

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL– PCV**

**BEATRIZ THAYNARA DOS SANTOS GASPAR**

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA ELEMENTOS FINITOS DO**  
**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS**  
**RODOVIÁRIOS SOB APLICAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS**  
**E DINÂMICAS**

**MARINGÁ**

**2022**

**BEATRIZ THAYNARA DOS SANTOS GASPAR**

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA ELEMENTOS FINITOS DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS  
SOB APLICAÇÃO DE CARGAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis.

**MARINGÁ**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

G249a

Gaspar, Beatriz Thaynara dos Santos

Análise numérica via elementos finitos do comportamento mecânico de pavimentos rodoviários sob aplicação de cargas estáticas e dinâmicas / Beatriz Thaynara dos Santos Gaspar. -- Maringá, PR, 2022.  
122 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Engenharia civil. 2. Engenharia rodoviária - Pavimentação. 3. Pavimentação rodoviária. I. Reis, Jeselay Hemetério Cordeiro dos, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 625.8

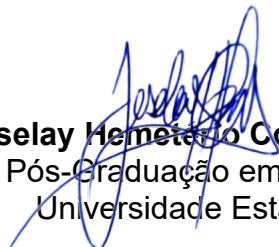
Márcia Regina Paiva - CRB-9/1267

BEATRIZ THAYNARA DOS SANTOS GASPAR

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS SOB APLICAÇÃO  
DE CARGAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 28/11/2022, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

**BANCA EXAMINADORA**

  
**Prof. Dr. Jeselay Hemelesio Cordeiro dos Reis**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 JESNER SERENI ILDEFONSO  
Data: 11/05/2023 10:35:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Jesner Sereni Ildefonso**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
Universidade Estadual de Maringá

Documento assinado digitalmente  
 MARTA PEREIRA DA LUZ  
Data: 10/05/2023 17:55:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Marta Pereira da Luz**  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Assim como todas as conquistas, dedico  
esta dissertação à minha família.

### AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá por oferecer e apoiar este e outros cursos de pós-graduação.

Ao Professor Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis pelos ensinamentos transmitidos, confiança, dedicação, paciência e motivação ao longo desta pesquisa.

A todo corpo docente do Programa de Mestrado em Engenharia Civil, pelo conhecimento compartilhado de forma impecável.

Aos meus pais, Edson e Irene, pelo amor incondicional, apoio e incentivo constantes.

À minha avó Terezinha, por toda sua fé.

Aos meus amigos, em especial Thainá, Leonardo e Adriano, vocês foram essenciais nessa trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

### RESUMO

No presente trabalho avaliou-se o comportamento mecânico de pavimento flexível sob aplicação de cargas estáticas e dinâmicas a partir da concepção de um modelo em elementos finitos com a utilização do software ABAQUS. A construção em elementos finitos permitiu a inserção de diversas variáveis desprezadas no projeto de pavimentos possibilitando uma análise mais realista do comportamento da estrutura. O modelo foi calibrado a partir das medidas de deflexão obtidas no ensaio de Viga Benkelman e FWD realizados em segmento de duplicação da rodovia BR-376. Após validação do modelo fez-se possível a avaliação do comportamento estrutural do pavimento por meio da variação de características inerentes ao projeto, como a variação de espessura das camadas de base e sub-base, inversão de camadas, alteração das condições de aderência, modelo de carregamento e variação de pressão de inflação dos pneus. Ao todo, foram realizadas 240 simulações e os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios. Em suma, a deflexão máxima nos casos de análise estática e dinâmica apresentou valores muito próximos entre si, mas formatos da bacia de deflexão bastante distintos. A alteração de espessura das camadas de base e sub-base, bem como a inversão destas camadas, apresentou pouca influência nos valores encontrados. Em contrapartida, a condição de aderência parcial entre as camadas levou a valores de deflexão surpreendentemente maiores e a variação da pressão dos pneus pouco afetou os resultados.

**Palavras-chave:** Pavimentação. Deflexão. Abaqus.

### ABSTRACT

In the present work, the mechanical behavior of flexible pavement layers under the application of static and dynamic loads was evaluated based on the development of a finite element model using the ABAQUS software. The construction of a model in finite elements allowed the insertion of several variables usually neglected in pavement design, enabling a more realistic analysis of the structure's behavior. The model was calibrated from deflection measurements obtained with Benkelman beam and FWD deflection tests carried out in a duplication segment of the BR-376 highway. After validation of the model, it was possible to evaluate the structural behavior of the pavement through the variation of characteristics inherent to pavement design, such as the variation of thickness of the base and sub-base layers, inversion of layers, variation of adhesion conditions, type of loading and tire inflation pressure variation. In total, 240 simulations were carried out and the results obtained proved to be satisfactory. In short, the maximum deflection in the cases of the static and dynamic analysis presented values very close to each other, but very different shapes of the deflection basin. The change in thickness of the base and sub-base layers, as well as the inversion of these layers, had little influence on the deflection values. On the other hand, the condition of partial adhesion between the layers led to surprisingly higher deflection values and the variation of tire pressure had little effect on the results.

**Keywords:** Paving. Deflection. ABAQUS.

LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Esquema de Seção Transversal de Pavimento .....                                                                 | 18 |
| Figura 2.2 - Cargas aplicadas em pavimento .....                                                                             | 20 |
| Figura 2.3 - Estado de tensões e deformações atuantes .....                                                                  | 20 |
| Figura 2.4 - Tensões geradas por carregamento pontual P .....                                                                | 21 |
| Figura 2.5 - Modelo inicial de Burmister .....                                                                               | 24 |
| Figura 2.6 - Bulbo de pressões de um pavimento asfáltico .....                                                               | 27 |
| Figura 2.7 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman .....                                                                     | 29 |
| Figura 2.8 - Localização dos pontos para medida da deflexão .....                                                            | 30 |
| Figura 2.9 - Posicionamento inicial do ensaio de viga Benkelman .....                                                        | 31 |
| Figura 2.10 - Determinação das deflexões no Trecho XXVII-A .....                                                             | 32 |
| Figura 2.11 - Deflectômetro de impacto .....                                                                                 | 33 |
| Figura 2.12 - Princípio de funcionamento do FWD .....                                                                        | 34 |
| Figura 2.13 - FWD da marca Dynatest em operação .....                                                                        | 34 |
| Figura 2.14 - Detalhe dos sensores e placa .....                                                                             | 35 |
| Figura 2.15 - Propriedades geométricas e de materiais da estrutura do pavimento .....                                        | 37 |
| Figura 2.16 - Condições de aderência na interface .....                                                                      | 37 |
| Figura 2.17 – Deformações máximas: (a) camada de revestimento, (b) camada asfáltica inferior e (c) subleito .....            | 38 |
| Figura 2.18 - Distribuição de tensões ao longo da espessura das camadas asfálticas .....                                     | 39 |
| Figura 2.19 - Propriedades dos materiais utilizados na análise em elementos finitos .....                                    | 40 |
| Figura 2.20 - Comparação entre as bacias de deflexão dinâmicas e a deflexão medida com FWD .....                             | 41 |
| Figura 2.21 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas longitudinais submetido a carga estática ..... | 42 |
| Figura 2.22 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas longitudinais submetido a carga dinâmica ..... | 42 |
| Figura 2.23 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas transversais submetido a carga dinâmica .....  | 43 |
| Figura 2.24 - Principais recomendações das metodologias selecionadas .....                                                   | 44 |
| Figura 2.25 - Pavimento Padrão .....                                                                                         | 44 |
| Figura 2.26 - Resumo dos resultados de MR (MPa) obtidos nas diferentes metodologias .....                                    | 45 |
| Figura 2.27 - Resumo das análises .....                                                                                      | 46 |

## LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.28 - Configuração do Pavimento.....                                                 | 47 |
| Figura 2.29 - Espessura das camadas e propriedades dos materiais.....                        | 48 |
| Figura 2.30 - Valores de K utilizados no modelo não linear ( $M = k_1\theta^k_2$ ) .....     | 48 |
| Figura 2.31 - Deflexões na profundidade de 600mm .....                                       | 49 |
| Figura 2.32 - Modelo axissimétrico de pavimento flexível.....                                | 50 |
| Figura 2.33 - Bacias de deflexão para o método estático e dinâmico .....                     | 51 |
| Figura 2.34 - Detalhes da análise .....                                                      | 52 |
| Figura 2.35 - Propriedades Mecânicas .....                                                   | 53 |
| Figura 2.36 - Deformações obtidas por instrumentação e métodos numéricos.....                | 54 |
| Figura 3.1 - Mapa de Situação.....                                                           | 55 |
| Figura 3.2 - Vista do relevo ao longo do Trecho XXVII-A .....                                | 56 |
| Figura 3.3 - Pavimento Tipo.....                                                             | 58 |
| Figura 3.4 - Deflexões admissíveis.....                                                      | 59 |
| Figura 3.5 - Interface de entrada do ABAQUS/CAE .....                                        | 62 |
| Figura 3.6 – Modelo e sistema de referência no espaço.....                                   | 65 |
| Figura 3.7 - Pavimento Tipo de Projeto .....                                                 | 66 |
| Figura 3.8 - Especificação das camadas do Pavimento-Tipo .....                               | 66 |
| Figura 3.9 - CBR característico .....                                                        | 67 |
| Figura 3.10 - Área de contato pneu-pavimento .....                                           | 71 |
| Figura 3.11 – Áreas de contato pneu x pavimento .....                                        | 72 |
| Figura 3.12 - Aplicação do carregamento ao modelo I .....                                    | 72 |
| Figura 3.13 – Aplicação da carga e Amplitude .....                                           | 73 |
| Figura 3.14 – Aplicação de carregamento ao modelo II.....                                    | 74 |
| Figura 3.15 - Aplicação das condições de contorno.....                                       | 74 |
| Figura 3.16 - Discretização da malha no modelo .....                                         | 75 |
| Figura 3.17 - Comportamento da interface pelo modelo de atrito de Coulomb.....               | 77 |
| Figura 4.1 - Deflexão sob carregamento estático .....                                        | 79 |
| Figura 4.2 - Bacias de Deflexão .....                                                        | 80 |
| Figura 4.3 Valores de deflexão de campo e modelo numérico .....                              | 82 |
| Figura 4.4 Valores de deflexão de campo e modelo numérico .....                              | 83 |
| Figura 4.5 Deflexão sob carregamento dinâmico.....                                           | 83 |
| Figura 4.6 Comparativo entre as bacias de deflexão de campo e modelo numérico.....           | 84 |
| Figura 4.7 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 14 cm para o Modelo I..... | 85 |

## LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.8 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 16 cm para o Modelo I.....                          | 86  |
| Figura 4.9 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 18 cm para o Modelo I.....                          | 87  |
| Figura 4.10 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 20 cm para o Modelo I .....                        | 87  |
| Figura 4.11 Comparativo entre extremos: deflexões considerando camadas de base e sub base com 14 e 20cm.....          | 89  |
| Figura 4.12 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 14 cm para o Modelo II.....                        | 90  |
| Figura 4.13 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 16 cm para o Modelo II.....                        | 91  |
| Figura 4.14 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 18 cm para o Modelo II.....                        | 91  |
| Figura 4.15 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 20 cm para o Modelo II.....                        | 92  |
| Figura 4.16 Deflexões considerando camadas de base e sub base com 14 e 20cm.....                                      | 93  |
| Figura 4.17 Comparativo entre o formato da bacia de deflexão para os Modelos I e II .....                             | 94  |
| Figura 4.18 Comparativo entre deflexões considerando a inversão das camadas de base e sub-base para o Modelo I .....  | 95  |
| Figura 4.19 Comparativo entre deflexões considerando a inversão das camadas de base e sub-base para o Modelo II ..... | 97  |
| Figura 4.20 Comparativo considerando aderência completa e parcial para o Modelo I .....                               | 99  |
| Figura 4.21 Diferença Máxima de 40,93% no Modelo I para o caso de $C=0,4$ .....                                       | 100 |
| Figura 4.22 Comparativo considerando aderência completa e parcial para o Modelo I – Base de BGMC.....                 | 104 |
| Figura 4.23 Comparativo entre aderência completa e parcial no caso crítico $C=0,4$ .....                              | 105 |
| Figura 4.24 Diferença Máxima de 29,19% para o caso de $C=0,4$ .....                                                   | 107 |
| Figura 4.25 Alteração da pressão de inflação dos pneus.....                                                           | 109 |

LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 - Parâmetros do Modelo.....                                                                                                       | 70  |
| Tabela 3.2 - Dimensões da malha em cada camada .....                                                                                         | 76  |
| Tabela 4.1 - Redução das deflexões .....                                                                                                     | 80  |
| Tabela 4.2 – Comparativo de Deflexões .....                                                                                                  | 81  |
| Tabela 4.3 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo I .....                               | 88  |
| Tabela 4.4 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo II .....                              | 92  |
| Tabela 4.5 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo I no caso de inversão de camadas..... | 96  |
| Tabela 4.6 – Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto .....                                                                  | 98  |
| Tabela 4.7 – Diferenças percentuais em relação à condição de aderência completa .....                                                        | 99  |
| Tabela 4.8 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando $C=0,4$ para o Modelo I .....                               | 101 |
| Tabela 4.9 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando $C=0,6$ para o Modelo I .....                               | 102 |
| Tabela 4.10 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando $C=0,8$ para o Modelo I .....                              | 103 |
| Tabela 4.11 – Diferenças percentuais em relação à condição de aderência completa – Base de BGMC .....                                        | 104 |
| Tabela 4.12 - Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto para o Modelo I – Base de BGMC.....                                   | 106 |
| Tabela 4.13 – Influência da variação de espessura para os casos de aderência parcial no Modelo I – Base de BGMC .....                        | 107 |
| Tabela 4.14 – Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto para o Modelo II – Base de BGMC .....                                 | 108 |
| Tabela 4.15 – Deflexão máxima para as diferentes pressões de inflação.....                                                                   | 109 |

