Desta forma, é apresentado na Figura 9 como ocorre a distribuição de tensões em revestimentos asfálticos trincados.

Figura 9 - Distribuição de tensões em revestimentos asfálticos trincados



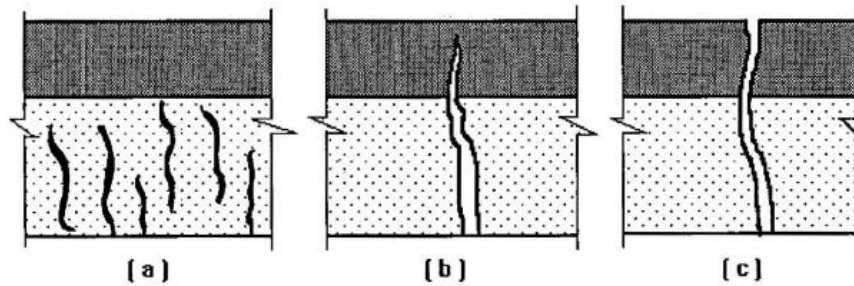
Fonte: Lytton (1989, p.219).

Vilchez (2002), descreve alguns fatores que influenciam diretamente no aparecimento de trincas por reflexão, os quais foram levantados a partir de experimentos e estudos teóricos, tais como:

- Espessura da camada de concreto asfáltico;
- Características mecânicas de deformação elástica em relação a temperatura;
- Características das solicitações, e também em relação aos horários de fluxo associado a temperatura do pavimento;
- Variação térmica entre a camada de reforço e camada do pavimento existente;
- Característica das trincas já existentes no pavimento subjacente;
- Estrutura do pavimento existente e suas particularidades como materiais e espessuras;
- Situação da ligação entre a camada de reforço e a do pavimento existente, qual tipo de ligação entre elas e materiais aplicados.

A formação de trincas ocorre em 3 estágios, primeiramente na formação há estágio instável, após isso a trinca se propaga de maneira estável e por fim o crescimento de maneira instável na ruptura quando aparece e alastra-se pela superfície, este processo é exemplificado na Figura 10 (MEDEIROS, 2020; VILCHEZ, 1996).

Figura 10 - Estágios da formação de trincas

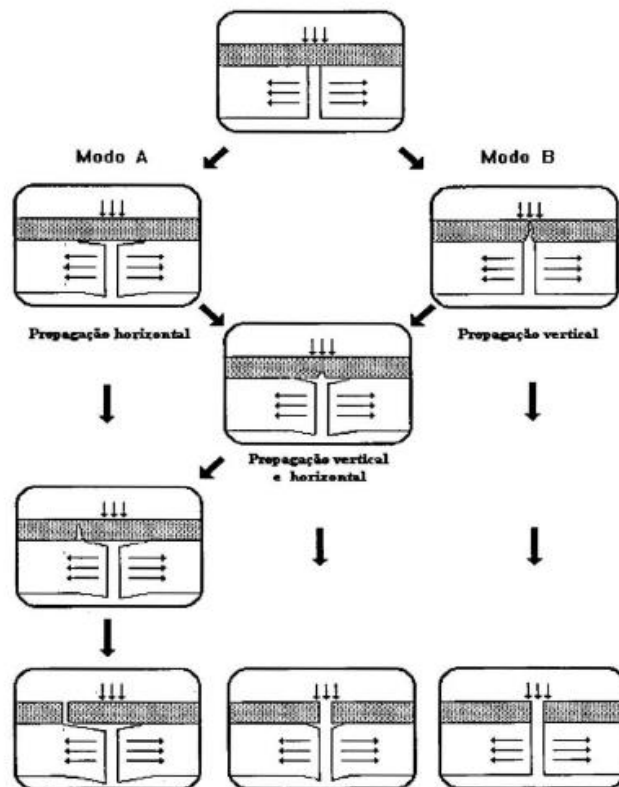


Fonte: Vilchez (1996, p. 6).

Goacolou (1982), desenvolveu um método para descrever o processo de reflexão de trincas, como é demonstrado na Figura 11, com basicamente 2 ramificações:

- Propagação horizontal, ocasionada a partir do desprendimento entre a capa asfáltica e a camada trincada, até o momento que haverá direcionamento vertical;
- Propagação vertical, ocasionada quando há excelente união entre as camadas.

Figura 11 - Processo de reflexão de trincas



Fonte: Goacolou (1982).

2.3.2 Consequências do fenômeno

A existência de trincas possibilita a entrada de água para as camadas inferiores do pavimento, sendo capaz de ocasionar bombeamento de finos e degradação precoce das camadas. Além disso, demonstram uma área de fragilidade da pavimentação pois modificam a distribuição das tensões (MEDEIROS, 2020; BRANCO, PEREIRA E SANTOS, 2006).

Segundo Vilchez (1996), em decorrência das trincas na camada superficial do pavimento, o desempenho e a funcionalidade da estrutura são afetados, desse modo, trazendo consequências, como:

- Entrada de água na estrutura, diminuindo a capacidade de suporte da mesma, facilitando o surgimento de abertura de panelas;
- Avanço das degradações da camada asfáltica nas regiões próximas as trincas, elevando o nível de irregularidades nesses locais;
- Tensões mais incidentes em camadas subjacentes que ocasionam queda na rigidez na camada de revestimento.

2.3.3 Prevenção

Vilchez (1996) apresenta algumas soluções para suprimir os efeitos das superfícies trincadas de acordo com a fase das trincas. Na fase inicial pode-se adotar selagem da camada, e em etapas mais avançadas a restauração. Dessa forma, dependendo do estágio e dimensão dessas manifestações patológicas, um novo recapeamento será economicamente inviável, assim sendo, tem-se outras opções como:

- Reciclagem de camadas trincadas;
- Aplicação de mistura asfáltica com elevada resistência a fadiga (*e.g.* misturas de asfalto-polímero);
- Sistema anti-reflexão de trincas compreendendo o tratamento prévio (pavimento existente), execução de camada intermediária (entre o pavimento existente e o recapeamento) e projeto da mistura e camada de recapeamento.

O estudo de métodos de como diminuir e contornar essas manifestações patológicas é importante. Dessa forma, Bernucci *et al.* (2006), fazem algumas considerações sobre como combater a propagação de trincas nas camadas asfálticas com métodos de controle e redução. Sendo estas considerações listadas:

- Emprego de Geossintéticos;
- Camadas intermediárias de alívio de tensões;
- Camadas de dissipação de trincas;
- Acréscimo de espessura do recapeamento;
- Reaproveitamento do revestimento existente;
- Aplicação de revestimentos asfálticos com ligantes modificados.

Do mesmo modo, Roberts et al. (1996) descreve quatro modos de prevenir a reflexão de trincas, sendo eles:

- Acréscimo da espessura da capa de concreto asfáltico;
- Estudo de projetos específicos para a camada asfáltica, incluindo métodos de reforço para a camada podendo ser aplicado entre a camada existente e a nova, reforço na camada;
- Intervenções na camada asfáltica existente;
- Tratamento nas trincas superficiais.

Branco, Pereira e Santos (2006) propõem que para solucionar o desenvolvimento das trincas, aponta-se dois modos de ação, sendo eles, impossibilitar o início do desenvolvimento das trincas e sistemas de retirar totalmente as trincas existentes ou conter a propagação. Sendo os métodos de aplicação:

- Camadas intermediárias;
- Geogrelhas;
- Remover com fresagem as trincas existentes, antes de executar a nova camada;
- Reaproveitamento ou reestruturação da camada trincada com adição de ligantes e reparação da granulometria.

2.3.4 Camadas Intermediárias

De acordo com Rodrigues (1991), a região preferível para executar uma camada anti-reflexão de trincas é entre a camada de reforço e o pavimento atual. Dessa forma, como existem diferentes modos de desempenho das camadas intermediárias para controle das reflexões de trincas, podem ser classificadas nos grupos demonstrados a seguir.

2.3.4.1 Camadas Anti-reflexão de Trincas (SAMI)

Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI), são camadas desenvolvidas com o intuito de restringir os esforços a alcançarem a camada superior, destaca-se que não eliminam a possibilidade do surgimento de trincas, no entanto mitigam o processo de propagação (BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

De acordo com Rodrigues (1991), a justificativa do nome SAMI é associado ao método de funcionamento desse tipo de camada que é a capacidade de armazenar altos índices de energia de deformação distorcional ocasionadas pelas solicitações do tráfego que incidem nos bordos das trincas. Destacam-se nessas aplicações as misturas de asfalto com polímeros.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), existem alguns métodos que podem ser aplicados como camadas intermediárias SAMI, sendo eles:

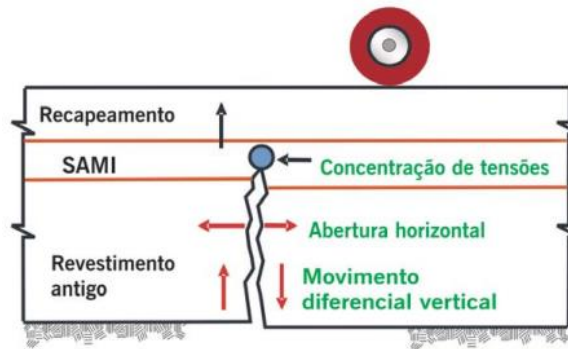
- Microrrevestimentos asfálticos;
- Tratamentos superficiais por penetração com ligantes asfálticos modificados por polímeros ou borracha de pneus;
- Misturas asfálticas com elevado teor de asfalto modificado por polímero em camadas delgadas.

Vilchez (2002) afirma que as camadas SAMI estão sendo aplicadas e estão obtendo sucesso no controle de reflexão de trincas e garante as seguintes características:

- Adesão satisfatória entre as camadas;
- Absorve as tensões solicitantes diminuindo assim a reflexão de trincas;
- Mantém as características elásticas em uma ampla faixa de temperatura.

Essas camadas atuam na dispersão dos movimentos e solicitações das trincas ou juntas com baixa e média magnitude, isso é possível pela capacidade de recuperação elástica do ligante asfáltico, na Figura 12 está demonstrado o posicionamento ideal para execução da camada SAMI (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 12 - Seção de pavimento com SAMI



Fonte: BERNUCCI (2008, p.472)

Branco, Pereira e Santos (2006) descrevem que as camadas SAMI refreiam a propagação de trincas devido ao sistema ter a capacidade de decompor o esforço de uma trinca em diversas microtrincas com menor intensidade o que reduz a reflexão de trincas na camada de reforço. Outro fator é que esta camada tendo características elásticas retém as tensões de deformações sem romper, e também por ser uma camada adicional amplia o caminho de propagação da trinca.

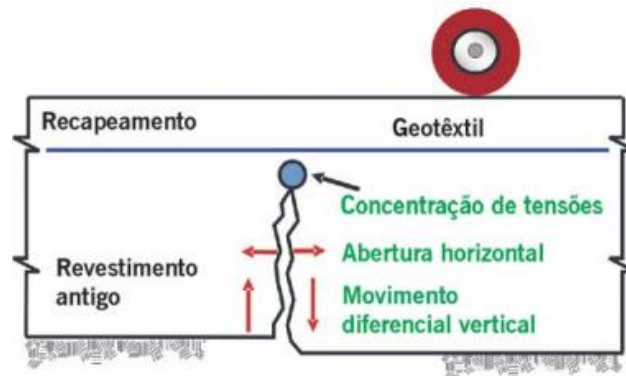
Deve ainda ser considerado que somente o aumento da espessura da camada de recapeamento não é uma solução para a propagação de trincas, esta solução somente reduz a velocidade e severidade das trincas refletidas, pois reduzem as solicitações de flexão, cisalhamento e variação de temperatura na camada asfáltica. Assim sendo, na escolha de sua aplicação devem ser considerados relações custo-benefício em comparação com a possibilidade de aplicar a capa asfáltica juntamente com outras técnicas de camadas intermediárias (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.3.4.2 Geossintéticos

Geossintéticos podem ser utilizados de duas formas diferentes, trabalham desviando as trincas ou atuando na dissipação das mesmas reduzindo essas trincas em microfissuras, manifestando-se de maneira aleatória e com progresso lento. Na aplicação dos geossintéticos é utilizado uma porcentagem maior de ligante asfáltico do que seria aplicado em uma imprimação convencional de ligação. Além do próprio trabalho realizado pelo geossintético, para sua aplicação é necessário aplicar uma maior quantidade de ligante asfáltico, esta aplicação de ligante associado ao geossintético é o mecanismo que prorroga e atenua o fenômeno da reflexão de trincas, nesse sentido, quando a reflexão ocorre a intensidade de propagação é reduzida e

normalmente é propagada na direção horizontal. Na Figura 13 está demonstrado o local ideal de aplicação do geossintético (DNIT,2006; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 13 - Seção Pavimento com geotêxtil



Fonte: BERNUCCI (2008, p.469)

Os Geossintéticos atuam redirecionando o caminho de propagação da trinca, que passam a percorrer um caminho da horizontal. Na interface de ligação entre a camada de geossintético com as duas camadas asfálticas a anterior deteriorada e a nova, acontece um desligamento fator este que redireciona a trinca, pois dispersa a energia necessária para a trinca avançar. Isso decorre, pois, a aderência das camadas não é mais perfeita há um nível de atrito horizontal, porém na vertical a ligação não é impactada (RODRIGUES, 1991).