SUMÁRIO

|       |                                                                                       |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                                                      | 14 |
| 1.1   | JUSTIFICATIVA .....                                                                   | 16 |
| 1.2   | OBJETIVOS .....                                                                       | 16 |
| 1.2.1 | Objetivo geral .....                                                                  | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos .....                                                           | 17 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                           | 18 |
| 2.1   | ESFORÇOS EM PAVIMENTOS .....                                                          | 19 |
| 2.2   | ESTUDO DE TENSÕES X DEFORMAÇÕES COM BASE NA TEORIA DA ELASTICIDADE .....              | 21 |
| 2.2.1 | Módulo de Resiliência .....                                                           | 24 |
| 2.3   | AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO .....                                               | 26 |
| 2.3.1 | Viga Benkelman .....                                                                  | 28 |
| 2.3.2 | Falling Weight Deflectometer (FWD).....                                               | 33 |
| 2.4   | ESTUDOS NUMÉRICOS .....                                                               | 36 |
| 2.4.1 | Efeito de Aderência entre camadas .....                                               | 36 |
| 2.4.2 | Efeito da presença de trincas e fissuras .....                                        | 39 |
| 2.4.3 | Efeito da variação do módulo de resiliência na análise de tensões e deformações ..... | 43 |
| 2.4.4 | Análise não linear em elementos finitos.....                                          | 46 |
| 2.4.5 | Medidas de FWD aplicados à modelagem estática e dinâmica.....                         | 50 |
| 2.4.6 | Deformações específicas de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico .       | 52 |
| 3     | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....                                                     | 55 |
| 3.1   | CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO .....                                                        | 55 |
| 3.1.1 | Geologia Geral.....                                                                   | 56 |
| 3.1.2 | Estudos Geotécnicos.....                                                              | 56 |
| 3.1.3 | Projeto de Pavimentação .....                                                         | 57 |
| 3.2   | BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL.....                                                      | 59 |
| 3.3   | ANÁLISE NUMÉRICA DE PAVIMENTOS .....                                                  | 61 |
| 3.3.1 | O software ÁBAQUS .....                                                               | 62 |
| 3.4   | MODELO NUMÉRICO .....                                                                 | 64 |
| 3.5   | DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO PROBLEMA .....                                              | 64 |

## SUMÁRIO

---

|       |                                                                                                                                                            |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6   | O MATERIAL .....                                                                                                                                           | 67  |
| 3.6.1 | Subleito .....                                                                                                                                             | 67  |
| 3.6.2 | Solo Cal .....                                                                                                                                             | 68  |
| 3.6.3 | Camadas de Base e Sub-base .....                                                                                                                           | 69  |
| 3.6.4 | Camadas de concreto asfáltico .....                                                                                                                        | 69  |
| 3.7   | CARREGAMENTOS .....                                                                                                                                        | 71  |
| 3.7.1 | Modelo I - Simulação da Viga Benkelman .....                                                                                                               | 71  |
| 3.7.2 | Modelo II - Simulação do FWD .....                                                                                                                         | 73  |
| 3.8   | CONDIÇÕES DE CONTORNO .....                                                                                                                                | 74  |
| 3.9   | MALHA .....                                                                                                                                                | 75  |
| 3.10  | SUPERFÍCIE DE CONTATO .....                                                                                                                                | 76  |
| 4     | RESULTADOS .....                                                                                                                                           | 78  |
| 4.1   | VALIDAÇÃO DO MODELO .....                                                                                                                                  | 78  |
| 4.1.1 | Modelo I .....                                                                                                                                             | 78  |
| 4.1.2 | Modelo II .....                                                                                                                                            | 82  |
| 4.2   | RESPOSTAS ESTRUTURAIS .....                                                                                                                                | 84  |
| 4.2.1 | Variação da espessura das camadas de base e sub-base .....                                                                                                 | 85  |
| 4.2.2 | Inversão das camadas de base e sub-base .....                                                                                                              | 94  |
| 4.2.3 | Variação das condições de aderência entre as camadas e espessura das camadas de base e sub-base .....                                                      | 98  |
| 4.2.4 | Variação das condições de aderência entre as camadas, inversão das camadas de base e sub-base e variação da espessura das camadas de base e sub-base ..... | 103 |
| 4.2.5 | Variação de Pressão dos Pneus .....                                                                                                                        | 108 |
| 5     | CONCLUSÃO .....                                                                                                                                            | 110 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                          | 113 |

### 1 INTRODUÇÃO

A determinação do comportamento adequado do pavimento em serviço é de fundamental importância para a racionalização dos investimentos em infraestrutura viária no Brasil. Por isso, a avaliação do desempenho de pavimentos rodoviários tem sido fruto de muitas pesquisas nas últimas décadas, uma vez que parcela significativa da malha rodoviária nacional não atinge a vida útil de projeto, gerando um grande custo de manutenção.

Em relação à sua constituição, os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, construídas sobre um terreno de fundação e destinadas a resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima, tendo por objetivo fornecer segurança e conforto ao usuário, atrelando máxima qualidade e minimização de custos. Segundo Almeida (2019), são tradicionalmente classificados como rígidos ou flexíveis, referindo-se à sua característica de deformabilidade e à capacidade de acompanhar os deslocamentos do subleito.

Tais deslocamentos são consequência da aplicação de esforços decorrentes da atuação das cargas de tráfego, que podem ser estáticas ou dinâmicas. A carga estática permanece sem variações de intensidade ao longo do tempo, sendo aplicada gradativamente. Em contrapartida, no carregamento dinâmico o tempo é uma das variáveis na aplicação da carga que pode ser constante ou apresentar variações de intensidade.

Esses esforços, quando aplicados à estrutura, induzem o desenvolvimento de deformações, que podem ser recuperáveis ou permanentes. As deformações elásticas ou recuperáveis promovem os deslocamentos verticais que surgem na superfície do pavimento ou no interior da estrutura e desaparecem assim que retirada a carga que os produziu, sendo nomeadas, neste caso, deflexão do pavimento. A avaliação deflectométrica aplicada ao controle de qualidade na execução de pavimentos flexíveis é um dos principais parâmetros considerados no projeto de dimensionamento desse tipo de estrutura. Isto porque a partir do controle de deflexões é possível avaliar se os valores de módulo de resiliência adotados em projeto estão sendo atingidos em campo.

Ao longo dos anos, a engenharia de pavimentos vem adotando uma abordagem mais racional no dimensionamento deste tipo de estrutura utilizando-se de modelos empírico-mecanísticos para previsão de respostas mecânicas (tensões, deformações e deflexões). No entanto, a análise do comportamento de pavimentos em sistemas de camadas submetidas às cargas de tráfego a partir de métodos mecanísticos admite uma série de simplificações,

considerando os materiais homogêneos, elástico-lineares e isotrópicos, além de carregamento estático. Buscando simulações mais realistas do desempenho mecânico, uma das ferramentas mais utilizadas para estudo do comportamento tensão x deformação de meios contínuos utiliza o método dos elementos finitos. A modelagem em elementos finitos permitiu o desenvolvimento de modelos mais realistas no que se refere às cargas e materiais que compõe a estrutura. Apesar disso, sua utilização na mecânica dos pavimentos ainda é bastante restrita, seja em função do comportamento reológico dos materiais, da iteração entre as camadas ou da consideração adequada dos esforços provenientes do tráfego de veículos. Neste sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de uma abordagem para interpretação dos esforços estáticos e dinâmicos em pavimentos rodoviários.

Deste modo, no presente trabalho avaliou-se comportamento mecânico de pavimentos rodoviários via Método dos Elementos Finitos a partir da determinação das deflexões induzidas no topo do pavimento. Para tal, foram criados dois modelos, denominados Modelo I e Modelo II e que diferem entre si principalmente nas condições de carregamento. O modelo I simula as condições do ensaio de Viga Benkelman, em que o carregamento é estático e aplicado em formato de duas elipses que representam as rodas duplas do caminhão. O modelo II, por sua vez, é implantado com o objetivo de simular as medições de deflexão realizadas pelo FWD, sob aplicação de carregamento dinâmico aplicado em área circular que representa a placa de carga.

Após calibração e validação dos modelos com base nos resultados de campo, realizou-se um estudo paramétrico a fim de avaliar a eficiência da estrutura do pavimento a partir das seguintes considerações: variação da espessura das camadas de base e sub-base, inversão das camadas de BGMC e BGTC na estrutura, variações no modelo de aderência entre as camadas e variação da pressão de inflação dos pneus.

Foram realizadas 240 simulações e os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios. Em suma, os modelos I e II apresentaram valores máximos de deflexão similares, mas os formatos da bacia de deflexão bastante distintos. A alteração de espessura das camadas de base e sub-base, bem como a inversão destas camadas, apresentou pouca influência dos deslocamentos, com diferença percentual máxima de 2,50% em relação à estrutura de projeto. Em contrapartida, a condição de aderência parcial entre as camadas levou à valores de deflexão surpreendentemente maiores, atingindo 53,65% de aumento no caso

mais crítico. Por fim, a variação da pressão dos pneus pouco afetou os resultados, com diferenças percentuais menores que 1%.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O conhecimento do comportamento mecânico real do pavimento quando submetido à aplicação de esforços externos é de extrema importância em todas as fases do projeto, desde a concepção, dimensionamento e principalmente em relação ao desempenho da estrutura sobre as condições de tráfego, tendo em vista que um dos principais objetivos do projeto é garantir conforto e segurança aos usuários, além da durabilidade do pavimento. A análise numérica aplicada nesse contexto propicia a obtenção de resultados com maior acurácia em função da possibilidade de consideração de um maior número de variáveis intervenientes no problema, tais como geometria, estrutura, interação entre camadas, modelo reológico dos materiais, esforços estáticos e dinâmicos.

Além disso, faz-se necessária a calibração do modelo para a simulação de condições mais realistas. Dessa forma, a comparação entre os resultados obtidos pela análise numérica e os dados previamente determinados através de ensaios de campo em obra de pavimentação rodoviária já executada, traz uma estimativa do nível de aplicabilidade do modelo concebido, bem como seus resultados.

Ainda, os resultados de deflexão obtidos a partir da análise paramétrica, que considera as variações de espessura das camadas de base e sub-base, inversão de camadas na estrutura, variação dos modelos de aderência e pressão de inflação dos pneus, permite a avaliação da eficiência da estrutura do pavimento projetado, evidenciando cenários não previstos no projeto inicial e gerando subsídios ao projeto mecanístico.

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico dos pavimentos quando submetido a cargas estáticas e dinâmicas provenientes do tráfego de veículos utilizando o método dos elementos finitos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

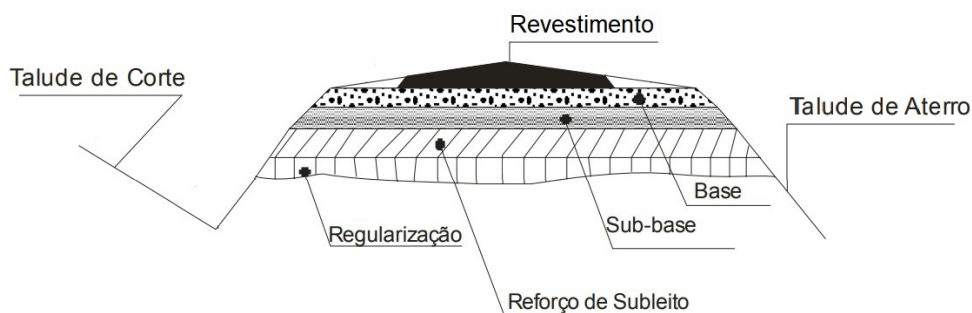
- Avaliar as deflexões induzidas pelo carregamento estático e dinâmico;
- Avaliar as características geométricas da estrutura do pavimento;
- Avaliar os modelos reológicos/constitutivos que melhor representam o comportamento dos materiais constituintes do pavimento;
- Avaliar os modelos de aderência entre camadas;
- Avaliar o nível de acurácia da abordagem em elementos finitos comparando com os dados experimentais de campo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas destinado a resistir aos esforços do tráfego e do clima, trazendo conforto e segurança aos usuários. Deve ser dimensionado atendendo aos requisitos de Engenharia, atrelando minimização de custos e máxima eficiência, durabilidade e segurança.

A Figura 2.1 traz uma representação genérica desse tipo de estrutura, onde podem ser observadas as principais camadas que a compõe:

**Figura 2.1 - Esquema de Seção Transversal de Pavimento**



Fonte: Adaptado de Manual de Pavimentação do DNIT (2006)

O desempenho no pavimento depende fundamentalmente do comportamento individual de cada camada e do efeito de grupo, ou seja, do comportamento destas em conjunto.

De forma sucinta, o Subleito é o terreno de fundação do pavimento e destina-se a absorver os esforços oriundos das demais camadas. Sobre o Subleito, realiza-se a Regularização, de espessura irregular e que visa a conformação transversal e longitudinal da camada subjacente. Após a regularização, pode-se aplicar o Reforço de Subleito, que devidamente compactado apresenta estabilidade e durabilidade, trazendo aumento da capacidade estrutural. A sub-base é uma camada complementar à base, e juntas tem a função de aliviar os esforços sofridos pelo revestimento, sendo compostas usualmente por material granular. Ressalta-se que a base é a camada estruturalmente mais importante. O Revestimento, também conhecido como capa, é a camada mais nobre do pavimento e destina-se a receber diretamente as ações do tráfego e do clima, distribuindo-as de forma atenuada às

camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento tanto quanto possível, e melhorando as condições de rolamento, no que tange ao conforto do usuário.

### 2.1 ESFORÇOS EM PAVIMENTOS

Segundo o Manual de Técnicas de Pavimentação, dentre as funções do pavimento, as principais dizem respeito aos esforços aos quais estão submetidos, sendo mais especificamente:

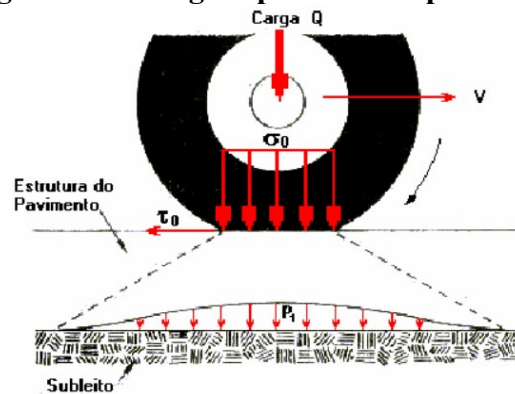
- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

Isso porque estudos vêm demonstrando que as principais formas de ruptura de pavimentos flexíveis, em sua composição de base granular e revestimento de concreto asfáltico, se dá basicamente de dois modos: por dano à fadiga, ocasionado pelas deformações de tração na fibra inferior do revestimento e relacionadas à tensão cisalhante, e por deformação permanente, devido ao acúmulo de deformações plásticas nas camadas e intimamente ligadas às tensões normais de compressão.

Os esforços verticais são transmitidos ao pavimento por meio das rodas pneumáticas simples ou duplas, arranjadas em eixos simples e tandem, duplos ou triplos e possuem duas parcelas: uma de carga estática e outra de carga dinâmica. Segundo Yi e Hedrick (1992), a carga estática depende do peso e da geometria dos veículos, enquanto o efeito dinâmico é causado pela vibração do veículo, sendo altamente dependente das características de suspensão do mesmo, bem como da irregularidade da superfície da via.

Supondo o pavimento solicitado por uma carga de veículo  $Q$ , que se desloca sobre o revestimento com uma velocidade  $V$ , este fica sujeito a uma tensão normal na direção vertical  $\sigma_0$  (de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal  $\tau_0$  (de cisalhamento), conforme mostra a Figura 2.2. As variadas camadas componentes da estrutura do pavimento possuem a função de atenuar a tensão vertical aplicada na superfície para que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão vertical. A tensão horizontal aplicada na superfície exige que o revestimento possua uma coesão mínima para suportar a parcela do esforço de cisalhamento (SANTANA, 1993).

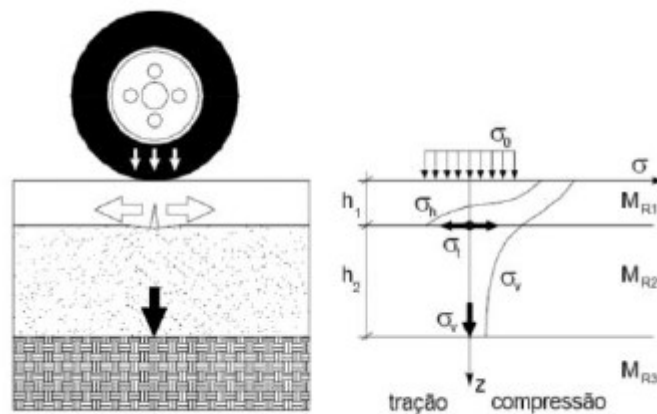
Figura 2.2 - Cargas aplicadas em pavimento



Fonte: Santana (1993)

Assim, o pavimento deve ser projetado de forma a resistir aos esforços a que será submetido durante a vida útil de projeto. Como em outras estruturas de engenharia, no projeto de pavimentos deve-se determinar o estado de tensões e deformações atuantes, como esquematizado na Figura 2.3. Em seguida, deve ocorrer a compatibilização com o estado de tensões e deformações admissíveis, levando em consideração determinada vida de projeto, sendo este o estudo base da Mecânica dos Pavimentos.

Figura 2.3 - Estado de tensões e deformações atuantes



Fonte: Medina e Motta (2005)

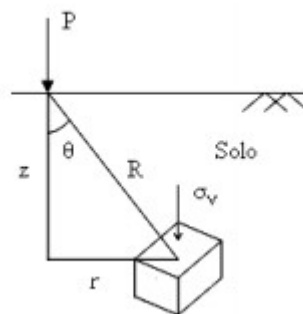
O cálculo desses esforços pode ser realizado com base na teoria da elasticidade, a partir da caracterização dos elementos que compõe a sua estrutura, bem como os materiais envolvidos, levando em conta a espessura das camadas, as propriedades elásticas dos

materiais e a caracterização do tráfego atuante, discriminando os tipos de eixos e cargas dos mesmos (MEDINA E MOTTA, 2005).

### 2.2 ESTUDO DE TENSÕES X DEFORMAÇÕES COM BASE NA TEORIA DA ELASTICIDADE

Os primeiros estudos sobre o efeito da aplicação de um carregamento na superfície de um espaço semi-infinito, linear-elástico, isotrópico e homogêneo foram realizados por Boussinesq (1885). A partir das premissas básicas da Teoria da Elasticidade, Boussinesq desenvolveu formulações matemáticas que resultam na determinação da tensão em um ponto do solo, situado na profundidade  $z$ , e afastamento  $r$ , devido à aplicação de uma carga concentrada  $P$  na superfície, como pode ser observado na Figura 2.4 a seguir:

**Figura 2.4 - Tensões geradas por carregamento pontual P**



Os estudos foram então estendidos de maneira a considerar diferentes formas de carregamento distribuído na superfície do terreno. A partir deste modelo, o valor da deflexão na superfície do material, sob o ponto de aplicação de carga, pode ser determinado através da equação que segue (MEDINA; MOTTA,2015):

$$D_0 = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot p \cdot r}{E} \quad (1)$$

Onde:

$D_0$  = deflexão máxima na superfície, em mm;

$p$  = pressão, em Mpa;

$r$  = raio de aplicação da carga, em mm;

$\mu$  = coeficiente de Poisson do material;

$E$  = módulo de resiliência do material, em Mpa.

No entanto, no caso da medição de deflexão a partir da viga Benkelman, em que se utiliza um eixo de caminhão e o valor é obtido a partir da medida entre as rodas, o cálculo da deflexão em ponto afastado do centro de aplicação de carga se faz necessário. Desta forma, para o cálculo da deflexão quando o ponto em análise está afastado do centro de aplicação de carga, utiliza-se a seguinte equação, trazida por Balbo (2007):

$$D_r = \frac{p \cdot r^2 \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot x} \quad (2)$$

Onde:

$D_r$  = deflexão na superfície, à distância “ $r$ ” da aplicação da carga, em mm;

$p$  = pressão, em Mpa;

$r$  = raio da área circular de aplicação da carga, em Mpa;

$\mu$  = coeficiente de Poisson do material;

$E$  = módulo de resiliência do material, em Mpa.

$x$  = distância na horizontal entre o ponto de aplicação de carga e o ponto em análise.

Mais tarde, as formulações de Boussinesq foram utilizadas nos estudos teóricos-experimentais realizados pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), que segundo Silva (2014) resultaram em três importantes aplicações:

- i) Extrapolações das curvas de dimensionamento empírico de pavimentos flexíveis;
- ii) Cálculo da carga de roda equivalente para trens-de-pouso de configurações complexas;
- iii) Desenvolvimento de expressões matemáticas para as curvas de dimensionamento baseadas no California Bearing Ratio (CBR) do subleito.

A partir da teoria de Boussinesq, Donald Burmister apresentou em 1945 a chamada Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, um método para determinação de tensões e

deformações em sistemas de duas camadas, sendo posteriormente extrapolado para sistemas de múltiplas camadas. As contribuições destes dois autores permitiram a aplicação da teoria da elasticidade aos projetos de pavimentação, possibilitando o cálculo em estruturas de pavimentos com várias camadas atualmente.

A solução de Burmister leva em conta as seguintes considerações (MEDINA E MOTTA, 2005):

- a) Os materiais são homogêneos, isotrópicos e de comportamento elástico-linear, sendo válida a Lei de Hooke;
- b) O peso próprio das camadas é considerado nulo;
- c) As camadas são ilimitadas na direção horizontal e possuem espessura finita, com exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- d) A carga atuante é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área circular, com contato flexível o que gera deflexões maiores no centro da área carregada em relação às bordas;
- e) Na camada superior, a superfície não está sujeita a tensões fora da área carregada, ao passo que nesta área ocorrem apenas as tensões normais;
- f) As tensões e deformações são nulas a grandes profundidades;
- g) As condições de aderência na interface entre as camadas podem variar de aderência completa à nula.

Franco (2007) traz que os métodos que se utilizam da solução de Burmister possuem como vantagem a possibilidade de combinação de carregamentos com mais de uma roda, utilizando-se do princípio da superposição de efeitos e da hipótese de elasticidade linear, além da obtenção de resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura.

Segundo o modelo de Burmister, a deflexão na superfície, sob o ponto de aplicação da carga, pode ser calculada pela seguinte equação (HUANG, 1993):

$$D_0 = 1,5 \cdot \frac{p \cdot r}{E_2} \cdot F_d \quad (3)$$

Em que:

$D_0$  = deflexão na superfície, em mm;

$P$  = pressão, em MPa;

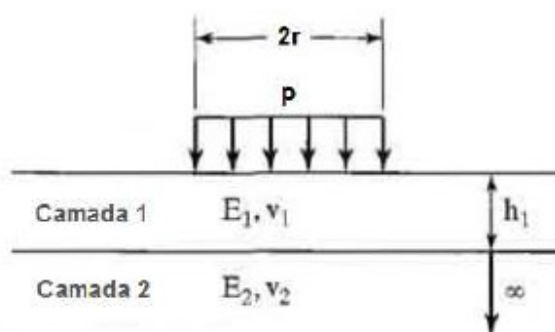
$r$  = raio da área circular de aplicação da carga, em MPa;

$E_2$  = módulo de resiliência da camada inferior, em MPa;

$F_d$  = fator de deflexão.

Sendo que o fator de deflexão ( $F_d$ ) trata-se de um parâmetro adimensional e é determinado a partir da razão entre os módulos de resiliência das camadas superior e inferior e da razão entre as espessuras destas camadas e raio de aplicação de carga. A Figura 2.5 a seguir representa esquematicamente o modelo de Burmister para duas camadas:

**Figura 2.5 - Modelo inicial de Burmister**



Fonte: Huang (1993)

A partir da continuidade do estudo e aplicação destes modelos e com base na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, Vellasco (2018) traz que nas últimas décadas vários softwares foram desenvolvidos, permitindo a análise para sistemas de múltiplas camadas através do emprego de diferentes métodos numéricos, como o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Camadas Finitas (MCF).

### 2.2.1 Módulo de Resiliência

O conceito de Módulo de Resiliência (MR) foi introduzido em 1955 por Francis Hveem, objetivando uma melhor representação do módulo de elasticidade para materiais submetidos a carregamentos cíclicos. Segundo Brito (2006), a diferenciação entre as terminologias ocorreu em função das discrepâncias entre a ordem de grandeza de deslocamentos dos materiais elásticos comumente utilizados na engenharia em relação aqueles utilizados na pavimentação. Ambos os conceitos possuem a mesma definição pela

teoria da elasticidade e representam a razão entre tensão e deformação, com a diferença que o MR é determinado a partir de um ensaio de cargas repetidas, podendo ser definido de acordo com a equação a seguir:

$$E = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

Onde:

$E$  = módulo de resiliência, em Mpa;

$\sigma_d$  = tensão desvio, caracterizada pela diferença entre a tensão vertical de compressão e a tensão de confinamento (quando existente), em Mpa;

$\varepsilon_r$  = deformação axial elástica, em mm/mm.

O valor do módulo de resiliência pode ser determinado por meio de ensaios de campo ou laboratório, através da interpretação das deformações apresentadas pelo pavimento submetido a carregamentos conhecidos ou ainda por retroanálise. Em laboratório o ensaio mais utilizado para determinação deste parâmetro em solos e materiais granulares é o ensaio triaxial dinâmico.

A literatura aponta diversas formas para realização dos ajustes das curvas no processo de obtenção do MR. Holanda et al (2007) traz que um dos mais antigos modelos para este fim é conhecido como modelo K- $\theta$ , em o valor de MR, no caso de solos arenosos é dado por:

$$MR = K_1 \theta^{k_2} \quad (5)$$

Em que  $\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ . Holanda et al (2007) traz ainda que substituindo a pressão hidrostática ( $\theta$ ) pela tensão desviadora ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2$ ), a equação pode ser utilizada também para solos coesivos, como segue:

$$MR = K_3 \sigma_d^{k_4} \quad (6)$$

Os autores trazem ainda a abordagem utilizada no modelo universal, ou modelo de Uzan-Witczak, que é dado por:

$$MR = K_1 \theta^{k_2} \tau_{oct}^{k_3} \quad (7)$$

Sendo que  $\tau_{oct}$  trata-se da tensão octaédrica.

### 2.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO

De maneira geral, os pavimentos são estruturas que não apresentam ruptura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural que são acumuladas a partir do início de sua utilização, dada pela abertura ao tráfego (BERNUCCI ET AL, 2008). Estes autores trazem ainda que a avaliação funcional está ligada principalmente às condições de rolamento e superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidade, estando intimamente relacionada ao conforto do usuário. Em contrapartida, a avaliação estrutural diz respeito ao projeto do pavimento e seu dimensionamento, estando diretamente associada a capacidade de carga da estrutura.

A determinação assertiva desta condição estrutural é de extrema importância para aplicação dos conceitos mecanísticos-empíricos no projeto de pavimentos novos ou de reforço. Esta avaliação pode ser realizada a partir de métodos destrutivos ou não destrutivos.

Na avaliação destrutiva é realizada a abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo a coleta de amostras dos materiais constituintes das camadas até o subleito, para posterior análise e caracterização em laboratório, além da possibilidade de ensaios de capacidade de carga in situ. Por sua natureza destrutiva, este método tem sua aplicação restrita há apenas alguns pontos nos seguimentos avaliados, sendo este um fator limitante.

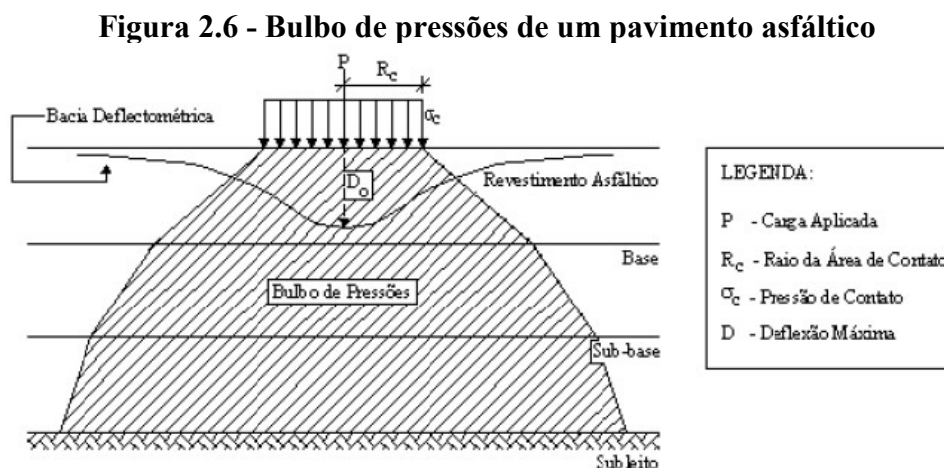
Por outro lado, nas avaliações não destrutivas não há coleta de material, sendo os ensaios realizados in situ através de medidas de deflexão e deformação que permitem avaliar a capacidade de carga da estrutura. Uma grande vantagem deste método é a viabilidade de aplicação em grandes extensões, além da possibilidade de análise da variação da capacidade de carga com o tempo.