Dessa forma, quando são aplicadas geogrelhas, a propagação é lenta pois ocorre a dissipação das trincas gerando microfissuras com baixa intensidade que demonstram trajetória de propagação aleatória. Dessa forma, dependendo da intensidade de carga as fissuras iniciais podem ser cessadas se houver descontinuidade durante a propagação no bordo da trinca em função de uma mudança de trajetória de propagação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com a aplicação de sistemas como os geotêxteis é possível criar uma ligação entre as camadas de forma que absorve as tensões das extremidades das trincas da camada subjacente e não os transfere diretamente para a camada superior, refreando a propagação de trincas. Além disso, o geotêxtil é utilizado nos sistemas anti reflexão de trincas, deve apresentar dois tipos de comportamento: rígido (às solicitações do tráfego) e dúctil (às variações de temperatura). Dessa forma a camada pode ser denominada como uma esponja de betume anisotrópica pela capacidade de variar seu comportamento de acordo com o tipo e direção de solicitação das cargas (RODRIGUES, 1991; BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

A aplicação dos geossintéticos não se resume somente na aplicação em de restauração de pavimentos antigos, mas também pode ser aplicado em pavimentos novos, pois aumenta

características como, capacidade de carga, redução da espessura necessária para a capa asfáltica, evita a propagação de trincas aumentando assim a vida útil do pavimento construído. Aliado a isso a necessidade de manutenção nesses pavimentos é reduzida, dessa forma os custos de manutenção também são reduzidos (ANTUNES, 2008; MEDEIROS, 2020).

2.4 Retroanálise

Segundo Medina e Motta (2015), o procedimento de escolha do reforço no pavimento deve ser precedido de estudo das condições estruturais existentes, com o levantamento de todas patologias existentes (afundamentos, trincas, exsudação, etc.), assim como, quais são os materiais constituintes das camadas e sua espessura, o conhecimento do histórico da via como níveis de solicitações de tráfego e qual a expectativa de tráfego a longo prazo.

Dessa forma, após os levantamentos iniciais para o início do projeto de reforço deve ser realizado a avaliação estrutural do pavimento, que podem ser realizados por ensaios destrutivos com sondagens e análise dos materiais em laboratório, no entanto é uma prática lenta. Sendo assim existem também os ensaios não destrutivos de avaliação estrutural (MEDINA E MOTTA, 2015; BERNUCCI *et al.* 2008), como já demonstrado anteriormente os diversos métodos existentes de avaliação estrutural não destrutivos e quais informações podem ser extraídas dos mesmos.

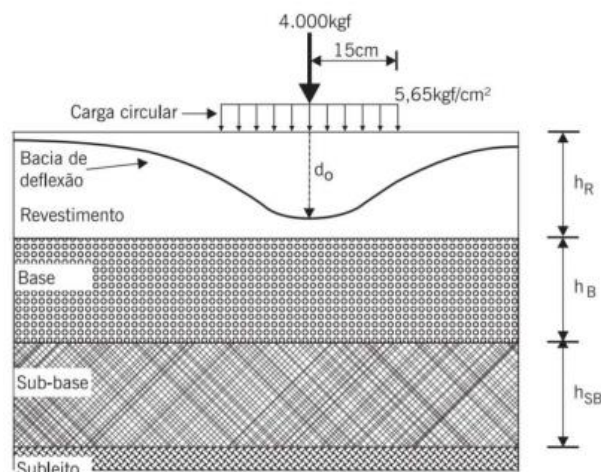
Sendo assim, a partir dos ensaios não destrutivos de análise estrutural se obtém as bacias de deflexões, partindo do conceito de que a análise da bacia de deflexões completa é a melhor maneira de avaliar as reais condições das camadas da estrutura. A partir disso, foram desenvolvidos diversos softwares que desenvolvem a retroanálise e proporcionam os valores de módulo de elasticidade das camadas em campo (MEDINA E MOTTA, 2015).

A partir dos ensaios não destrutivos desenvolveu-se a retroanálise, que possibilita através da análise das bacias de deflexões conhecer os módulos de elasticidades das camadas, a partir de várias interações simulam uma curva o mais próximo possível da estrutura em análise. Desta forma, na Figura 14 estão indicados quais os parâmetros necessários para desenvolver a retroanálise. Assim sendo, como pode ser observado a carga aplicada deve ser conhecida, assim como, as características dos materiais e quais as espessuras de suas camadas (BERNUCCI *et al.*, 2008; BALBO, 2007).

O processo de avaliação estrutural é extremamente importante pois é esta análise que irá oferecer os dados sobre os módulos de elasticidades dos materiais das camadas da estrutura do pavimento. É importante considerar a respeito dos módulos de elasticidade, que são valores obtidos a partir da retroanálise e dessa forma refletem as condições em campo do

comportamento dos materiais em conjunto. Dessa forma, é notável a diferença entre módulo de elasticidade e módulo de resiliência, mesmo sendo parâmetros semelhantes, são diferentes pois o módulo de resiliência se trata de valores a partir de ensaios em laboratório que não conseguem atingir as mesmas condições encontradas em campo pois esses valores variam com o tempo, solicitações de uso e clima (BERNUCCI *et al.*, 2008; BALBO, 2007).

Figura 14 - Parâmetros para retroanálise



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008, p.453)

De acordo com Medina e Motta (2015), a muito tempo já são conhecidos os parâmetros e análises das bacias de deflexões, sendo um elemento indispensável na análise estrutural por sua facilidade de operação e análise dos parâmetros principalmente quando se trata do desenvolvimento da retroanálise.

O estudo da mecânica dos pavimentos é a área que compreende as tensões e deformações dos pavimentos, a partir do conhecimento dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson que se fazem necessários pela teoria da elasticidade. Dessa forma, do mesmo modo em que estes dados de módulo e coeficientes são utilizados para o dimensionamento de um pavimento a ser construído, a partir da retroanálise as bacias de deflexões resultantes no pavimento a partir de uma carga conhecida são válidas para percorrer o processo inverso, e conhecer os módulos de elasticidade dos materiais *in situ*. As dificuldades do método de retroanálise é relativamente baixo quando se trata de um pavimento com poucas camadas e com seção transversal conhecida (altura das camadas e materiais constituintes), porém quando existem um número maior de camadas ou não se conhecem as dimensões das mesmas este trabalho apresenta grande dificuldade (MEDINA E MOTTA, 2015).

Balbo (2007) descreve retroanálise como determinação de uma bacia de deflexão o mais ajustada possível com a bacia medida em campo a partir do conhecimento das espessuras das camadas, seus materiais e a carga aplicada no ensaio para obter a bacia analisada. A determinação do ajuste da bacia de deflexão calculada para a medida em campo é possível pelas várias interações e base de dados dos softwares utilizados, desta maneira torna-se importante o conhecimento da metodologia e critérios utilizados por cada um.

De acordo com a norma ASTM D 5858, a retroanálise é uma técnica analítica que estabelece módulos de elasticidade equivalentes das camadas da estrutura do pavimento proporcionais à intensidade de carga aplicada e as deflexões correspondentes. A norma destaca o processo iterativo que consiste na aplicação de um conjunto de módulos que a partir de várias iterações para a situação de solicitação estabelecida até que se encontre um valor coerente e próximo entre deflexões calculadas e medidas, desse modo, a experiência e domínio do profissional da técnica são de suma importância para adotar a soluções e estabelecer a melhor combinação.

A retroanálise pode ser desenvolvida a partir de diversas técnicas distintas, sendo elas, iteração, pesquisa em banco de dados, soluções de forma fechada (disponíveis somente para pavimento com duas camadas) e equações simultâneas (usando equações de regressão não linear desenvolvidas a partir de dados de saída de análise elástica em camadas), dessa forma todas as técnicas possuem suas particularidade e seus prós e contras (ASTM 5858, 1996; MACÊDO, 1996). A partir disso Macêdo (1996), descreve o roteiro da maioria das retroanálises:

- Parâmetro para os módulos de elasticidade iniciais, técnica de aproximação ou banco de dados;
- Desenvolver a bacia de deflexões a partir dos módulos utilizados de parâmetro anteriormente;
- Análise de comparação entre as deflexões medidas em campo e calculadas;
- Método de aproximação dos módulos a partir de técnica que reduza as diferenças entre as deflexões medidas e calculadas;
- A iteração deve ser repetida até que se alcance um erro previamente estabelecido como aceitável, outra condição é que os módulos não devem variar além do intervalo preestabelecido, ou por fim que o software atinja um número máximo de iterações.

No Brasil ainda não se tem uma norma que trate especificamente sobre retroanálise, no entanto o Manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT (2006) descreve sobre retroanálise. Para buscar complementar o conhecimento da técnica a norma ASTM D 5858 pode ser consultada pois descreve a técnica e indica quais os cuidados necessários para obter resultados satisfatórios.

A partir disso, Bernucci *et al.* (2008), apresenta os aspectos positivos e negativos a respeito da retroanálise. Os aspectos positivos são:

- Medir módulos de elasticidade *in situ*;
- Reduz ou elimina a necessidade de amostras e poços de sondagem para alcançar os módulos e coeficientes necessários;
- Como é um ensaio não destrutivo demandam menor tempo e baixo custo;
- Garante o uso completo da bacia deflectométrica;
- Identificar rapidamente as camadas a partir da teoria da elasticidade;
- Analisar as condições estruturais de todas camadas.

Já os aspectos negativos são:

- Precisão dos equipamentos e sistema de operação devem ser continuamente aferidos;
- Divergências na precisão entre os valores de módulo de elasticidade calculados aos módulos efetivos das bacias de deflexão que apresentam imprecisão já nas medidas em campo;
- Os módulos de elasticidade a partir da retroanálise são equivalentes não os módulos efetivos da camada, a proximidade desses valores depende das condições em que se encontram as camadas;
- Os módulos equivalentes da retroanálise não são únicos, variam de acordo com os programas, metodologias adotadas e níveis de erro estabelecidos. Desta forma uma mesma bacia pode gerar módulos de elasticidade diferentes de acordo com a análise.