A carga proveniente da passagem do veículo pela via gera um deslocamento na estrutura do pavimento, que é composto por duas componentes: uma de deformação elástica, portanto recuperável, resultando da flexão alternada do pavimento e cuja determinação é parâmetro principal para análise estrutural de pavimentos em uso, e uma componente de

deformação permanente, que por sua vez, gera o afundamento das trilhas de roda e também é critério de avaliação da vida útil e funcional da estrutura.

Segundo Nóbrega (2013), o controle defletoométrico das camadas de pavimento tem por objetivo controlar a deformabilidade da estrutura, garantindo que a contribuição de cada camada na deflexão total não exceda o limite admissível. A partir do controle de deflexões é possível avaliar se os valores de módulo de resiliência adotados no dimensionamento da estrutura estão sendo atingidos em campo.

A Figura 2.6 a seguir traz a distribuição das cargas ao longo da estrutura do pavimento, formando um bulbo de tensões:



Fonte: Fabrício *et al.* (1998)

Deste modo, pode-se observar que as deflexões máximas dependem da estrutura do pavimento como um todo, ao passo que as deflexões intermediárias são influenciadas pelas camadas de base e sub-base. Nas áreas mais distantes do ponto de aplicação do carregamento os valores de deflexão são afetados apenas pelo comportamento elástico do subleito (FABRÍCIO *et al.*, 1998).

Em suma, o controle defletoométrico se dá a partir da conversão do valor do módulo de resiliência teórico de cada camada em medida de deflexão máxima referenciada em projeto, onde é possível se estabelecer um parâmetro de comparação com as medidas de deflexão obtidas em campo a fim de garantir que as premissas de projeto foram asseguradas no que tange à capacidade estrutural do elemento.

Para determinação destes parâmetros empregam-se os equipamentos de avaliação não-destrutiva, que segundo Haaset al. (1994) podem ser classificados como: equipamentos

estáticos, que a partir da aplicação de carga estática medem as respostas do pavimento, a exemplo dos ensaios de carga de placa e viga Benkelman; e equipamentos dinâmicos, que sob aplicação de cargas dinâmicas determinam o comportamento da estrutura.

Bernucci et al (2008), divide os equipamentos utilizados em avaliações não-destrutivas (NDT – *nondestructive deflection testing*) em três categorias:

1. Carregamento quase-estático: ensaio de placa e viga Benkelman;
2. Carregamento vibratório: dynaflect;
3. Carregamento por impacto: *falling weight deflectometer* (FWD).

No Brasil, o DNER normatizou os equipamentos citados, sendo que os mais utilizados no país são a Viga Benkelman e o *falling weight deflectometer* (FWD).

### 2.3.1 Viga Benkelman

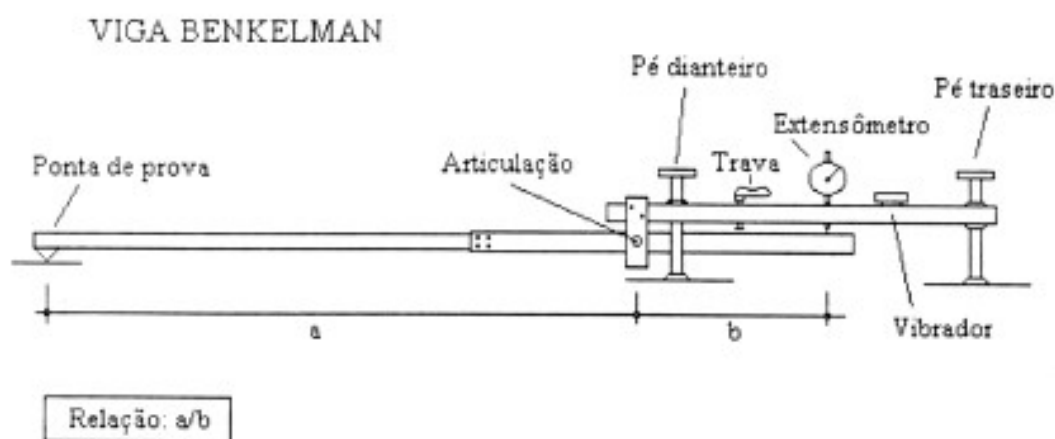
A viga Benkelman é um equipamento mecânico destinado a registrar as deflexões em diferentes pontos do pavimento decorrentes da carga estática gerada pelas rodas duplas de um caminhão carregado. É considerado um ensaio quase-estático, uma vez que o veículo se desloca em baixa velocidade, a fim de não ocasionar esforços inerciais. Foi desenvolvida em 1953, pelo engenheiro norte-americano Alvin Carlton Benkelman, do *U. S. Bureau of Public Roads*, durante testes efetuados na pista experimental da WASHO, no oeste dos EUA (Carneiro, 1966).

Após intensos estudos, o procedimento de ensaio foi aprimorado pelos engenheiros da Canadian Good Roads Association (CGRA), sendo então difundido por todo o mundo. Segundo Borges (2013), no Brasil registram-se trabalhos pioneiros com a utilização da viga Benkelman realizados por Nestor José Aratangy em 1962 e Francisco Bolivar Lobo Carneiro em 1965, sendo que, atualmente, o procedimento é normatizado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, através das normas DNER-ME-24/94 e NBR 8547, respectivamente.

Albernaz (1997) traz que o advento da viga Benkelman se deu em face à necessidade de agilizar o procedimento e mitigar os custos atrelados a avaliação de pavimentos até então realizados por intermédio de provas de carga, com o emprego do moroso ensaio de placa. Desta forma, adotou-se um ensaio mais versátil e rápido, cujo carregamento é feito com os próprios pneus do caminhão carregado, ao invés da placa circular.

Como pode ser observado na Figura 2.7, a viga Benkelman é constituída basicamente por uma haste de sustentação que se apoia fixamente no pavimento através de três pés ajustáveis e uma haste móvel acoplada à parte fixa por meio de uma articulação e que forma dois braços cujos comprimentos “a” e “b” obedecem às relações 2/1, 3/1 ou 4/1. A extremidade do braço maior contém a ponta de prova da viga, que fica em contato com o pavimento, ao passo que a extremidade do braço menor aciona um extensômetro com precisão de centésimos de milímetro. O equipamento possui ainda um pequeno vibrador destinado a evitar inibições do ponteiro do extensômetro, além de uma trava de proteção designada ao transporte adequado (DNER-ME-24/94).

**Figura 2.7 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman**



Fonte: Albernaz (1997)

Dois resultados são obtidos a partir do ensaio com a viga Benkelman: a Deflexão Máxima ( $D_0$ ), medida pontualmente no eixo central entre as rodas duplas, e o Raio de Curvatura ( $R_c$ ).

Durante o ensaio, a ponta de prova localizada na ponta da haste é colocada no centro de carga das rodas do semi-eixo traseiro simples de rodas duplas no local em que se pretende determinar a deflexão. A localização dos pontos possui distância prefixada em relação a borda do revestimento e estão ligados às regiões de formação das trilhas de roda, conforme Figura 2.8 a seguir:

**Figura 2.8 - Localização dos pontos para medida da deflexão**

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

Fonte: (DNER-ME-24/94)

O caminhão utilizado no ensaio tem suas rodas duplas traseiras com pneus calibrados à pressão de 0,56Mpa (5,6 kgf/cm<sup>2</sup> ou 80lb/pol<sup>2</sup>) e carga de 8,2 toneladas no eixo traseiro simples.

Após o posicionamento adequado do caminhão e equipamento, o vibrador é ligado e realiza-se a leitura inicial ( $L_0$ ) no extensômetro (em 1/100 mm). A Figura 2.9 detalha o posicionamento inicial para o ensaio. Em seguida, o caminhão desloca-se lentamente para frente por no mínimo 10 metros, de forma que seu peso deixe de exercer qualquer influência sobre a área de posicionamento da ponta de prova da viga. Neste momento, faz-se a leitura final ( $L_f$ ) e por semelhança de triângulos calcula-se o deslocamento na ponta de prova da viga, multiplicando-se a diferença entre as leituras pela relação de articulação “a/b”.

A deflexão máxima da viga é definida pela equação a seguir:

$$D_0 = (L_0 - L_f).a/b \quad (8)$$

Onde:

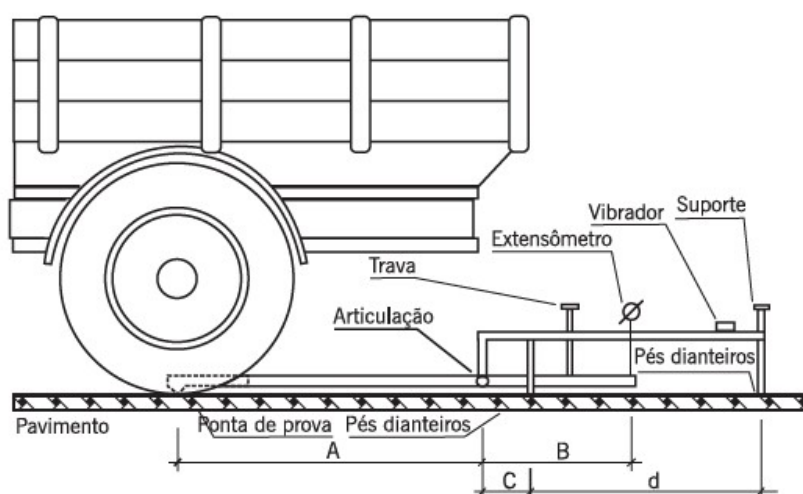
$D_0$  = deflexão máxima recuperável, em 10-2 mm;

$L_0$  = leitura inicial de deflexão, em 10-2 mm;

$L_f$  = leitura final de deflexão, em 10-2 mm;

a/b = relação entre braços, conhecida também como “constante da viga”.

Figura 2.9 - Posicionamento inicial do ensaio de viga Benkelman



Fonte: DNER-ME-24/94.

A partir da realização de leituras a diferentes distâncias do ponto de aplicação da carga pode-se determinar a bacia longitudinal de deformação e sua linha de influência, além do cálculo do raio de curvatura. Para determinação do último se faz necessária a leitura com o caminhão posicionado a 25 cm à frente do ponto de prova ( $L_{25}$ ), sendo o raio de curvatura da bacia de deflexão calculado através da equação 9, como segue:

$$R = 6250/2(D_0 - D_{25}) \quad (9)$$

Onde:

$R$  = Raio de curvatura, em m;

$D_0$  = deflexão máxima recuperável, em  $10^{-2}$  mm;

$D_{25}$  = deflexão a 25 cm do ponto de prova, em  $10^{-2}$  mm.

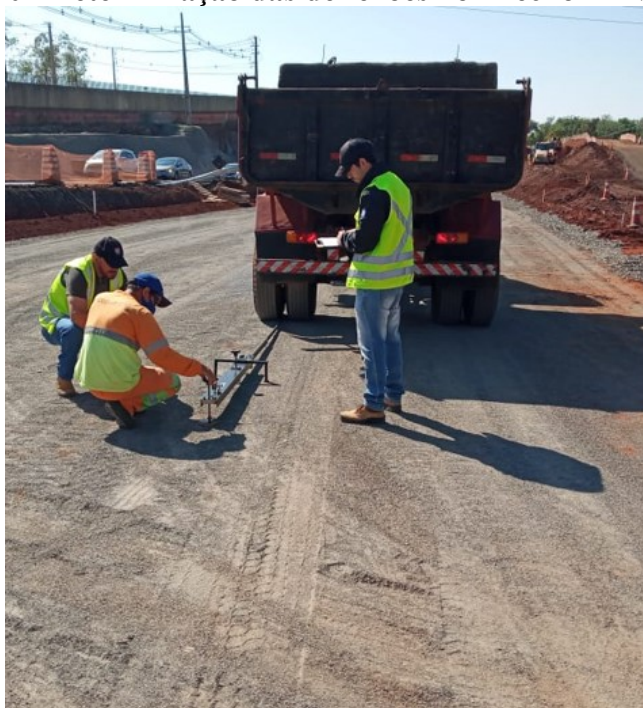
Como pode ser observado, a deflexão máxima recuperável e o raio de curvatura são grandezas inversamente proporcionais. Segundo Borges (2001), baixos valores de deflexão e raios de curvatura elevados indicam pavimentos em boa condição estrutural, revelando a capacidade de assimilar e distribuir esforços para as camadas subjacentes. Um raio de curvatura baixo revela um arqueamento severo da bacia de deformação e por consequência uma condição estrutural crítica (PEREIRA, 2001).

A determinação do raio de curvatura parte de um processo simples pelo fato de não se tornar necessária a determinação de toda linha elástica, mas apenas das deflexões no ponto de aplicação da carga e a 25 cm de distância deste. No entanto, no caso de camadas recém-construídas esta medida intermediária não se faz necessária uma vez que o controle deflectométrico a partir do raio de curvatura não é um parâmetro a ser considerado.

Vale ressaltar que a determinação da bacia de deflexão ganha importância nos projetos de restauração de pavimentos, em que os valores de módulo de resiliência das camadas são estimados a partir da medida das deflexões na superfície.

A Figura 2.10 traz a determinação das deflexões a partir do emprego da viga Benkelman realizadas em campo no Trecho em estudo neste trabalho:

**Figura 2.10 - Determinação das deflexões no Trecho XXVII-A**



Fonte: Autora (2022)

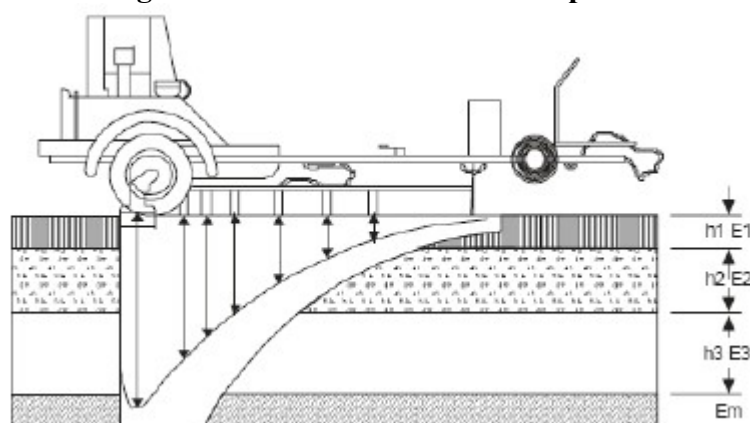
No que tange às vantagens deste tipo de ensaio, podem-se citar o baixo custo envolvido e a facilidade de operação que propicia o emprego de mão de obra pouco qualificada, tornando-se uma solução acessível para a realização do controle deflectométrico durante a execução de pavimentos novos. Em contrapartida, Borges (2001) elenca alguns fatores associados às desvantagens do procedimento, sejam eles: a morosidade do processo; impossibilidade de inferir a sensibilidade do veículo em movimento por se tratar de medida a

partir da aplicação de carga estática; impossibilidade de assegurar que as bases de apoio do equipamento se encontram fora da área de influência para obtenção da deformada e por fim, a elevada dispersão das leituras.

### 2.3.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Os deflectômetros de impacto tipo FWD são os equipamentos mais atuais de medida dos deslocamentos elásticos de um pavimento. Esses equipamentos transmitem o esforço ao pavimento através de um conjunto de pesos, que caem sobre uma placa de carga. Foi introduzido no Brasil em 1989 e tem tido grande aceitação nas avaliações estruturais de pavimento asfáltico e de concreto, em pistas de aeroportos e rodovias. A Figura 2.11 traz um esquema representativo do deflectômetro de impacto:

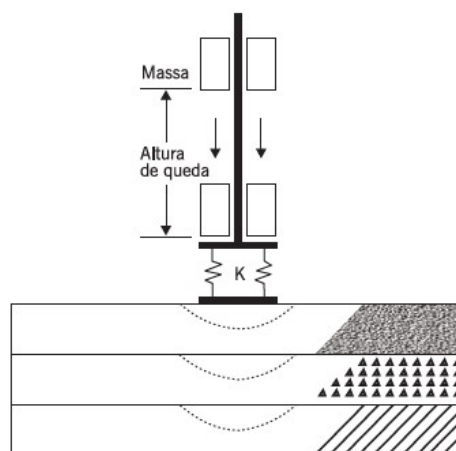
**Figura 2.11 - Deflectômetro de impacto**



Fonte: DNIT (2016)

O Falling Weight Deflectometer (FWD) avalia o comportamento do pavimento sob aplicação de carregamento dinâmico, simulando o efeito da passagem de uma carga de roda em movimento na estrutura. Um conjunto de massas locadas em alturas pré-fixadas caem sobre um sistema de amortecedores de borracha em queda livre, que por sua vez transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada na superfície do pavimento ((DNER-PRO 273/96), como pode ser observado na Figura 2.12.

**Figura 2.12 - Princípio de funcionamento do FWD**



Fonte: Bernucci et al (2008)

O equipamento é totalmente automatizado e através de sensores instalados ao longo de uma barra metálica em posições convenientemente escolhidas determinam-se os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento, formando a bacia de deflexão. O aparelho é rebocado por um veículo utilitário leve que carrega parte do sistema de aquisição de dados feito por computador, conectado aos sensores instalados na parte rebocada. Na Figura 2.13 e Figura 2.14 observa-se o FWD em operação, bem como o detalhamento dos sensores e placa, respectivamente.

**Figura 2.13 - FWD da marca Dynatest em operação**



Fonte: Dynatest (2021)

**Figura 2.14 - Detalhe dos sensores e placa**



Fonte: Dynatest (2021)

A força de pico imposta ao pavimento pelo FWD pode ser determinada igualando-se a energia potencial da massa, antes da queda livre, ao trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha, depois da queda, de acordo com a equação (Cardoso, 1999):

$$F = (2.m.g.h.k)^{1/2} \quad (10)$$

Em que:

F = força de pico;

m = massa que cai;

g = aceleração da gravidade;

h = altura de queda;

k = constante da mola do sistema de amortecedores.

A força de pico é a carga teórica aplicada ao pavimento, ao passo que o valor da carga real é registrado automaticamente e com precisão pela célula de carga, e depende não somente da massa e altura queda, mas também da rigidez e temperatura do pavimento, sendo que quanto mais rígido o pavimento, maior a carga real (Borges, 2001).

A carga é transmitida ao pavimento através de uma placa de 300mm de diâmetro, onde está instalada a célula de carga que mede o valor da solicitação. A duração do carregamento é de 25 a 30 ms e representa a passagem de um veículo com velocidade entre 60 e 80 km/h.

Os equipamentos FWD podem se diferenciar pelo tipo de transdutor ou sensor utilizado para determinação das deflexões, a citar: geofones, LVDTs, acelerômetros e sismômetros. No caso do FWD da marca Dynatest as deflexões são medidas através de 7

sensores do tipo geofones dispostos um no centro da placa e os demais em distâncias pré-estabelecidas. O FWD possui ainda um termômetro vinculado ao sistema computacional, que permite a medição da temperatura na superfície do pavimento e do ar ambiente, além de um hodômetro, a partir do qual se faz possível a definição dos locais de estudo.

Alguns pontos positivos são elencados por Medina et al (1994) em relação a utilização do FWD na determinação dos deslocamentos recuperáveis, dentre eles a acurácia e repetibilidade na medida das deflexões e das cargas; a maior proximidade dos resultados obtidos em relação as deflexões reais causadas por um caminhão carregado em movimento; a possibilidade da determinação dos módulos de elasticidade das camadas através do acoplamento de softwares de retroanálise, além da redução da mão de obra empregada. Em contrapartida, esses autores trazem alguns aspectos limitantes em relação ao uso deste equipamento, como a necessidade de equipe especializada; a dificuldade na obtenção dos módulos por retroanálise em estruturas que apresentam camadas rígidas que influenciam na bacia de deformação; e no caso de solos saturadas ou presença de nível d'água em que os resultados são mascarados indicando a existência de material rígido.

### 2.4 ESTUDOS NUMÉRICOS

A seguir apresentam-se alguns estudos numéricos realizados com base no Método dos Elementos Finitos e aplicados à análise estrutural de pavimentos flexíveis.

#### 2.4.1 Efeito de Aderência entre camadas

Santos et al (2019) investigou os efeitos da condição de interface entre as camadas no comportamento mecânico do pavimento, utilizando-se do software ABAQUS. Em seu trabalho fez-se possível a avaliação de três cenários: aderência completa, parcial e nula, a fim de analisar o desempenho de pavimentos flexíveis, tanto a fadiga das camadas asfálticas quanto à deformação permanente.

Através de uma modelagem tridimensional em elementos finitos, os autores realizaram uma análise linear em que se admitiu estruturas constituídas por materiais homogêneos e isotrópicos. Para simulação da condição de aderência total entre as camadas Santos et al (2019) utilizou-se da opção “*tie constraint*”, em que cada nó da superfície *slave* é restrito ao

mesmo movimento que o nó mais próximo da superfície *master*, o que significa uma restrição dos graus de liberdade de rotação e translação e torna o par de camadas subsequentes uma estrutura monolítica.

Para o caso de aderência parcial e nula utilizou-se o modelo de Coulomb. Para condição parcial de aderência os autores definiram o valor de coeficiente de atrito igual a 0,5, enquanto para representar o caso de aderência nula reduziu-se o valor do parâmetro a zero.

Os autores trazem ainda a caracterização da estrutura do pavimento analisado, constituído basicamente por duas camadas asfálticas assentes sobre base e sub-base composta de material granular e subleito de solo arenoso. A Figura 2.15 traz as propriedades destas camadas:

**Figura 2.15 - Propriedades geométricas e de materiais da estrutura do pavimento**

| Camada | Material           | Espessura (cm) | MR (MPa)        | $\nu$ |
|--------|--------------------|----------------|-----------------|-------|
| 1      | Concreto asfáltico | 7,5            | 3000/7000/11000 | 0,3   |
| 2      | Concreto asfáltico | 7,5            | 3000/7000/11000 | 0,3   |
| 3      | BGS                | 15             | 300             | 0,4   |
| 4      | M. Seco            | 20             | 200             | 0,4   |
| 5      | Solo arenoso       | $\infty$       | 100             | 0,45  |

Fomte: Santos et al (2019)

Foram analisados nove casos em que as condições de aderência foram combinadas de acordo com a Figura 2.16:

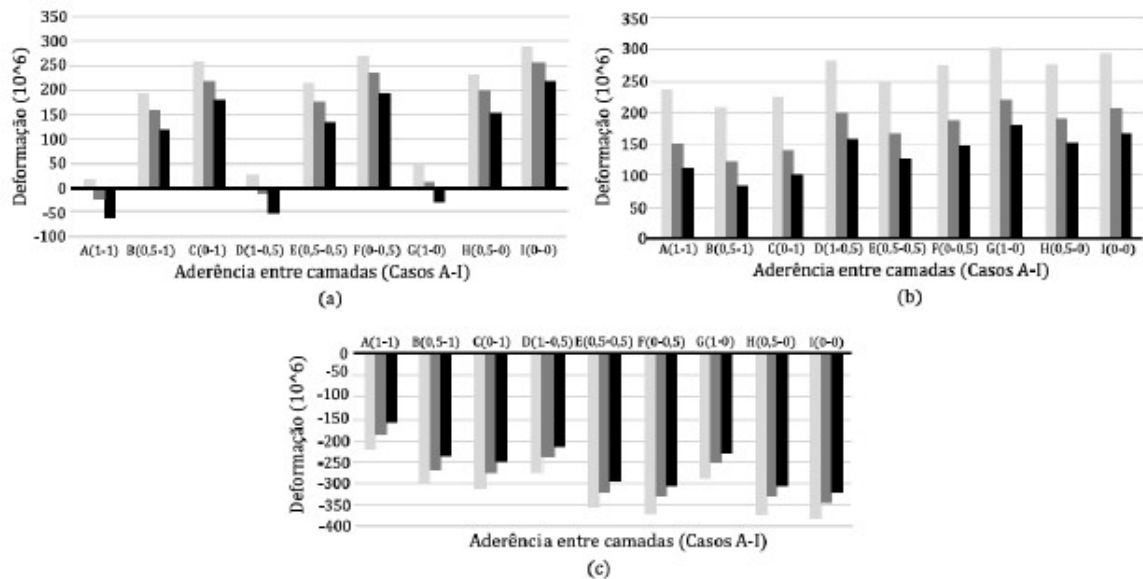
**Figura 2.16 - Condições de aderência na interface**

| Casos | Revestimento | CA inferior |
|-------|--------------|-------------|
|       | CA inferior  | Base        |
| A     | 1            | 1           |
| B     | 0,5          | 1           |
| C     | 0            | 1           |
| D     | 1            | 0,5         |
| E     | 0,5          | 0,5         |
| F     | 0            | 0,5         |
| G     | 1            | 0           |
| H     | 0,5          | 0           |
| I     | 0            | 0           |

Fonte: Santos et al (2019)

Os resultados foram apresentados em formato gráfico e compilam os nove casos analisados, sendo que para cada caso houve a variação do módulo de resiliência das camadas asfálticas. A Figura 2.17 a seguir mostra os resultados obtidos:

**Figura 2.17 – Deformações máximas: (a) camada de revestimento, (b) camada asfáltica inferior e (c) subleito**



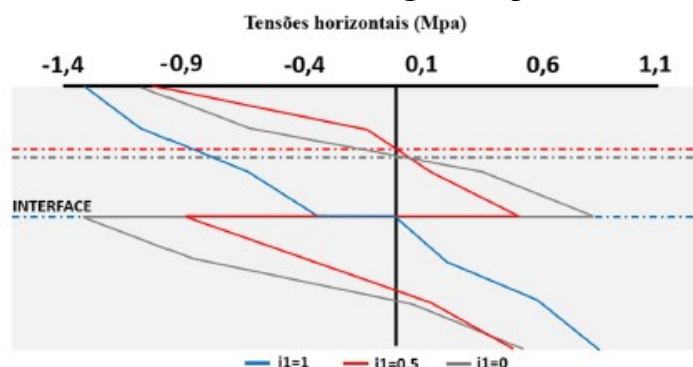
Fonte: Santos et al (2019)

Com base nestes dados, Santos et al (2019) observaram que as deformações máximas resultantes na camada do revestimento foram mais sensíveis à condição de interface entre as camadas asfálticas que entre a camada asfáltica e a base do pavimento. O mesmo ocorreu para a deformação vertical de compressão no topo do subleito, onde observou-se ainda que o caso de aderência nula nas duas interfaces resultou em deformação vertical de compressão duas vezes maior que o valor encontrado para o caso de aderência total entre as duas camadas. Em suma, o melhor desempenho ocorreu no caso de aderência completa entre as camadas, onde tanto a camada de revestimento como a de subleito apresentaram os menores valores de deformação.

Além disso, os autores concluíram que o efeito de condição de interface não altera somente a magnitude dos valores de deformações horizontais máximas, mas também influencia sua localização ao longo da estrutura, o que significa que a condição crítica a ser evitada pode ser alcançada em camadas diferentes. Na Figura 2.18 é possível observar que a perda de aderência levou a tensão horizontal a voltar ao estado de compressão no topo da camada

inferior, que antes tendia ao estado de tração ao longo da espessura, resultando desta forma em menores tensões máximas na fibra inferior dessa camada:

**Figura 2.18 - Distribuição de tensões ao longo da espessura das camadas asfálticas**



Fonte: Santos et al (2019)

Por meio de modelos de previsão de desempenho, os autores demonstram também que a condição de interface entre as camadas afeta mais a vida do pavimento à fadiga do que a deformação permanente e que o surgimento prematuro de defeitos pode estar ligado, entre outros fatores, à fraca aderência entre as camadas.

#### 2.4.2 Efeito da presença de trincas e fissuras

Uddin et al (1994) realizou um estudo paramétrico a partir de uma modelagem tridimensional em elementos finitos através do software ABAQUS a fim de avaliar o efeito da presença de descontinuidades no pavimento, bem como analisar as deflexões geradas na superfície da estrutura quando submetida às cargas dinâmicas geradas pelo carregamento imposto pelo FWD (Falling Weight Deflectometer).