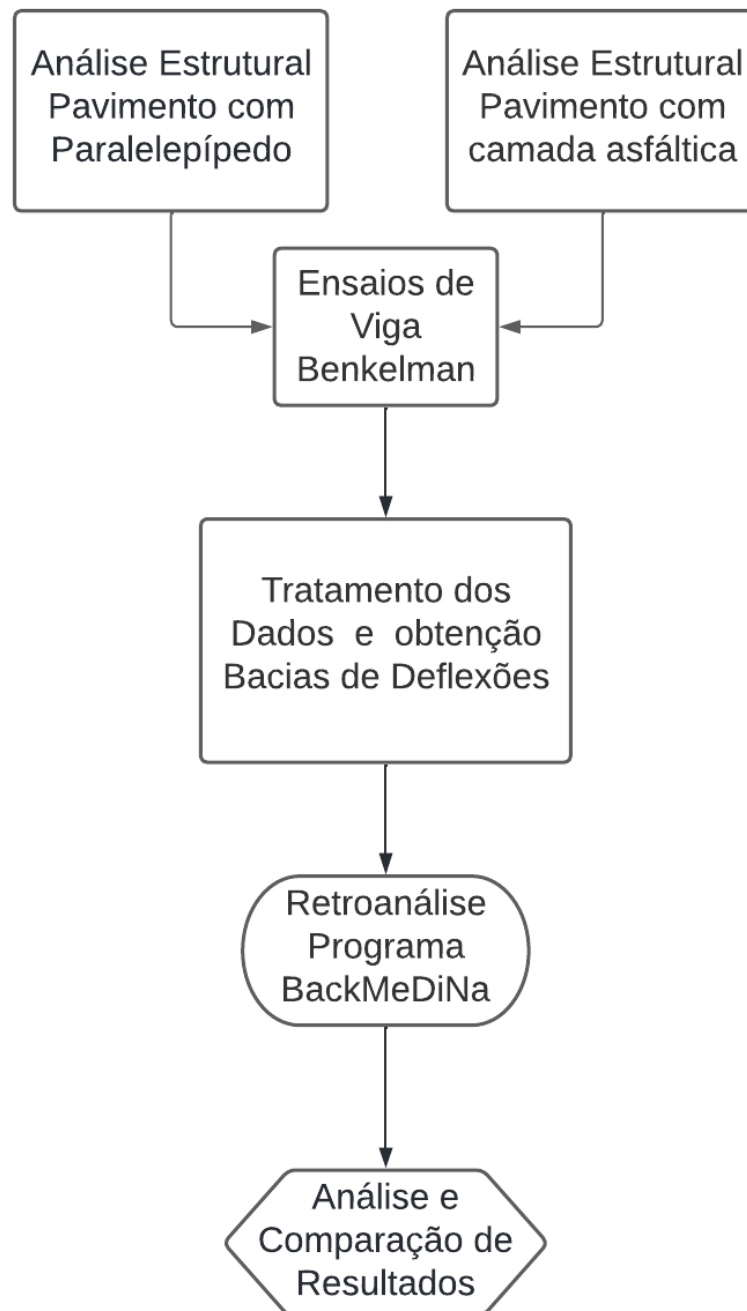
Atualmente no Brasil está sendo implementado o Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos (MeDiNa), a partir disso foram desenvolvidos programas que estão começando a serem utilizados pelos técnicos responsáveis por projetos de pavimentação sendo novos em fase de projeto ou recuperação e reforço de pavimentos antigos. A metodologia

adotada no programa MeDiNa é baseada na Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE), dessa forma, no programa são inseridos diversos dados como nível de tráfego, dados de caracterização física e mecânica dos materiais componentes da estrutura do pavimento. Além disso, o programa é composto por outros dois programas que podem ser usados para auxiliar no dimensionamento do pavimento, sendo eles os programas BackMeDiNa e AEMC. O BackMeDiNa é utilizado para retroanálise de estruturas de pavimento, a partir dele podem ser extraídos dados como módulos de elasticidade dos materiais de cada camada, já o programa AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) utilizado no cálculo de tensões e deformações teóricas que a estrutura é submetida quando sofre a influência dos carregamentos (FRANCO E MOTTA 2020).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo está apresentado todo desenvolvimento e métodos utilizados para elaboração do trabalho. O planejamento adotado para desenvolvimento do trabalho está apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

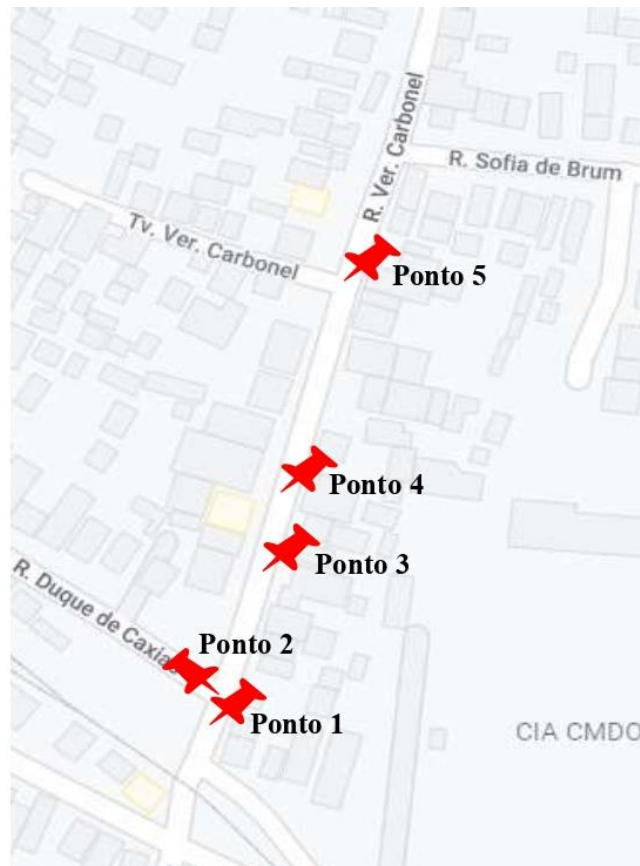


Fonte: Elaboração própria

3.1 Definição e caracterização do local de estudo

Para a realização dos ensaios de Viga Benkenlman, foi buscada uma via do município de Alegrete/RS da qual se tinha conhecimento a priori dos planos de pavimentação em concreto asfáltico pela prefeitura. Assim, foi selecionada a via Vereador Carbonel, visto que esta apresentava pavimento de paralelepípedo com previsão de pavimentação ao longo da execução deste trabalho. O ponto inicial do estudo foi próximo a intersecção com a rua Duque de Caxias até próximo à rua Sofia de Brum, com aproximadamente 96 metros de extensão. O trecho em estudo, assim como os pontos de análise, encontra-se representado na Figura 16. A situação da via previamente a obra de pavimentação está ilustrada na Figura 17.

Figura 16 - Localização dos pontos de análise na rua Vereador Carbonel



Fonte: Google Earth (2023).

Figura 17 – Situação da via antes da restauração asfáltica



Fonte: Elaboração própria

Em todo o trecho da via foi executado imprimação com asfalto diluído CM - 30, a qual tinha por objetivo garantir uma melhor aderência entre as camadas asfálticas e o pavimento existente. Após realizada toda imprimação do trecho, iniciou-se a execução da camada de reperfilagem com aplicação de concreto asfáltico, o qual tinha por objetivo diminuir as irregularidades do pavimento existente. Neste projeto foi executado uma camada de reperfilagem com espessura de 3 cm, onde foi utilizado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) para pavimentação asfáltica, com CAP 50/70.

Sendo assim, fez-se necessária a execução da pintura de ligação com emulsão asfáltica RR - 2C, para garantir a aderência com a camada de rolamento a ser executada.

Por último, foi executada a camada de rolamento, a mesma com 3 cm de espessura, com CBUQ, faixa A do DAER, com CAP 50/70.

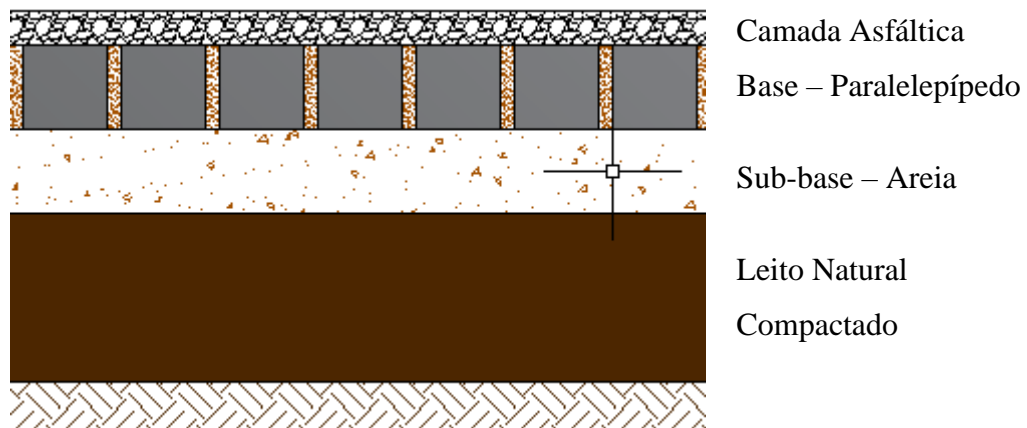
Isto posto, na Tabela 1 estão apresentados os materiais e camadas anteriormente citados, os quais irão compor a nova estrutura do pavimento. Desse modo, na Figura 18 está apresentada seção tipo do trecho de pavimentação a ser construído com a composição de materiais e suas espessuras.

Tabela 1 - Camadas do pavimento

| Camada | Material | Espessura (cm) |
|--------------------|---------------------------------|----------------|
| Capa de rolamento | CBUQ - CAP 50/70 - Faixa A DAER | 3 |
| Pintura de ligação | Emulsão Asfáltica - RR-2C | - |
| Reperfilagem | CBUQ - CAP 50/70 - Faixa A DAER | 3 |
| Imprimação | Asfalto diluído - CM -30 | - |
| Base | Paralelepípedo (existente) | 18 |
| Total = | | 24 |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 - Seção do pavimento a ser executado



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Realização do ensaio - Viga Benkelman

Inicialmente, foi necessário aferir que o caminhão utilizado no ensaio estava de acordo com as especificações técnicas necessárias. Sendo assim, o caminhão utilizado foi de eixo simples de roda dupla (ESRD), da marca Volkswagen modelo 17.180, o qual foi aferida uma

carga no eixo traseiro de 8060 kg no primeiro ensaio, realizado sobre paralelepípedo, e 8550 kg no segundo ensaio após a pavimentação asfáltica, sendo estes os valores mais próximos alcançados de 8200 kg exigidos pela norma DNIT 133/2010-ME, a diferença nas cargas se justificam devido às condições locais para realização das pesagens. Dessa maneira, os pneus foram calibrados com 80 psi cada, na Figura 19 (a) está demonstrado o tipo de caminhão e na Figura 19 (b) é possível visualizar a calibragem dos pneus.

Figura 19 – Caminhão e calibragem dos pneus



Fonte: Elaboração própria.

Para a demarcação dos pontos de ensaios, primeiramente foram determinados pontos equidistantes ao longo da via, de forma a garantir um melhor cobertura. Após a demarcação inicial, foi realizado o ajuste da locação, o qual foi influenciado pela condição da via, visto que alguns pontos se apresentavam muito deteriorados, impossibilitando a realização do ensaio.

Com a demarcação realizada, deu-se prosseguimento aos ensaios. Desse modo, com o caminhão posicionado no local definido, a Viga Benkelman foi posicionada e ajustada para o ponto. Para o levantamento dos dados foi utilizada uma trena de 50 m fixada ao caminhão e uma câmera posicionada em frente ao relógio comparador, sendo possível realizar as leituras de forma contínua para a análise dos dados. Na Figura 20 está demonstrado como foi realizada a coleta de dados, dessa forma, é demonstrado na Figura 20 (a) como a trena foi fixada ao caminhão, Figura 20 (b) o posicionamento e ajustes da Viga Benkelman, na Figura 20 (c) é possível visualizar a câmera utilizada para coleta de dados e na Figura 20 (d) é demonstrado a visão coletada pela câmera.