Para a análise estática, os autores consideraram um carregamento de 40 kN aplicado sobre uma área de 705,5 cm<sup>2</sup>, simulando as cargas impostas pelo FWD. O módulo de elasticidade de cada camada foi definido utilizando o programa FPEDDI por meio de retroanálise a partir dos dados de deflexão medidos. Inicialmente, as deflexões foram calculadas utilizando-se dois softwares distintos, onde obteve-se uma diferença de 1% entre os programas, o que significa que geometria, malha e condições de contorno no modelo em elementos finitos concebido no ABAQUS são válidos e aplicáveis ao caso em estudo. A Figura 2.19 traz as características geométricas e dos materiais utilizados nas análises:

**Figura 2.19 - Propriedades dos materiais utilizados na análise em elementos finitos**

| Layer            | Thickness |          | Poisson's<br>Ratio | Young's Modulus |           |
|------------------|-----------|----------|--------------------|-----------------|-----------|
|                  | mm        | (inches) |                    | kPa             | (psi)     |
| AC Surface       | 114       | (4.5)    | 0.35               | 2,928,250       | (425,000) |
| Granular<br>Base | 152       | (6.0)    | 0.45               | 199,810         | (29,000)  |
| Subgrade         | 12,192    | (480.0)  | 0.45               | 34,450          | (5,000)   |

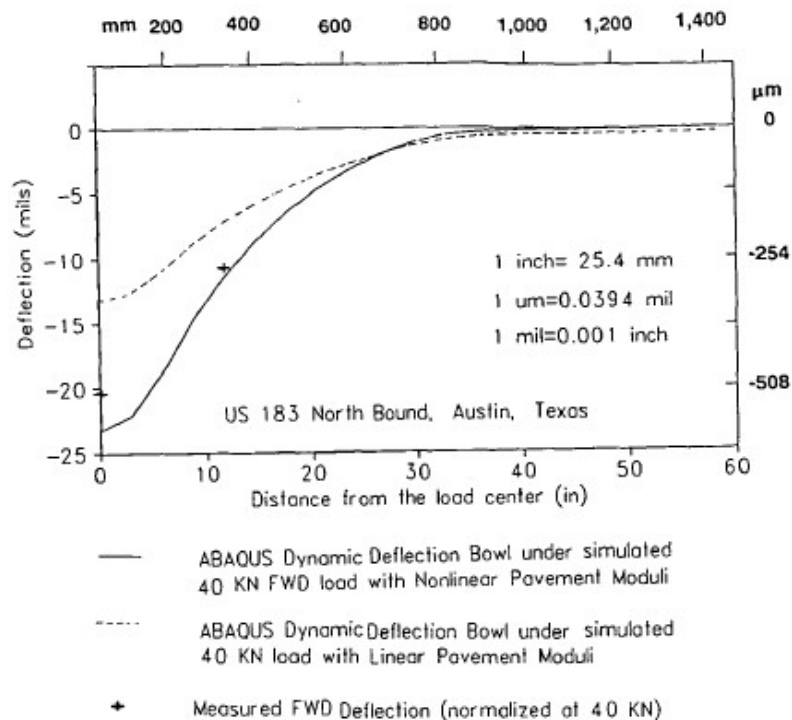
Fonte: Uddin et al (1994).

A princípio, a análise dinâmica foi realizada pelos autores utilizando-se de duas abordagens: o ABAQUS IMPLICIT e EXPLICIT. A comparação entre os resultados obtidos indicou que as deflexões obtidas através do IMPLICIT estão mais próximas às deflexões estáticas e apresentam valores maiores que os obtidos com o EXPLICIT, além de apresentar melhor convergência que o último. Por estes motivos, os autores utilizaram-se do método IMPLICIT para realização das análises dinâmicas, onde a deflexão máxima obtida foi 18% menor do que nas análises estáticas correspondentes realizadas no ABAQUS.

Um estudo preliminar foi realizado pelos autores a fim de comparar a deflexão medida com o FWD e a deflexão obtida no ABAQUS, considerando o comportamento não linear dos materiais constituintes da base granular e subleito. Para isso foram traçadas as bacias de deflexão (Figura 2.20) obtidas no software através da consideração de dois cenários: consideração dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise a partir dos dados de deflexão medidos pelo FWD simulando uma análise linear e utilização dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise a partir de dados medidos com Dynaflect em estudo anterior, simulando a condição não linear.

Os autores observam que as deflexões medidas se aproximam mais das deflexões calculadas quando da utilização dos módulos não lineares, atestando que o comportamento não linear das camadas granulares e do subleito também pode contribuir significativamente para a análise da resposta estrutural do pavimento.

**Figura 2.20 - Comparação entre as bacias de deflexão dinâmicas e a deflexão medida com FWD**

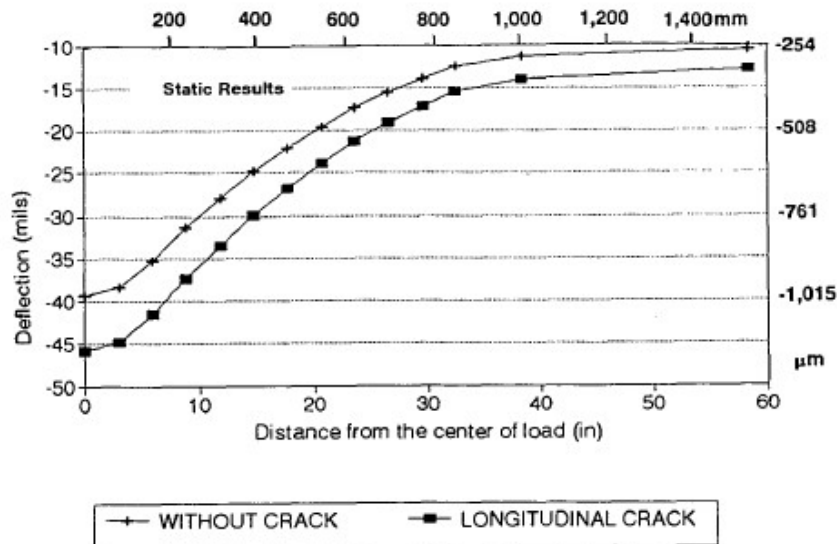


Fonte: Uddin et al (1994)

No estudo do efeito das discontinuidades no pavimento, os autores avaliaram principalmente a presença de trincas longitudinais e transversais. No ABAQUS, as trincas foram simuladas a partir de dois nós independentes presentes entre elementos contínuos e ligados por elementos de lacunas unidirecionais de aplicação especial designados como GAPUNI.

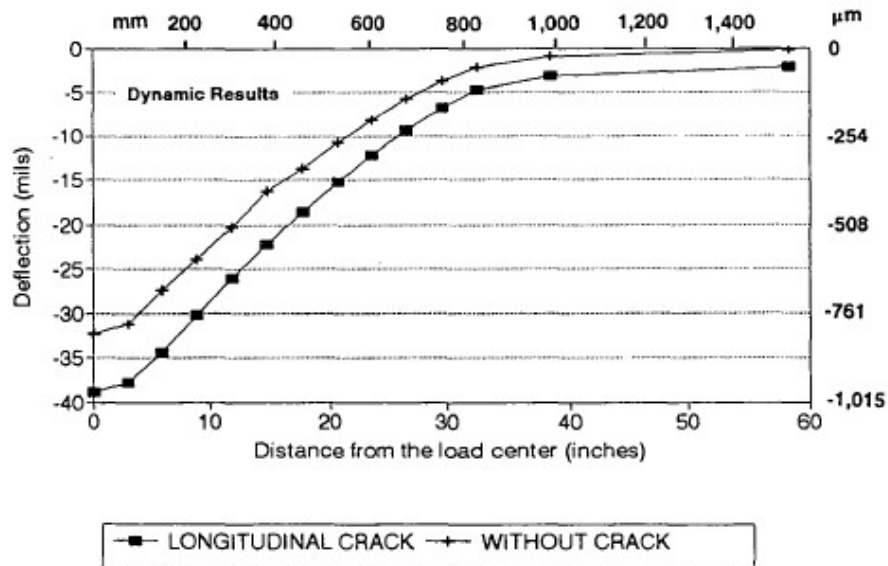
No primeiro caso, os autores avaliaram a bacia de deflexão em um pavimento com e sem trincas longitudinais, submetido à aplicação de carregamento estático e dinâmico, e os resultados estão apresentados na Figura 2.21 e Figura 2.22 a seguir:

**Figura 2.21 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas longitudinais submetido a carga estática**



Fonte: Uddin et al (1994)

**Figura 2.22 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas longitudinais submetido a carga dinâmica**



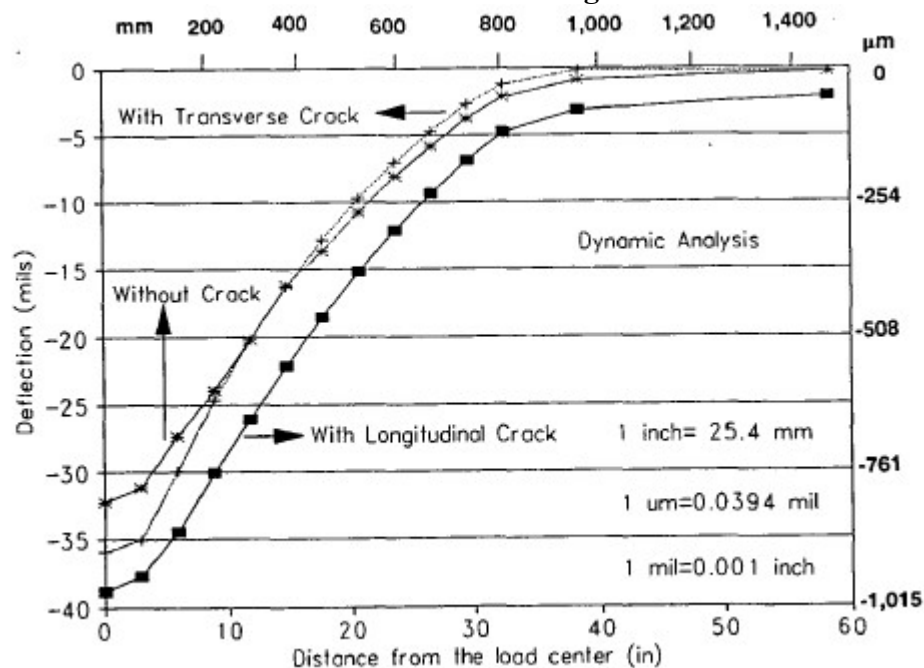
Fonte: Uddin et al (1994)

Os autores observaram que a máxima deflexão estática no pavimento com a presença de trincas é 14% maior em relação ao pavimento sem presença de trincas, quando este é submetido ao carregamento estático. Para o caso de carregamento dinâmico, esta diferença é ainda mais significativa: o pavimento com trincas apresenta valores de deflexão até 17%

maiores em relação ao pavimento sem a patologia. Vale notar ainda que esta diferença se torna menor quanto maior a distância em relação ao ponto de aplicação da carga.

Uddin et al (1994) apresentou em um segundo caso a avaliação da presença de trincas transversais em pavimento submetido a carregamento dinâmica. A partir das análises, os autores depreenderam que a deflexão máxima foi 10% maior em relação ao pavimento sem trincas (Figura 2.23). Além disso, a partir da análise das deflexões em pontos com diferentes distâncias em relação ao local das fissuras os autores concluíram que para distâncias maiores que um metro no ponto de aplicação da carga, a presença de fissuras não tem efeito significativo na determinação das deflexões:

**Figura 2.23 - Bacias de Deflexão na superfície de pavimento com e sem trincas transversais submetido a carga dinâmica**



Fonte: Uddin et al (1994)

### 2.4.3 Efeito da variação do módulo de resiliência na análise de tensões e deformações

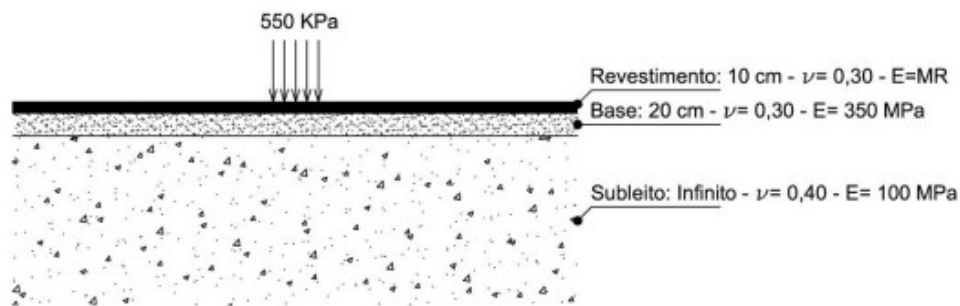
Ponte et al (2014) realizou um estudo visando a determinação do módulo de resiliência de três diferentes misturas de Concreto asfáltico (CA) a ser obtido em laboratório a partir de três metodologias distintas: DNER ME 133 (1994), ABNT NBR 16018 (2011) e resultados obtidos diretamente no software do equipamento pneumático da empresa SIGEO (SICAEP, 2014). A Figura 2.24 a seguir traz as principais distinções entre as metodologias utilizadas:

**Figura 2.24 - Principais recomendações das metodologias selecionadas**

| Procedimento/<br>Parâmetro              | ABNT NBR 16018<br>(2011)                    | DNER ME 133<br>(1994)                                                                                     | SIGEO<br>(SICAEP, 2004)                                                        |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de carregamento                    | Hidráulico/ Pneumático                      | Pneumático                                                                                                | Pneumático                                                                     |
| Frequência (Hz)                         | 1                                           | 1                                                                                                         | 1                                                                              |
| Ciclos de pré-condicionamento           | 50                                          | - 200 ciclos ou até a obtenção de registro mensurável no oscilógrafo<br>- Carregamento máximo → 30% da RT | - Incrementos de carga até a obtenção de um registro mensurável no oscilógrafo |
| Ciclos de condicionamento               | 15                                          | 500                                                                                                       | 60                                                                             |
| Ciclos para o cálculo do MR             | 15 (divididos em 3 grupos de 5 ciclos cada) | 3 (para os ciclos de nº: 300, 400 e 500)                                                                  | 15 (divididos em 3 grupos de 5 ciclos cada)                                    |
| Temperatura (°C)                        | 25                                          | 30                                                                                                        | 25                                                                             |
| Período de estabilização da temperatura | 4 h (mínimo)                                | Não especifica                                                                                            | Não especifica                                                                 |
| Coef. de Poisson                        | Determinado / Assumido ( $\nu = 0,30$ )     | Assumido ( $\nu = 0,30$ )                                                                                 | Assumido ( $\nu = 0,30$ )                                                      |
| Cálculo do MR Total                     | Sim                                         | Não                                                                                                       | Não                                                                            |
| Cálculo do MR Instantâneo               | Sim                                         | Sim                                                                                                       | Sim                                                                            |

Fonte: Ponte et al (2014)

A fim de avaliar a influência que a variação do valor do Módulo de resiliência de misturas asfálticas exerce sobre o comportamento mecânico do pavimento como um todo os autores realizaram também uma análise de tensões e deformações das camadas utilizando-se no software CAP3D, programa para análise de pavimentos asfálticos através do Método dos Elementos Finitos. Em seus estudos, adotou-se um pavimento padrão construído de revestimento e base, assentes sobre o subleito e cujas características geométricas e de materiais encontram-se no esquema apresentado na Figura 2.25:

**Figura 2.25 - Pavimento Padrão**

Fonte: Ponte et al (2014)

As análises foram realizadas para as três misturas asfálticas e considerando as três metodologias em estudo, mantendo-se constante as espessuras das camadas e variando as características das camadas de revestimento com os dados obtidos no estudo experimental.