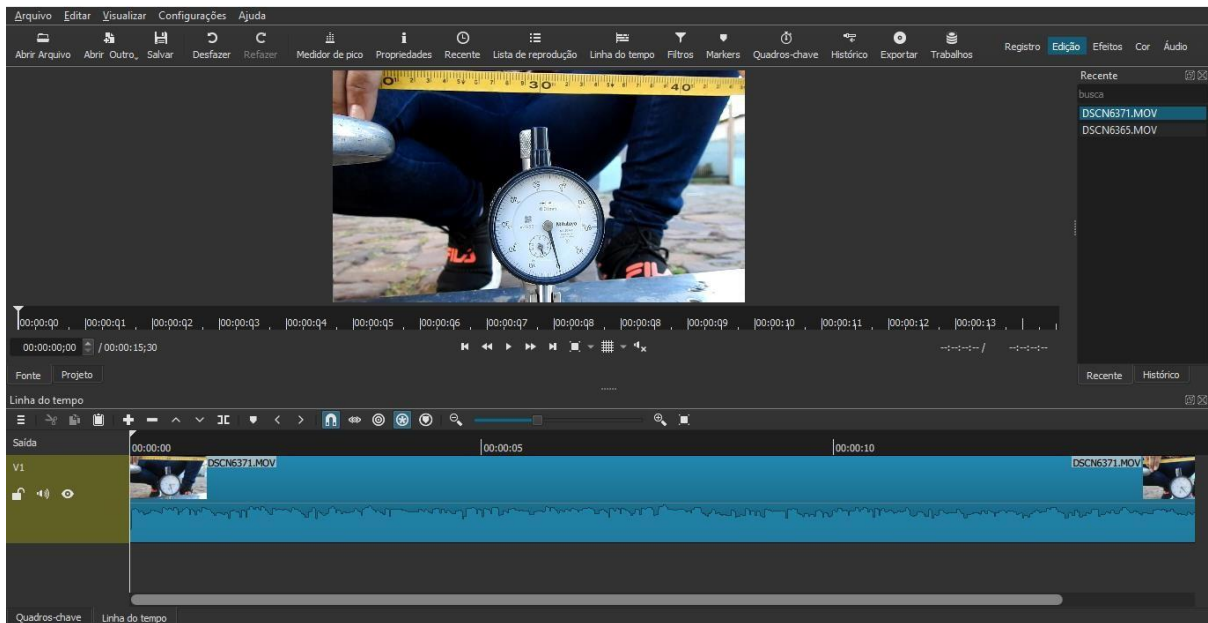
Figura 20 - Esquema de montagem para coleta de dados com câmera e trena



Fonte: Elaboração própria.

Desta maneira, com a câmera, trena e caminhão em posição é iniciada a gravação, após isso, o caminhão inicia seu deslocamento e as leituras têm início. As leituras dos pontos em estudo, foram levantadas posteriormente com o auxílio do software de edição de vídeo Shotcut, o qual tornou possível a realização das leituras quadro a quadro das filmagens. Conforme Figura 21, é possível observar a interface do programa e como foram realizadas as leituras nos pontos.

Figura 21 - Interface do software de vídeo



Fonte: Elaboração própria.

É importante salientar que todo processo de posicionamento e manuseio da Viga Benkelman, assim como os ensaios realizados em todos os pontos para desenvolver a bacia deflectométrica do pavimento, foram realizados seguindo os padrões estabelecidos pela Norma DNIT-ME 133/2010.

Com a Viga Benkelman ainda posicionada no ponto de análise, este foi demarcado com tinta spray branca e extensamente fotografado, buscando garantir a locação do local de ensaio, tornando possível a análise precisa dos pontos posteriormente a pavimentação. Na Figura 22 é possível observar a demarcação dos 5 pontos em estudo.

Figura 22 - Demarcação dos pontos no ensaio



...continua

...conclusão



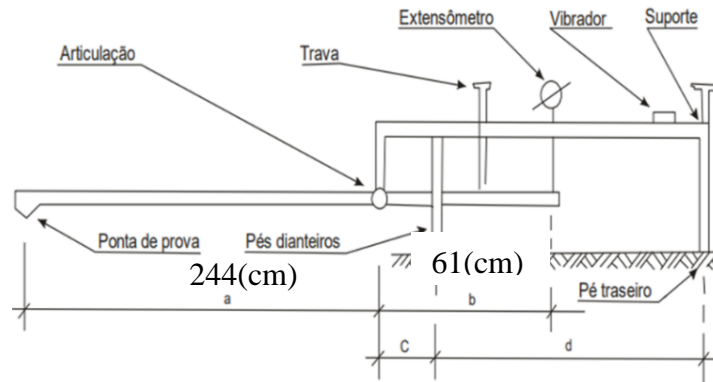
Fonte: Elaboração própria.

Dessa maneira, o ensaio precisou ser realizado novamente nos mesmos pontos de análise, após a execução da restauração asfáltica. Possibilitando assim, serem analisados os resultados de deflexão antes e depois da pavimentação asfáltica, sendo que para este último foram feitas duas leituras em cada ponto. Isto posto, após ser verificado a inconsistência de dados nos primeiros ensaios, optou-se por realizar dois ensaios em cada ponto no segundo ensaio, para aumentar a probabilidade de obtenção de dados confiáveis.

3.3 Ajuste dos dados

Como a Viga Benkelman possui um braço de alavanca, as dimensões dos braços da viga são importantes para realizar as relações de ajuste das leituras. Estas dimensões foram determinadas (Figura 23), chegando a uma relação a/b igual a 4.

Figura 23 - Relações entre dimensões da Viga Benkelman



Fonte: DNIT 133/2010-ME.

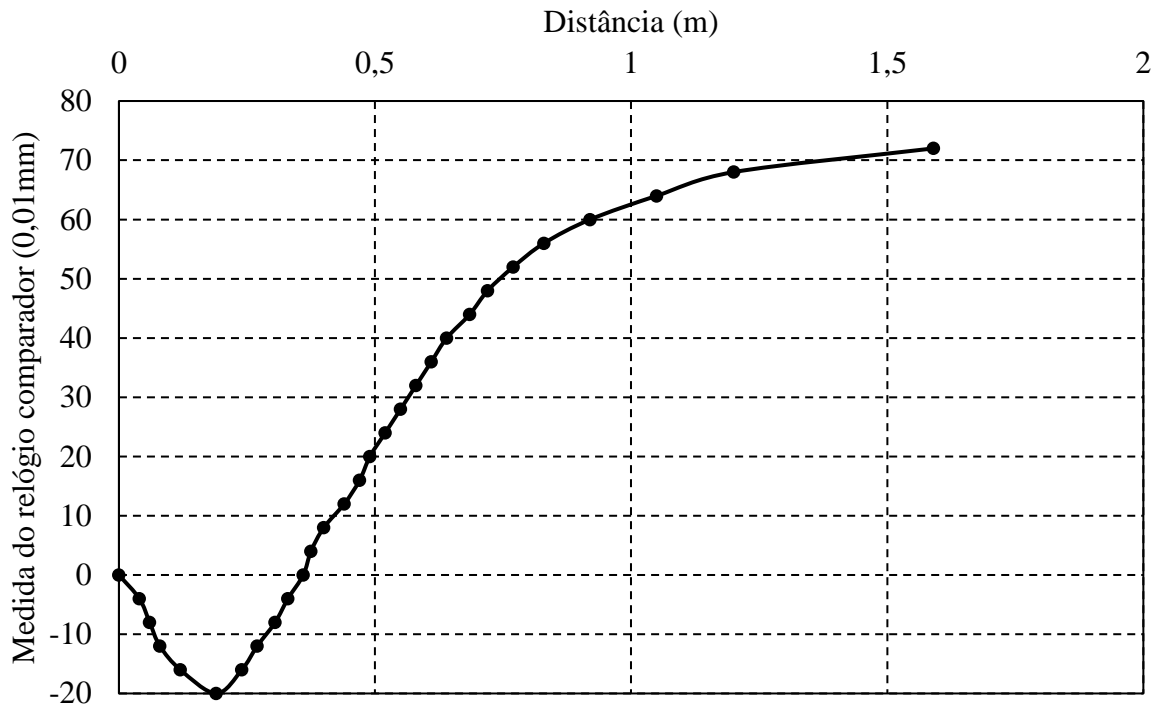
O cálculo das deflexões para descrever a bacia de deflexões de acordo com a norma DNIT ME 133/2010, se dá por duas equações, sendo na Equação 1 o cálculo do deslocamento vertical recuperável que é deflexão inicial (d_0) definida como a deformação elástica do pavimento no ponto de aplicação da carga, e a Equação 1 que determina as deflexões nos demais pontos da bacia.

Dessa forma, após realizado o cálculo das deformações é possível traçar a bacia deflectométrica e posteriormente realizar a análise por dados. No presente trabalho os dados serão analisados por retroanálise no programa BackMeDiNa.

3.4 Determinação das bacias deflectométricas

Após o ensaio com Viga Benkelman e realizada a análise das imagens, as deflexões foram determinadas. Para tal, foram desenvolvidas tabelas com relações de distância (m) e deflexão (0,01 mm), estes dados já estão corrigidos com o ajuste de coeficiente da viga, que se faz necessário devido a relação entre os braços de alavanca da viga, como descrito no item 3.3. Também optou-se por desenvolver a coleta de dados com intervalos de 0,01 mm de deflexão, obtidos a partir dos intervalos de precisão do relógio comparador, a fim de obter uma curva bem detalhada, para observar o comportamento da bacia. Desta forma, na Figura 24 está demonstrado um exemplo de bacia deflectométrica desenvolvida a partir dos dados extraídos.

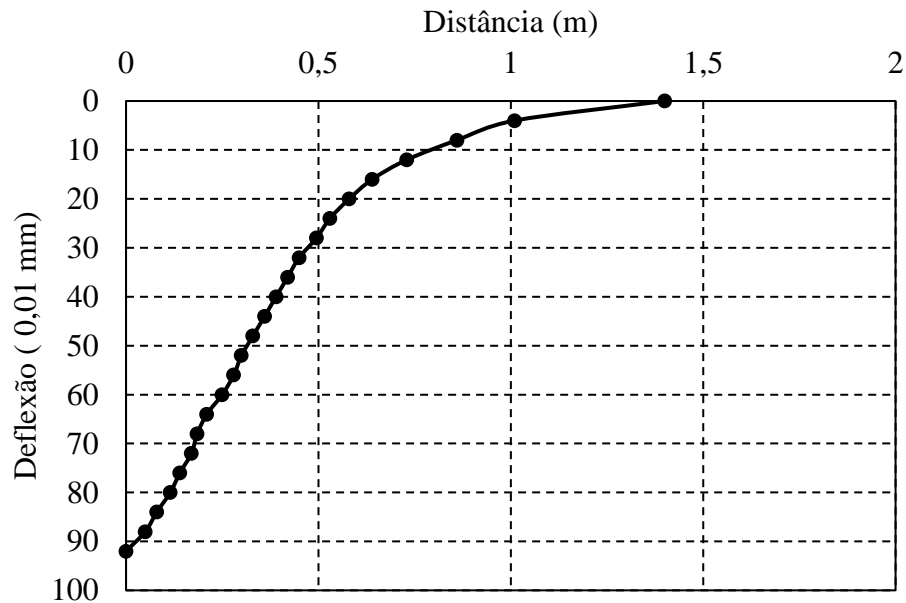
Figura 24 - Bacia de deflexões com todos os pontos coletados



Fonte: Elaboração própria.

Dessa maneira, é possível identificar na Figura 24 que o ponto de deflexão máxima do exemplo equivale a uma deflexão de $-20 \cdot 10^{-2}$ mm. O gráfico é então ajustado o formato para a inserção no software BackMeDiNa, onde ponto de máxima deflexão deve ser o ponto inicial de análise, pois é o ponto onde a ponta da viga esta alinhada ao eixo (maior solicitação). Nesse sentido, a realização do ajuste é realizada subtraindo de todos os pontos, as coordenadas x e y (distância e deflexão) do ponto de deflexão máxima. Ainda, utilizando a Equação 1, é necessário subtrair a deflexão final de todas deflexões encontradas, a fim de demonstrar que a maior deflexão encontra-se em D_0 . Desta forma, o gráfico formatado nestas condições está apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Bacia deflectométrica com pontos ajustados



Fonte: Elaboração própria.

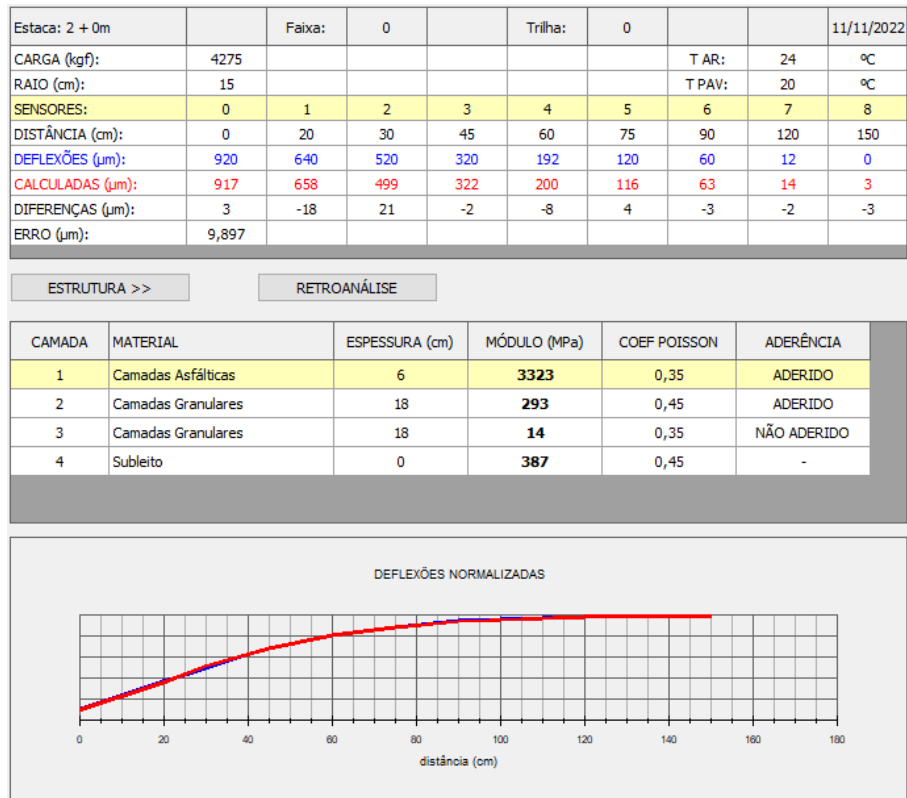
Para posterior importação para o software BackMeDiNa é necessário transformar as unidades das medidas de deflexão para micrômetro (μm) e as unidades de distância para centímetros (cm).

3.5 Retroanálise

Para desenvolver este estudo, adotou-se uma metodologia empírico-mecanicista, a partir do método de dimensionamento brasileiro MeDiNa, onde foi utilizado o programa BackMeDiNa.

Com isso, para obter a retroanálise foi utilizado o programa BackMeDiNa. Como o mesmo admite somente a inserção de 9 coordenadas de análise, foram realizadas as leituras nas distâncias estabelecidas para desenvolver a bacia no programa. As distâncias de análise utilizadas foram 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120 e 150 cm dos pontos de prova e as demais bacias deflectométricas estão apresentadas no capítulo 4. Também, é apresentado na Figura 26 (a) interface do programa utilizado e uma bacia deflectométrica retroanalizada. A retroanálise foi executada no programa diversas vezes a fim de obter um valor de erro mínimo alcançado em cada ponto.

Figura 26 - Interface do programa BackMeDiNa



Fonte: Elaboração própria.

Importante salientar que todos os itens da metodologia foram executados em dois momentos, inicialmente com o pavimento com revestimento em paralelepípedo e posteriormente após a aplicação da camada asfáltica.

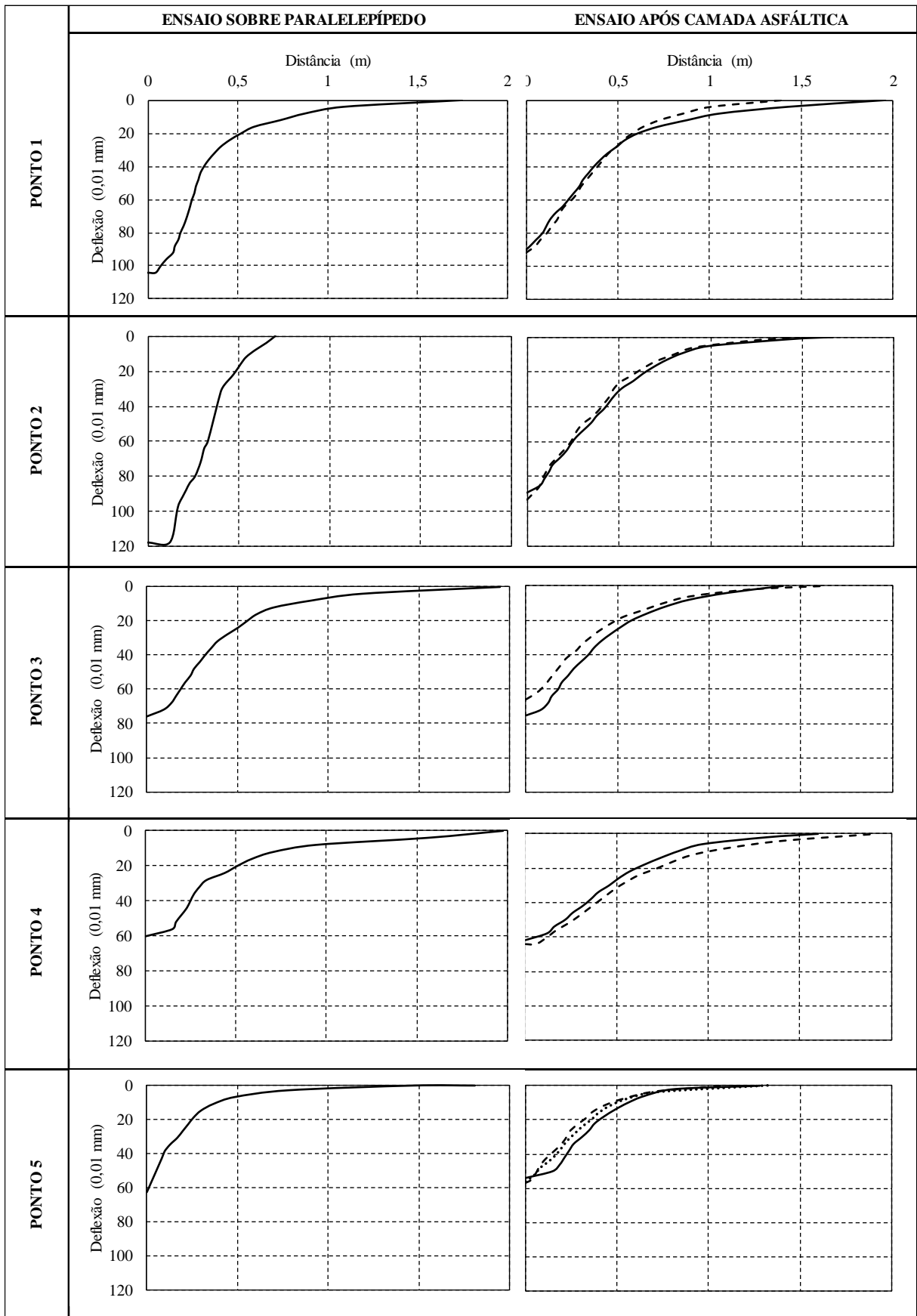
4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos no item 3.2. Foram realizadas as análises das bacias deflectométricas e dos módulos retroanalizados.

4.1 Bacias deflectométricas

A partir dos pontos de análise foram traçadas as bacias deflectométricas como apresentado na Figura 27. Dessa maneira, podem ser analisados os resultados de deflexão obtidos no ensaio antes e depois da pavimentação asfáltica, sendo que para este último foram feitas duas leituras em cada ponto, sendo a segunda leitura representado por uma linha tracejada.

Figura 27 - Bacias deflectométricas dos ensaios



Fonte: Elaboração própria.

A partir da Figura 27 o primeiro detalhe a se observar é a diminuição das deflexões máximas após a execução da restauração asfáltica. Esta diminuição está relacionada a adição da camada asfáltica, que acarreta em uma melhor distribuição de tensões. Os pontos que apresentaram maior diferença nas deflexões máximas foram os pontos 1 e 2, onde no ponto 1 foi observada uma diferença de aproximadamente 14% e no ponto 2 uma diferença de 29%. Nos demais pontos as reduções foram inferiores a 11%.

Quanto a geometria da bacia deflectométrica, também é possível observar uma melhor distribuição das tensões, indicada pela bacia de forma mais suave, demonstrando que o pavimento distribui mais gradativamente a deflexão ao passo que a carga é afastada. Ainda assim, as bacias descrevem um comportamento de descarregamento acentuado quando a carga é afastada, demonstrando que o pavimento ainda concentra a reação a carga próxima ao ponto de incidência da carga aplicada, demonstrando comportamento flexível.

A concentração de tensões pode ser melhor compreendida com a aplicação dos raios de curvatura (Equação 2). O manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT (2006), descreve que raios de curvatura inferiores a 100 m são considerados críticos. Assim sendo, utilizando os valores de deflexões D0 e D20 do pavimento após a restauração asfáltica, é importante salientar que foram realizados dois ensaios no mesmo ponto no segundo ensaio após a execução da restauração asfáltica. Desta forma, a análise das deflexões para as duas repetições dos ensaios foram diferenciadas, sendo a primeira denominada pela letra A e a segunda letra B, ainda no ponto 5 foram realizadas três medições onde a terceira foi denominada C. Assim foram obtidos os raios de curvatura apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Raios de curvatura

| Pontos | D0 (0,01 mm) | D20 (0,01 mm) | R (m) |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| 1A | 86 | 60 | 76,9 |
| 1B | 92 | 64 | 71,4 |
| 2A | 88,4 | 64,4 | 83,3 |
| 2B | 93,2 | 66 | 73,5 |
| 3A | 75,2 | 56 | 104,2 |
| 3B | 66 | 46 | 100,0 |
| 4A | 60,8 | 49,6 | 178,6 |
| 4B | 60 | 50 | 200,0 |
| 5A | 54 | 44 | 200,0 |
| 5B | 57,6 | 33,6 | 83,3 |
| 5C | 56 | 36 | 100,0 |

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se assim que mesmo após execução da camada asfáltica recentemente executada, já apresenta diversos pontos em estado crítico ou muito próximos a este, com apenas o ponto 4 atendendo completamente aos critérios do DNIT.

Estão apresentados na norma DNER PRO 011/79 alguns parâmetros para classificação do pavimento utilizando o raio de curvatura e o fator da deflexão admissível. Dessa forma, a deflexão admissível pode ser obtida a partir do número N de projeto, sendo que o número N do projeto em análise se encontra no memorial descritivo do projeto, sendo este $1,0^5$. Com isso, de acordo com a DNER PRO 011/79, para um número N de $1,0^5$, a deflexão admissível é de 135,0 0,01 mm. Está apresentado no Quadro 1 os critérios de avaliação estrutural de um pavimento.

Quadro 1 - Critérios de avaliação estrutural

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

Fonte: DNER PRO 011/79.

Conforme os valores obtidos, as deflexões de projeto (D_p) nos pontos 1, 2, 3 e 5 apresentaram valores inferiores à deflexão admissível (D_{adm}), porém com um raio de curvatura igual ou inferior a 100, desta forma constata-se a partir do Quadro 1 que estes pontos enquadram-se em qualidade estrutural de regular a má, com necessidade de estudos complementares e medidas corretivas de reforço ou reconstrução. No entanto, o ponto 4 apresenta qualidade estrutural boa, sem necessidade de correções.

4.2 Módulos de resiliência obtidos por retroanálise

Na sequência, é possível observar os módulos de resiliência das camadas, estimados a partir da retroanálise dos dois ensaios no pavimento antes e depois da restauração asfáltica. Dessa maneira, os coeficientes de Poisson e espessuras das camadas do pavimento utilizados para desenvolvimento da retroanálise, assim como os módulos resultantes, estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. Dessa forma, como os materiais constituintes das camadas não possuem sua denominação no programa BackMeDiNa, foi necessário utilizar camadas granulares para as camadas de base e sub-base, assim sendo optou-se por utilizar material granular 1 para o paralelepípedo e material granular 2 para a camada de areia.