Diante dos estudos realizados, os autores obtiveram os seguintes valores de Módulo de Resiliência para as três misturas asfálticas avaliadas (Figura 2.26):

**Figura 2.26 - Resumo dos resultados de MR (MPa) obtidos nas diferentes metodologias**

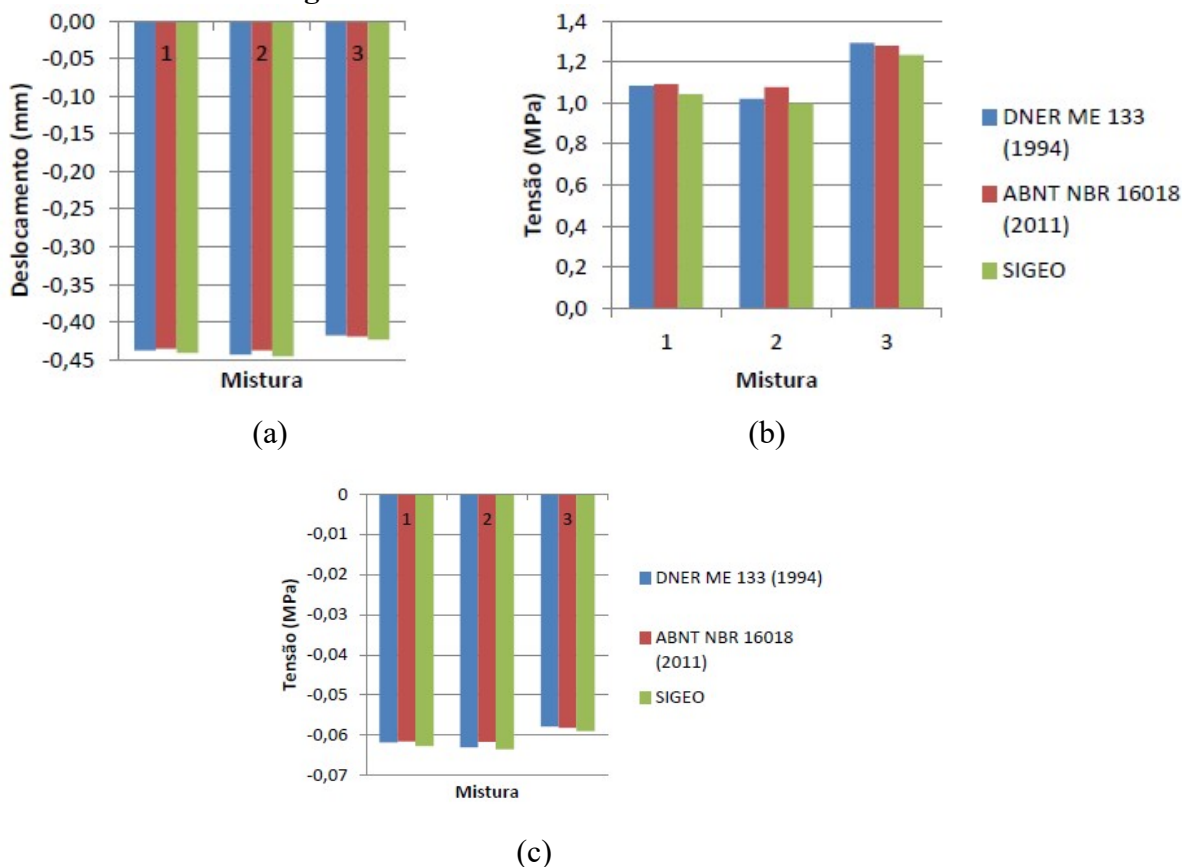
| Mistura/Norma | SIGEO<br>(SICAEP, 2004) | ABNT NBR 16018<br>(2011) | DNER ME 133<br>(1994) | Média | Desv. Pa-<br>drão | CV (%) |
|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------------------|--------|
| Mistura 1     | 4105                    | 4148                     | 3901                  | 4052  | 174               | 4      |
| Mistura 2     | 3804                    | 4073                     | 3691                  | 3856  | 270               | 7      |
| Mistura 3     | 5255                    | 5171                     | 4912                  | 5112  | 183               | 4      |

Fonte: Ponte et al (2014)

De posse destes resultados, os autores puderam concluir que os resultados de MR foram semelhantes para as três metodologias empregadas, apresentando CV mínimo de 4% e máximo de 7%. Observaram ainda que os resultados obtidos através do uso da norma ABNT NBR 16018 (2011) apresentaram menor amplitude nos valores encontrados, indicando maior constância de resultados, além de maior especificidade no texto, de forma que os autores recomendam a utilização desta normativa para realização de ensaios de MR para misturas asfálticas no Brasil.

Na análise do comportamento mecânico, Ponte et al (2014) avaliaram as tensões e deslocamentos em pontos críticos da estrutura, sejam eles: deslocamento vertical na superfície do revestimento (a), tensão de tração na fibra inferior do revestimento (b) e tensão de compressão no topo do subleito (c). Os resultados podem ser verificados na Figura 2.27 a seguir:

Figura 2.27 - Resumo das análises



Fonte: Ponte et al (2014)

Diante dos resultados, os autores concluíram que o critério com maior sensibilidade à variação dos valores de MR foi o de tensão na fibra inferior do revestimento, apresentado na Figura 2.27(c). Ainda assim, os valores de CV's obtidos foram de 2,5%, 3,9% e 2,4% para as misturas 1, 2 e 3 respectivamente, podendo-se considerar que também não houve variação significativa e portanto não houve influência expressiva da metodologia utilizada para a obtenção do MR no resultado da análise de tensões e deformações deste pavimento.

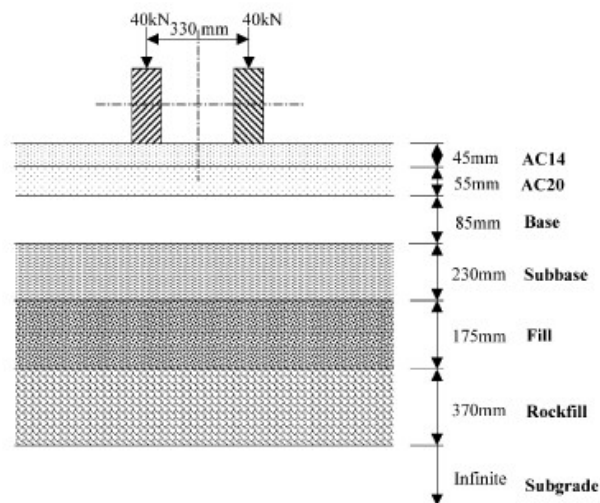
#### 2.4.4 Análise não linear em elementos finitos

Hadi e Bodhinayake (2003), avaliaram o comportamento mecânico de um pavimento flexível quando submetido a solicitações estáticas e dinâmicas. Para isso utilizaram-se de modelagem em elementos finitos através do emprego do software ABAQUS, considerando as propriedades lineares e não lineares dos materiais das camadas constituintes do pavimento.

Para realização do estudo, os autores definiram uma seção de pavimento onde o ensaio de ALF (Accelerated Loading Facility) foi instalado em Callington, Sul da Austrália, de forma a se considerar a aplicação de carregamento cíclico na estrutura. Neste local, a camada de revestimento asfáltico com presença de fissuras foi removida, assim como a camada de base granular, sendo substituídas por duas novas camadas de material asfáltico, de modo que o comportamento das novas camadas possa ser considerado linear e as camadas granulares existentes possam ser admitidas com comportamento não linear.

A Figura 2.28 e Figura 2.29 a seguir trazem a seção tipo do pavimento analisado, bem como as propriedades dos materiais consideradas. A estrutura foi submetida a um carregamento cíclico de 80kN, aplicado por um conjunto de rodas duplas, a fim de simular o carregamento do ALF. O intervalo de aplicação do carregamento foi de 5s a fim de simular a velocidade de 20km/h do equipamento.

**Figura 2.28 - Configuração do Pavimento**



Fonte: Hadi e Bodhinayake (2003).

**Figura 2.29 - Espessura das camadas e propriedades dos materiais**

| Layer          | Thickness (mm) | Modulus of elasticity (kPa) | Poisson's ratio |
|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------|
| Asphalt (AC14) | 45             | 1,800,000                   | 0.3             |
| Asphalt (AC20) | 55             | 1,725,000                   | 0.3             |
| Base           | 85             | 138,000                     | 0.35            |
| Sub-base       | 230            | 96,600                      | 0.35            |
| Fill           | 175            | 72,450                      | 0.35            |
| Rock fill      | 370            | 62,100                      | 0.35            |
| Subgrade       | Infinite       | 55,200                      | 0.35            |

Fonte: Hadi e Bodhinayake (2003).

Para consideração das propriedades não lineares dos materiais granulares os autores basearam-se nos resultados de publicações dos relatórios de pesquisa da “Stabilisation of Pavement Soils” do Sul da Austrália. Desta forma, os valores adotados para estimativa do módulo de resiliência estão dispostos na Figura 2.30:

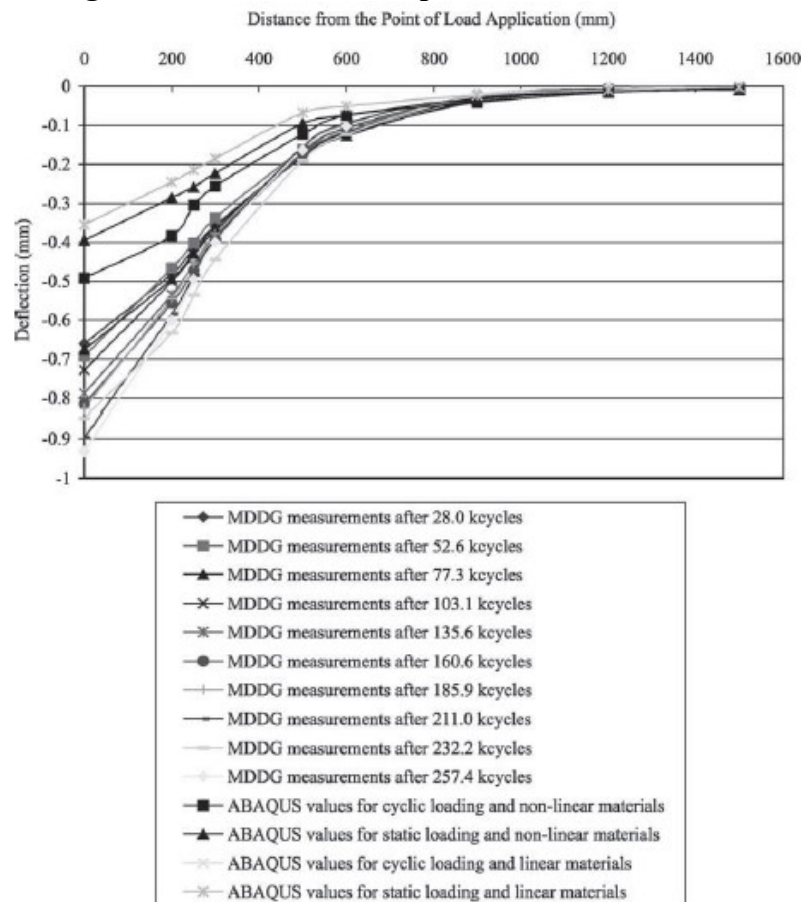
**Figura 2.30 - Valores de K utilizados no modelo não linear ( $M = k_1 \theta^{k_2}$ )**

| Layer    | $k_1$ | $k_2$ |
|----------|-------|-------|
| Base     | 6000  | 0.62  |
| Sub-base | 5800  | 0.56  |
| Fill     | 5000  | 0.53  |
| Rockfill | 4600  | 0.52  |
| Subgrade | 4500  | 0.5   |

Fonte: Hadi e Bodhinayake (2003).

Os deslocamentos verticais foram calculados em nós selecionados e comparados aos valores de deflexão medidas pelo MDDG (Multi-Depth Deflection Gauge) no local de instalação do ALF. Foram consideradas pelos autores as deflexões medidas à profundidade de 600mm, uma vez que se encontram mais próximas ao topo do subleito.

Figura 2.31 - Deflexões na profundidade de 600mm



Fonte: Hadi e Bodhinayake (2003).

Em seus resultados, os autores mostram que os valores de deflexão obtidos na estrutura do pavimento submetido às solicitações de carregamento estático e dinâmico são semelhantes quando da consideração de comportamento elástico linear para todas as camadas, o que pode ser notado na Figura 2.31.

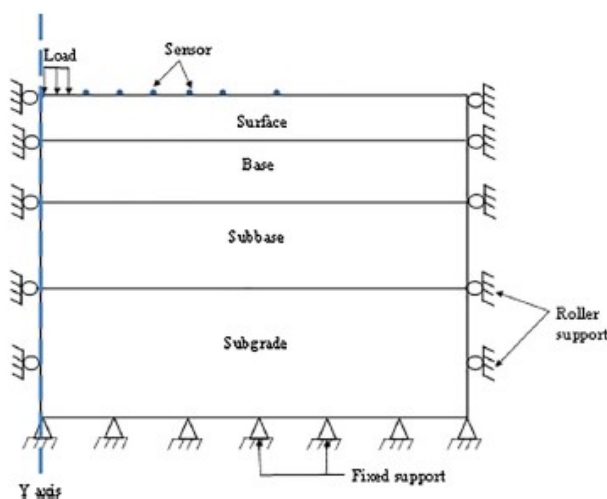
Observam ainda que as deflexões aumentam quando as condições de não-linearidade são inseridas ao modelo. O caso em que mais se aproxima às medições realizadas em campo é aquele em que são consideradas as condições de não linearidade sob aplicação de carregamento cíclico. Outro fator relevante diz respeito ao aumento do número de ciclos de aplicação de carga: as deflexões aumentam à medida que o número de ciclos aumenta, no entanto, a partir de 200mm do ponto de aplicação do carregamento, nenhum aumento significativo é verificado.