Tabela 3 - Módulos de resiliência antes da restauração

| Camadas do Pavimento | Espessura camada (cm) | Coeficiente de Poisson | Aderência | Módulos nos pontos (MPa) | | | | |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|--------------------------|-------|--------|-------|--------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Mat. Granular 1 | 18 | 0,45 | Aderido | 332 | 211 | 881 | 1314 | 323 |
| Mat. Granular 2 | 18 | 0,35 | Não aderido | 33 | 38 | 19 | 27 | 34 |
| Subleito | - | 0,45 | - | 204 | 1366 | 263 | 148 | 206 |
| Erro (μm) | | | | 29,665 | 56,38 | 11,808 | 17,89 | 29,817 |

Fonte: Elaboração própria.

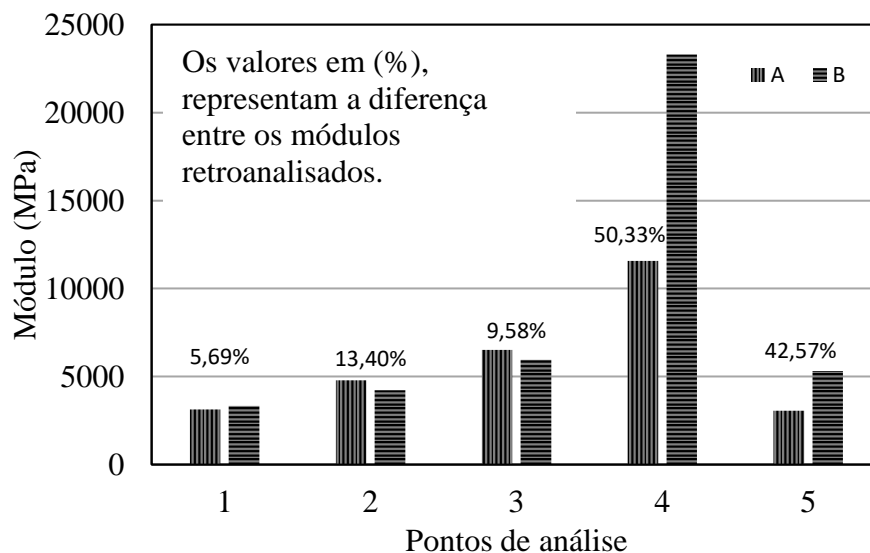
Tabela 4 - Módulos de resiliência após a restauração

| Camadas do Pavimento | Espessura Camada (cm) | Coeficiente de Poisson | Aderência | Módulo nos pontos (Mpa) | | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | | | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | |
| | | | | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | C |
| Camada Asfáltica | 6 | 0,35 | Aderido | 3134 | 3323 | 4790 | 4224 | 6519 | 5949 | 11571 | 23297 | 12757 | 3057 | 5323 |
| Mat. Granular 1 | 18 | 0,45 | Aderido | 287 | 293 | 325 | 252 | 320 | 348 | 467 | 373 | 217 | 263 | 250 |
| Mat. Granular 2 | 18 | 0,35 | Não aderido | 21 | 14 | 11 | 16 | 20 | 28 | 13 | 11 | 31 | 69 | 58 |
| Subleito | - | 0,45 | - | 270 | 387 | 582 | 319 | 251 | 329 | 498 | 591 | 930 | 574 | 576 |
| Erro (μm) | | | | 10,534 | 9,897 | 9,919 | 7,95 | 8,135 | 9,455 | 9,59 | 9,676 | 14,413 | 5,552 | 5,497 |

Fonte: Elaboração própria.

A partir disso, foram desenvolvidos gráficos comparativos entre os módulos em todos os pontos antes e após a execução da restauração asfáltica, separados por camadas. As camadas serão avaliadas iniciando pela camada superior, revestimento asfáltico, em direção a inferior, subleito. Importe salientar que no ponto 5 como haviam três medições e a primeira apresentou comportamento distinto das outras duas, optou-se por seguir a análise com apenas duas repetições. Na Figura 28 é possível observar a comparação entre as réplicas de módulos apenas da camada asfáltica, em que os módulos de resiliência nos pontos 1, 2 e 3 possuem boa repetibilidade entre os pontos. Já os pontos 4 e 5 divergiram respectivamente 50 % e 43%, porém o motivo de tal divergência é incerto.

Figura 28 - Módulos de resiliência camada asfáltica



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar que os valores de módulos encontrados nos pontos 1, 2, 3 e 5 variam entre 3057 MPa e 6519 MPa. Estes valores podem ser comparados aos intervalos recomendados na Instrução de Projeto de Pavimentação (IP-DE-P00/01) do Departamento de Estradas de Rodagens de São Paulo (DER-SP) (2006), pela norma ASTM 5858-96 e ainda pelos estudos realizado por Cardoso (1995), Ribas (2014), Santos (2015) e Bueno (2016).

Assim sendo, o DER-SP indica na IP-DE-P00/01 valores de módulo de resiliência para revestimento asfáltico (CAP 50-70), entre 2.000 e 5.000 MPa. A ASTM 5858-96 indica como valor 3500 MPa para módulos de resiliência para concretos asfálticos.

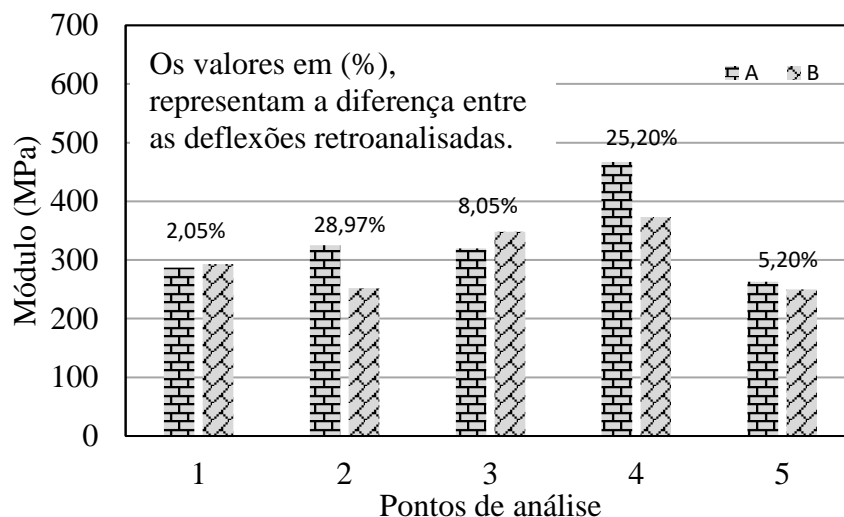
Cardoso (1995) apresenta valores médios de módulo de resiliência para camada asfáltica de 3.190 MPa, Ribas (2014) valores no intervalo entre 3.283 e 5.278 MPa e Santos

(2015) entre 2.786 e 6.983 MPa. Ainda, Bueno (2016) obteve para o trecho 3 da sua análise valores característicos de 2174 e 5352 Mpa. Este trecho do estudo foi escolhido pois foi executado acima de um pavimento asfáltico bem degradado que apresentava diversas trincas, o que foi assumido demonstrar comportamento similar a camada de paralelepípedo já que esta apresenta movimento relativo entre os blocos.

A partir disso, pode-se afirmar que os pontos 1, 2, 3 e 5 encontram-se em um intervalo usual de valores para módulos de resiliência. No entanto, no ponto 4 o valor de módulo apresentou módulo distinto, podendo ser em decorrência de uma eventual camada mais espessa nesse ponto ou alguma mudança na estrutura do pavimento especificamente neste local, em função da não uniformidade da estrutura. Como não foi realizada análise da espessura da camada no local, como a partir de furo de sondagem, uma resposta precisa é difícil de ser traçada.

Na sequência têm-se os módulos de resiliência para camada de paralelepípedo, cujos valores obtidos estão demonstrados na Figura 29. Como o paralelepípedo não é um material ideal para base de pavimentos asfálticos, mas comumente utilizado, não têm-se parâmetros de módulos de resiliência para o material. No entanto, como o material no estudo é tratado como a base utilizada na pavimentação, optou-se por utilizar então como fator comparativo os módulos de resiliência de bases de brita ou macadame como parâmetro.

Figura 29 - Módulos de resiliência camada de paralelepípedo



Fonte: Elaboração própria.

Assim sendo, de acordo com o IP-DE-P00/01 os intervalos de valores para bases de pavimentação asfáltica utilizando materiais granulares é entre 150 e 300 MPa para brita

graduada e entre 250 a 450 MPa para macadame hidráulico. A ASTM 5858-96 recomenda 200 MPa para valores de módulo de bases granulares.

À vista disso, a partir das Reuniões Anuais de Pavimentação, Fernandes Jr (1994) realizou um levantamento de módulos de resiliência de diversos estudos para camadas de base e sub base, sendo o intervalo dos módulos de resiliência mais usuais para bases entre 50 e 1000, sendo um valor médio para este intervalo 350 MPa.

Já os valores obtidos por Cardoso (1995) para módulos de resiliência médios para bases é de 300 MPa e Ribas (2014) em sua análise obteve valores de módulos de base de brita graduada entre 117 e 208 MPa e para macadame seco o intervalo de 100 a 300 MPa.

Com isso é possível concluir que os valores encontrados na retroanálise atendem os intervalos estabelecidos pela IP-DE-P00/01 e ASTM 5858-96, assim como, os valores de referência dos estudos analisados. Ressalta-se novamente, porém, que por situação foram comparados os módulos do paralelepípedo com materiais convencionais de bases de pavimentos.

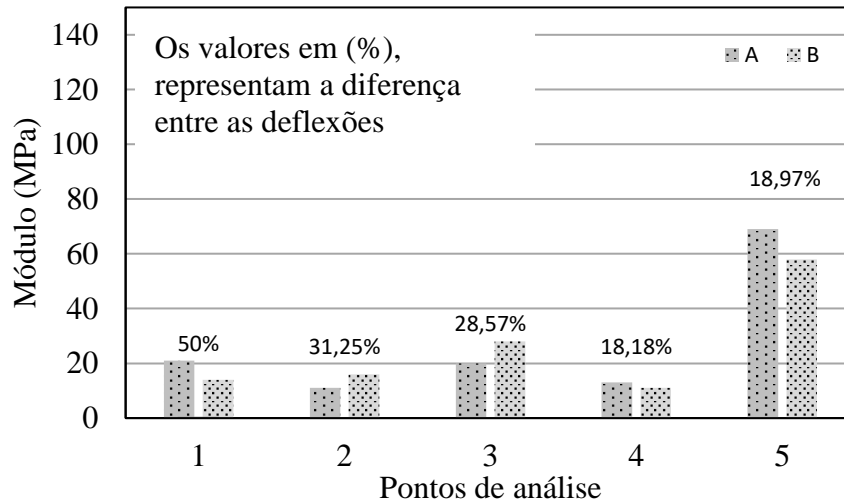
A próxima comparação é a dos módulos de resiliência da camada de sub-base, ou seja, o colchão de areia de assentamento dos paralelepípedos. Como não se tem conhecimento exato do tipo de material de sub-base, serão comparados os valores de bases de solos finos lateríticos e não lateríticos. Os valores de módulos retroanalisados encontram-se na Figura 30. Utilizar-se-ão os módulos de resiliência de sub-bases granulares como parâmetro comparativo.

Assim sendo, a ASTM 5858-96 recomenda 100 MPa para valores de módulo de sub-bases granulares. De acordo com a IP-DE-P00/01 os intervalos de valores para subleito e reforço do subleito de pavimentação asfáltica utilizando solos finos de comportamento não laterítico são indicados valores entre 25 e 75 MPa. Já para solos finos lateríticos o valor é entre 100 e 200 MPa.

Ribas (2014) encontrou valores de módulo para areias entre 87 e 134 MPa, já Cardoso (1995) relata valores entre 66 e 300 MPa para reforço do subleito e sub-bases, respectivamente e Fernandes Jr (1994) para a camada de sub-base o intervalo é de 50 a 400 MPa, sendo um valor médio para este intervalo 175 Mpa.

Isto posto, ao analisar a Figura 30 em comparação aos parâmetros dos estudos apresentados somente o ponto 5 aproxima-se dos valores mínimos indicados pela IP-DE-P00/01, Cardoso (1995) e Fernandes Jr (1994). Todos os demais pontos não apresentam os valores mínimos necessários, indicando que a camada não atende aos critérios de solicitações recomendados pela literatura.

Figura 30 - Módulos de resiliência camada de colchão de areia



Fonte: Elaboração própria.

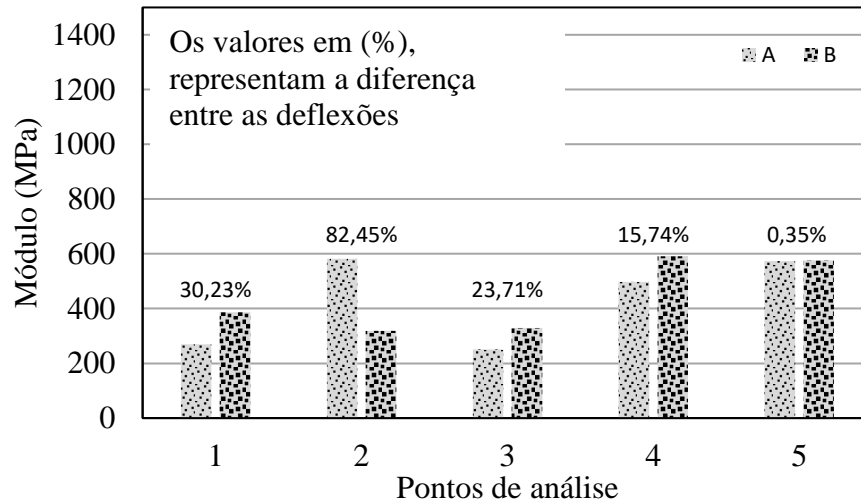
Por fim são avaliados os módulos de resiliência para a camada de subleito. Onde, os valores de módulos retroanalisados encontram-se na Figura 31. Estes podem ser comparados ao intervalo recomendados na Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/01, e ainda aos estudos realizado por Ribas (2014), Santos (2015) e Bueno (2016). Assim como anteriormente, por não haver classificação do material de subleito, os resultados serão comparados com materiais lateríticos e não lateríticos.

Dessa maneira, a IP-DE-P00/01 recomenda para subleito e reforço do subleito de pavimentação asfáltica utilizando solos finos de comportamento não laterítico são indicados valores entre 25 e 75 MPa. Já para solos finos lateríticos o valor é entre 100 e 200 MPa.

Ainda, para valores de módulo de resiliência de subleito Ribas (2014) encontrou valores entre 50 e 150 MPa, Santos (2015) analisou resultados entre 62 e 374 MPa e Bueno (2016) módulos entre 143 e 260 MPa.

Assim sendo, pode-se analisar a Figura 31, onde todos pontos encontram-se com valores superior a 200 MPa, atendendo então aos critérios estabelecidos pela IP-DE-P00/01 e coerente aos estudos analisados.

Figura 31 - Módulos de resiliência subleito



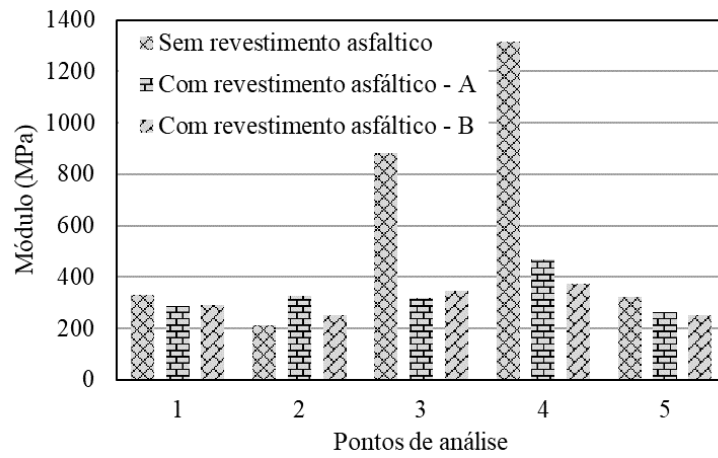
Fonte: Elaboração própria.

A fim de comparação os módulos das camadas de base, sub-base e subleito antes e depois da restauração foram plotadas em gráficos de barras e encontram-se na Figura 32, Figura 33 e Figura 34. Desta forma, é possível observar que para a camada de paralelepípedo nos pontos 1, 2 e 5 há boa repetibilidade nas medições. Já nos pontos 3 e 4 observou-se grande variabilidade antes e após a execução da restauração, no entanto o motivo é incerto.

Na análise da camada de areia são observados nos pontos 1, 2 e 4 módulos de resiliência superiores aos encontrados após a execução da camada asfáltica, o que pode ser decorrência de que antes da execução camada de revestimento, a camada de areia recebe maior solicitação das cargas. O módulo de resiliência no ponto 3 manteve-se o mesmo antes e após a execução da camada asfáltica, já os módulos de resiliência do ponto 5 antes da camada asfáltica foi inferior aos medidos após a restauração.

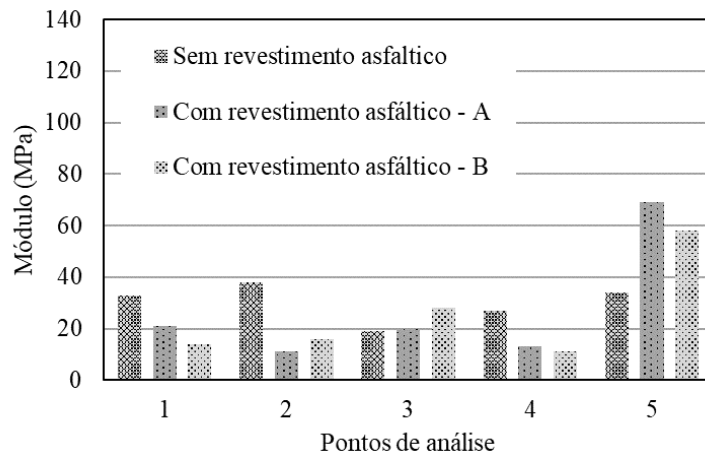
Por fim, para a camada de subleito observou-se que de forma geral (pontos 1, 4 e 5) a execução de uma camada de restauração elevou o módulo da camada. Para o ponto 2 houve uma queda abrupta do módulo da camada após a execução do reforço e para o ponto 3 pouca variação foi observada.

Figura 32 - Comparação entre módulos do paralelepípedo



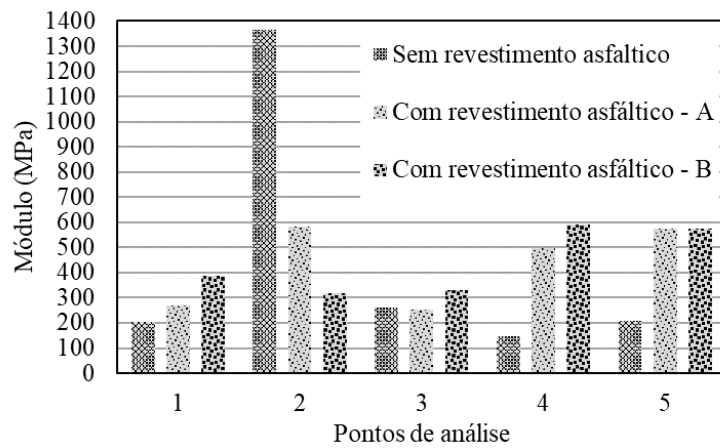
Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 - Comparação entre módulos da camada de areia



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 - Comparação entre os módulos do subleito



Fonte: Elaboração própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos com os ensaios defletoométricos é possível afirmar que a Viga Benkelman levou a resultados satisfatórios, possibilitando a extração dos dados para desenvolvimento das bacias defletoométricas. A realização do ensaio sobre paralelepípedo mostrou-se possível, sendo os resultados antes e após a execução do reforço asfáltico consideravelmente similares.

As bacias defletoométricas antes e depois do reforço asfáltico apresentam boa correlação descrevendo valores de deflexão máxima similares, assim demonstrando coerência nos valores encontrados. Com a análise das bacias foi possível perceber que pavimento apresentou diminuição das deflexões máximas e houve uma melhor distribuição dos esforços, no entanto a análise das bacias demonstra que o pavimento não possui condições estruturais em quatro dos cinco pontos analisados. Isso demonstra que estas condições estruturais poderiam ser observadas anteriormente a realização do projeto da pavimentação asfáltica, evitando assim uma degradação precoce da estrutura.

A retroanálise possibilitou encontrar os módulos de resiliência das camadas em todos os pontos analisados. Desta forma, foi possível verificar que os valores encontrados na camada asfáltica, base (paralelepípedos) e subleito, são coerentes aos encontrados na literatura para a maioria dos pontos analisados. No entanto, a camada de areia não apresentou módulo adequado para ser utilizado em pavimentação. Assim sendo, para alcançar maior precisão ou retirar dúvidas existentes em determinados momentos, seria interessante a realização de poços de sondagem para avaliação das camadas existentes.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o desenvolvimento do trabalho e análise dos resultados foi possível perceber a importância de estudos na área de análise estrutural deste tipo de pavimento. Sendo assim, necessário realizar estudos aprofundados para elaborar uma análise mais completa, desta forma, para contribuir com a pesquisa realizada sugere-se novos estudos, sendo eles:

- Realizar a análise defletoétrica em novos trechos na cidade, podendo serem analisados trechos com diferentes materiais constituintes e espessuras de camadas.
- Realizar múltiplos ensaios de Viga Benkelman no mesmo ponto de análise.
- Realizar poços de sondagem para análise laboratorial dos materiais constituintes em todas camadas, para aferir os módulos de resiliência.
- Desenvolver análise com elementos finitos a fim de realizar um método completo de análise de reflexão de trincas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, L. G. S. **Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos**. Dissertação (mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 5858 (2008) **Standart guide for calculating in situ equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory**, 2008.

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

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobras; Associação Brasileira das Empresas Distribuidora de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008.

BUENO, L. D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Almedina. Coimbra, Portugal, 2006.

CARDOSO, S. H. Faixas de módulos dinâmicos (elásticos) obtidos por retroanálise durante sete anos. 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Cuiabá, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. IPR/DNIT/ABNT. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT–ME 133/2010. **Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por intermédio da Viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER–PRO 175/94. **Aferição de Viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER–ME 024/94. **Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER–PRO 273/96. **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1996.

DNER- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 011. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. Volume 1 – Procedimento B, 1979.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações de tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA L.M.G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa Apresentação dos programas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2020.

GOACOLOU, H., Marchand, J.P. – **Fissuration des Couches de Roulement**. 5^{ème} Conférence Internationale Sur les Chaussées Bitumineuses. Delf, 1982.

HORAK, E. **Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavement in South Africa**. Thesis (PhD of Civil Engineering) - Department of Civil Engineering, University of Pretoria, Pretoria - South Pretoria, 1987.

LYTTON, R. L. **Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete**. *Geotextiles and Geomembranes*, 8: 217-237, 1989.

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

MEDEIROS, M. A. **Modelagem Computacional da Reflexão de Trincas por Fadiga em Revestimentos Asfálticos Reforçados com Geossintéticos via XFEM**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-340/2020, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro. 3^aed. 2015.

MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2006.

RIBAS, J. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. 2^a Edição, Fundação de Educação NAPA, Lanham, 1996.

ROCHA, N. R. Filho; RODRIGUES, R. M. **Levantamentos Deflectométricos: Fatores que Influenciam na Previsão de Desempenho de Pavimentos**. In: 31^º Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo-SP. Vol. 2. Associação Brasileira de Pavimentação, ABPv, 1998.

RODRIGUES, R.M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos**, Tese DSc. COPPE/UFRJ, 1991.

SANTOS, M S. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, SP, 2007.

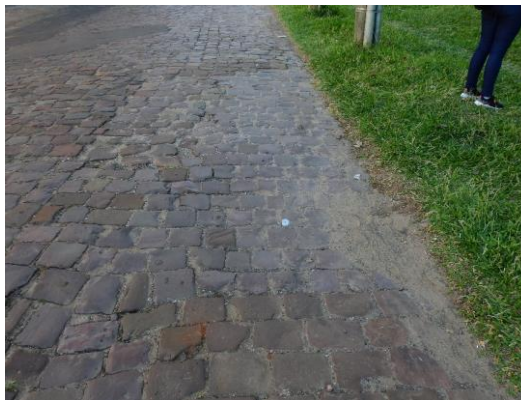
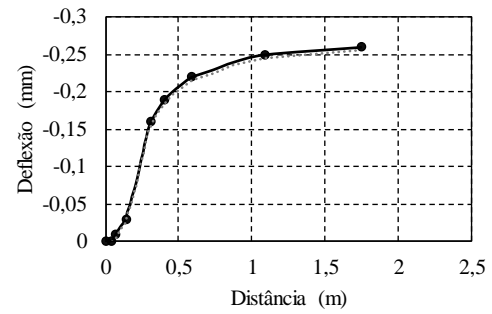
VILCHEZ, G. E. M. **Estudo De Sistemas Anti-Reflexão de Trincas na Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Tese apresentada à divisão de Pós Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 1996.

VILCHEZ, G. E. M. **Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas**. Tese (doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

APÊNDICE A

RUA VEREADOR CARBONEL - PONTO 1

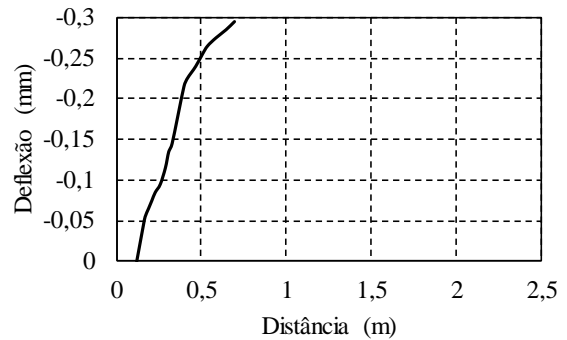
| Ensaio Rua 1 - Ponto 1 | | | | |
|------------------------|----------------------------------|---------------|--|-------------------------|
| Pontos | Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Distância (m) | Ajuste de Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Ajuste de Distância (m) |
| 1 | 0,05 | 0,164 | 0 | 0 |
| 2 | 0,05 | 0,207 | 0 | 0,043 |
| 3 | 0,04 | 0,235 | -0,01 | 0,071 |
| 4 | 0,03 | 0,266 | -0,02 | 0,102 |
| 5 | 0,02 | 0,304 | -0,03 | 0,14 |
| 6 | 0,01 | 0,314 | -0,04 | 0,15 |
| 7 | 0 | 0,334 | -0,05 | 0,17 |
| 8 | -0,01 | 0,345 | -0,06 | 0,181 |
| 9 | -0,02 | 0,362 | -0,07 | 0,198 |
| 10 | -0,03 | 0,376 | -0,08 | 0,212 |
| 11 | -0,04 | 0,388 | -0,09 | 0,224 |
| 12 | -0,05 | 0,399 | -0,1 | 0,235 |
| 13 | -0,06 | 0,409 | -0,11 | 0,245 |
| 14 | -0,07 | 0,423 | -0,12 | 0,259 |
| 15 | -0,08 | 0,431 | -0,13 | 0,267 |
| 16 | -0,09 | 0,445 | -0,14 | 0,281 |
| 17 | -0,1 | 0,456 | -0,15 | 0,292 |
| 18 | -0,11 | 0,476 | -0,16 | 0,312 |
| 19 | -0,12 | 0,502 | -0,17 | 0,338 |
| 20 | -0,13 | 0,534 | -0,18 | 0,37 |
| 21 | -0,14 | 0,57 | -0,19 | 0,406 |
| 22 | -0,15 | 0,62 | -0,2 | 0,456 |
| 23 | -0,16 | 0,683 | -0,21 | 0,519 |
| 24 | -0,17 | 0,756 | -0,22 | 0,592 |
| 25 | -0,18 | 0,903 | -0,23 | 0,739 |
| 26 | -0,19 | 1,04 | -0,24 | 0,876 |
| 27 | -0,2 | 1,254 | -0,25 | 1,09 |
| 28 | -0,21 | 1,911 | -0,26 | 1,747 |



RUA VEREADOR CARBONEL - PONTO 2

Ensaio Rua 1 - Ponto 2

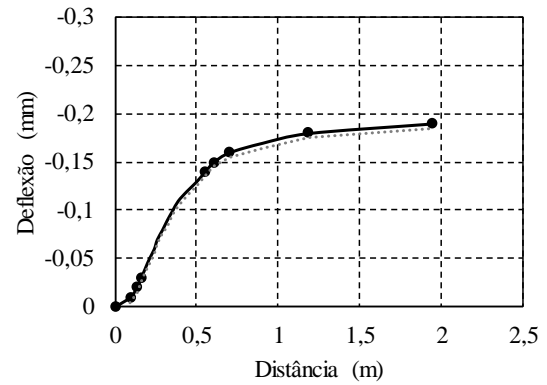
| Pontos | Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Distância (m) | Ajuste de Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Ajuste de Distância (m) |
|--------|----------------------------------|---------------|--|-------------------------|
| 1 | 0,115 | 0,21 | 0 | 0 |
| 2 | 0,115 | 0,33 | 0 | 0,12 |
| 3 | 0,07 | 0,37 | -0,045 | 0,16 |
| 4 | 0,06 | 0,38 | -0,055 | 0,17 |
| 5 | 0,05 | 0,4 | -0,065 | 0,19 |
| 6 | 0,04 | 0,42 | -0,075 | 0,21 |
| 7 | 0,03 | 0,44 | -0,085 | 0,23 |
| 8 | 0,02 | 0,47 | -0,095 | 0,26 |
| 9 | 0 | 0,5 | -0,115 | 0,29 |
| 10 | -0,02 | 0,52 | -0,135 | 0,31 |
| 11 | -0,03 | 0,54 | -0,145 | 0,33 |
| 12 | -0,1 | 0,61 | -0,215 | 0,4 |
| 13 | -0,11 | 0,63 | -0,225 | 0,42 |
| 14 | -0,125 | 0,68 | -0,24 | 0,47 |
| 15 | -0,14 | 0,72 | -0,255 | 0,51 |
| 16 | -0,15 | 0,75 | -0,265 | 0,54 |
| 17 | -0,16 | 0,8 | -0,275 | 0,59 |
| 18 | -0,17 | 0,86 | -0,285 | 0,65 |
| 19 | -0,18 | 0,91 | -0,295 | 0,7 |



RUA VEREADOR CARBONEL - PONTO 3

Ensaio Rua 1 - Ponto 3

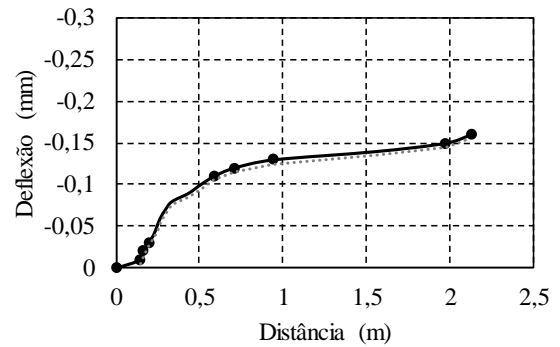
| Pontos | Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Distância (m) | Ajuste de Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Ajuste de Distância (m) |
|--------|----------------------------------|---------------|--|-------------------------|
| 1 | 0,01 | 0,134 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0,227 | -0,01 | 0,093 |
| 3 | -0,01 | 0,27 | -0,02 | 0,136 |
| 4 | -0,02 | 0,295 | -0,03 | 0,161 |
| 5 | -0,03 | 0,32 | -0,04 | 0,186 |
| 6 | -0,04 | 0,345 | -0,05 | 0,211 |
| 7 | -0,05 | 0,375 | -0,06 | 0,241 |
| 8 | -0,06 | 0,394 | -0,07 | 0,26 |
| 9 | -0,07 | 0,426 | -0,08 | 0,292 |
| 10 | -0,08 | 0,455 | -0,09 | 0,321 |
| 11 | -0,09 | 0,488 | -0,1 | 0,354 |
| 12 | -0,1 | 0,522 | -0,11 | 0,388 |
| 13 | -0,11 | 0,575 | -0,12 | 0,441 |
| 14 | -0,12 | 0,635 | -0,13 | 0,501 |
| 15 | -0,13 | 0,686 | -0,14 | 0,552 |
| 16 | -0,14 | 0,74 | -0,15 | 0,606 |
| 17 | -0,15 | 0,835 | -0,16 | 0,701 |
| 18 | -0,16 | 1,04 | -0,17 | 0,906 |
| 19 | -0,17 | 1,32 | -0,18 | 1,186 |
| 20 | -0,18 | 2,08 | -0,19 | 1,946 |



RUA VEREADOR CARBONEL - PONTO 4

Ensaio Rua 1 - Ponto 4

| Pontos | Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Distância (m) | Ajuste de Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Ajuste de Distância (m) |
|--------|----------------------------------|---------------|--|-------------------------|
| 1 | 0,01 | 0,214 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0,36 | -0,01 | 0,146 |
| 3 | -0,01 | 0,38 | -0,02 | 0,166 |
| 4 | -0,02 | 0,41 | -0,03 | 0,196 |
| 5 | -0,03 | 0,44 | -0,04 | 0,226 |
| 6 | -0,04 | 0,46 | -0,05 | 0,246 |
| 7 | -0,05 | 0,48 | -0,06 | 0,266 |
| 8 | -0,06 | 0,51 | -0,07 | 0,296 |
| 9 | -0,07 | 0,55 | -0,08 | 0,336 |
| 10 | -0,08 | 0,65 | -0,09 | 0,436 |
| 11 | -0,09 | 0,72 | -0,1 | 0,506 |
| 12 | -0,1 | 0,8 | -0,11 | 0,586 |
| 13 | -0,11 | 0,92 | -0,12 | 0,706 |
| 14 | -0,12 | 1,155 | -0,13 | 0,941 |
| 15 | -0,13 | 1,77 | -0,14 | 1,556 |
| 16 | -0,14 | 2,19 | -0,15 | 1,976 |
| 17 | -0,15 | 2,34 | -0,16 | 2,126 |



RUA VEREADOR CARBONEL - PONTO 5

Ensaio Rua 1 - Ponto 5

| Pontos | Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Distância (m) | Ajuste de Leitura no Estensômetro (0,01mm) | Ajuste de Distância (m) |
|--------|----------------------------------|---------------|--|-------------------------|
| 1 | 0,2 | 0,3025 | 0 | 0 |
| 2 | 0,15 | 0,385 | -0,05 | 0,0825 |
| 3 | 0,14 | 0,4 | -0,06 | 0,0975 |
| 4 | 0,13 | 0,43 | -0,07 | 0,1275 |
| 5 | 0,12 | 0,47 | -0,08 | 0,1675 |
| 6 | 0,11 | 0,5 | -0,09 | 0,1975 |
| 7 | 0,1 | 0,53 | -0,1 | 0,2275 |
| 8 | 0,09 | 0,56 | -0,11 | 0,2575 |
| 9 | 0,08 | 0,6 | -0,12 | 0,2975 |
| 10 | 0,07 | 0,67 | -0,13 | 0,3675 |
| 11 | 0,06 | 0,785 | -0,14 | 0,4825 |
| 12 | 0,05 | 1,08 | -0,15 | 0,7775 |
| 13 | 0,043 | 1,77 | -0,157 | 1,4675 |
| 14 | 0,043 | 2,11 | -0,157 | 1,8075 |