### 2.4.5 Medidas de FWD aplicados à modelagem estática e dinâmica

Hamim et al (2018) realizou a elaboração de modelo numérico com base no método dos elementos finitos para simular estruturas de pavimentos flexíveis utilizando-se de análise estática e dinâmica com o emprego do software ANSYS. No primeiro estágio, os autores desenvolveram os modelos em elementos finitos a partir de métodos de análise estática e dinâmica a fim de determinar qual dos métodos é mais adequado para representar a estrutura do pavimento quando submetido ao teste FWD. Na segunda etapa foi realizada uma comparação aumentando o tamanho da geometria do modelo e dimensões dos elementos visando verificar os efeitos desses fatores sobre a precisão do modelo desenvolvido em elementos finitos.

A Figura 2.32 traz a representação esquemática do modelo desenvolvido, em que foram atribuídos os parâmetros de geometria, propriedades dos materiais, malha, condições de contorno e carregamento:

**Figura 2.32 - Modelo axissimétrico de pavimento flexível**

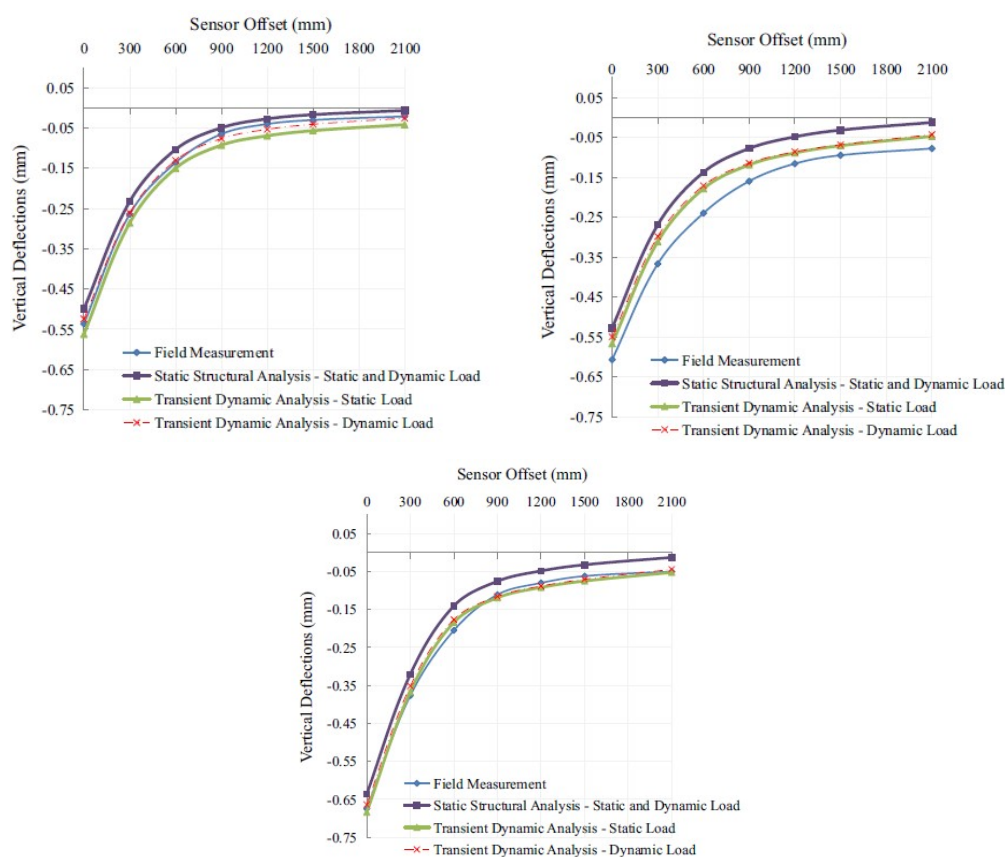


Hamim et al (2018).

Para cada camada, os autores consideraram os materiais como homogêneos, isotrópicos e elástico lineares, atribuindo desta forma os parâmetros de Coeficiente de Poisson e Módulo de elasticidade. Este último é dependente dos resultados de retroanálise a partir dos valores obtidos pelo ensaio de FWD. A camada de concreto asfáltico foi modelada como material viscoelástico, a partir do modelo generalizado de Maxwell.

A partir da avaliação dos resultados, os autores mostram que as deflexões são máximas no ponto 0 mm e diminuem com o aumento da distância ao ponto de aplicação da carga. Além disso, o valor da deflexão obtida através da análise estrutural estática foi similar para as condições de carregamento estático e dinâmico. As bacias de deflexão geradas a partir da análise dinâmica transiente também foram bastante similares para ambas condições de carregamento e se aproximaram das bacias de deflexão medidas em campo. Diante dos dados, Hamim et al (2018) evidencia que análise dinâmica transiente é capaz de produzir um modelo mais satisfatório em elementos finitos para estrutura de pavimento flexíveis em comparação ao método de análise estrutural estático. Os resultados apresentam-se na Figura 2.33:

**Figura 2.33 - Bacias de deflexão para o método estático e dinâmico**



Hamim et al (2018).

No segundo estágio da pesquisa, os autores aumentaram o tamanho da geometria do modelo de 5000mm x 5000mm para 10000mm x 10000mm, e reduziram o tamanho dos elementos, aumentando o número de nós. Concluíram, no entanto, que o aumento da geometria e redução dos elementos não apresentaram efeito significativo sobre a precisão do

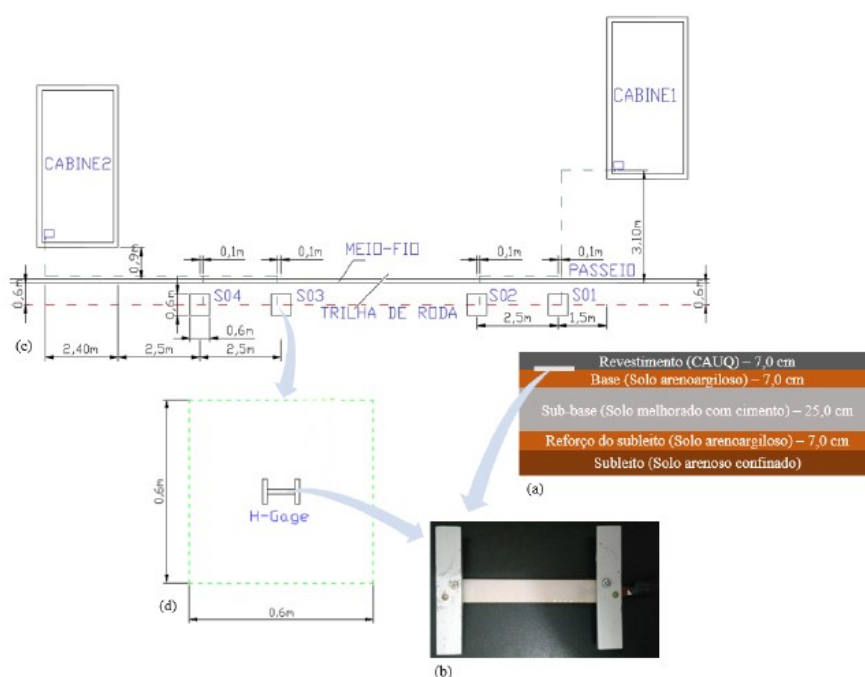
modelo em elementos finitos, sendo a geometria inicial suficiente para desenvolvimento das análises.

#### 2.4.6 Deformações específicas de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico

Em seus estudos, Carvalho e Albuquerque (2019) trouxeram uma avaliação das deformações específicas de tração da fibra inferior do revestimento asfáltico medidas por instrumentação através de sensor H-Gage e em seguida comparadas com estimativas numéricas obtidas através de modelagem realizada com base no método das múltiplas camadas elásticas e pelo método dos elementos finitos.

O objeto de avaliação das deformações foi a pista experimental localizada no Campus de São Cristóvão da Universidade Federal de Sergipe, sendo composta por camada de revestimento asfáltico de 7,0 cm, base em solo areno-argiloso, antirreflexão de trincas, de 7,0 cm, sub-base em solocimento (4%) de 25 cm e reforço de subleito de solo arenoargiloso de 7,0 cm, além de subleito em solo arenoso confinado. A Figura 2.34 traz o perfil do pavimento asfáltico (a), o sensor H-Gage desenvolvido, o esquema de instalação dos sensores nas seções da pista experimental e o esquema de locação do sensor em seção tipo do pavimento:

**Figura 2.34 - Detalhes da análise**



Fonte: Carvalho e Albuquerque (2019).

A Figura 2.35 mostra as propriedades mecânicas definidas para a pista experimental nos estudos de Matos (2015):

**Figura 2.35 - Propriedades Mecânicas**

| Camadas             | MR (MPa)                              | R <sup>2</sup> | μ    |
|---------------------|---------------------------------------|----------------|------|
| Revestimento        | 4.880,73                              |                | 0,25 |
| Base                | $MR = 188,88 \cdot \sigma_s^{0,1905}$ | 0,82           | 0,30 |
| Sub-base            | $MR = 6998,50 \sigma_s^{0,0044}$      | 0,96           | 0,25 |
| Reforço do subleito | $MR = 272,60 \sigma_s^{0,430}$        | 0,89           | 0,40 |
| Subleito            | 110,00                                |                | 0,30 |

Fonte: Carvalho e Albuquerque (2019) apud Matos (2015)

Obtidos os parâmetros de rigidez dos revestimentos, os autores estimaram as deformações horizontais no ponto crítico do revestimento, na sua fibra inferior e alinhado à posição da resultante central do carregamento do semieixo, analogamente ao local de instalação dos sensores. Para o método das múltiplas camadas utilizou-se o software AEMC/SisPAV, ao passo que para análise em elementos finitos empregou-se o software ANSYS. Na análise em elementos finitos o elemento utilizado foi o SOLID 185, caracterizado por ter plasticidade, hipereslaticidade, fluência, grande deflexão e grandes capacidades de deformação, com capacidade para análises elastoplásticas.

Carvalho e Albuquerque (2019) obtiveram os seguintes resultados (Figura 2.36) nas análises realizadas por instrumentação e estimadas por métodos numéricos, bem como as respectivas previsões de vida de fadiga:

**Figura 2.36 - Deformações obtidas por instrumentação e métodos numéricos**

| Método*                | Seção | 8,27 t           |              |                   | 10,47 t          |              |                   | 11,54 t          |              |                   |
|------------------------|-------|------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|
|                        |       | $\epsilon$ (m/m) | $\Delta$ (%) | Nf (ciclos)       | $\epsilon$ (m/m) | $\Delta$ (%) | Nf (ciclos)       | $\epsilon$ (m/m) | $\Delta$ (%) | Nf (ciclos)       |
| Inst.                  | 01    | -                | -            | -                 | 0,000402         | -            | $2,40 \cdot 10^4$ | 0,000774         | -            | $8,39 \cdot 10^2$ |
|                        | 02    | 0,000190         | -            | $1,11 \cdot 10^6$ | 0,000497         | -            | $8,10 \cdot 10^3$ | 0,000682         | -            | $1,61 \cdot 10^3$ |
|                        | 04    | 0,000430         | -            | $1,68 \cdot 10^4$ | 0,000493         | -            | $8,48 \cdot 10^3$ | 0,000714         | -            | $1,27 \cdot 10^3$ |
| AEMC<br>(Ad = 0)       | 01    | -                | -            | -                 | 0,000636         | 58,20        | $2,29 \cdot 10^3$ | 0,000684         | -11,62       | $1,58 \cdot 10^3$ |
|                        | 02    | 0,000647         | 240,52       | $2,10 \cdot 10^3$ | 0,000805         | 61,97        | $6,87 \cdot 10^2$ | 0,000867         | 27,12        | $4,70 \cdot 10^2$ |
|                        | 04    | 0,000580         | 34,57        | $3,68 \cdot 10^3$ | 0,000725         | 47,05        | $1,17 \cdot 10^3$ | 0,000782         | 9,52         | $7,96 \cdot 10^2$ |
| MEF<br>( $\mu = 1,0$ ) | 01    | -                | -            | -                 | 0,000489         | 21,64        | $8,81 \cdot 10^3$ | 0,000549         | -29,07       | $4,87 \cdot 10^3$ |
|                        | 02    | 0,000413         | 117,37       | $2,09 \cdot 10^4$ | 0,000562         | 13,08        | $4,32 \cdot 10^3$ | 0,000621         | -8,94        | $2,59 \cdot 10^3$ |
|                        | 04    | 0,000448         | 3,94         | $1,38 \cdot 10^4$ | 0,000603         | 22,31        | $3,01 \cdot 10^3$ | 0,000678         | -5,04        | $1,65 \cdot 10^3$ |
| MEF<br>( $\mu = 0,7$ ) | 01    | -                | -            | -                 | 0,000418         | 3,98         | $1,97 \cdot 10^4$ | 0,000469         | -39,40       | $1,09 \cdot 10^4$ |
|                        | 02    | 0,000350         | 84,21        | $4,88 \cdot 10^4$ | 0,000470         | -5,43        | $1,08 \cdot 10^4$ | 0,000527         | -22,73       | $6,00 \cdot 10^3$ |
|                        | 04    | 0,000378         | -12,29       | $3,29 \cdot 10^4$ | 0,000511         | 3,65         | $7,03 \cdot 10^3$ | 0,000575         | -19,46       | $3,84 \cdot 10^3$ |
| MEF<br>( $\mu = 0,0$ ) | 01    | -                | -            | -                 | 0,000181         | -54,97       | $1,43 \cdot 10^6$ | 0,000196         | -74,67       | $9,49 \cdot 10^5$ |
|                        | 02    | 0,000157         | -17,36       | $2,96 \cdot 10^6$ | 0,000193         | -61,16       | $1,03 \cdot 10^6$ | 0,000209         | -69,35       | $6,83 \cdot 10^5$ |
|                        | 04    | 0,000146         | -66,12       | $4,28 \cdot 10^6$ | 0,000181         | -63,28       | $1,43 \cdot 10^6$ | 0,000196         | -72,54       | $9,49 \cdot 10^5$ |

Fonte: Carvalho e Albuquerque (2019)

De posse desses resultados, os autores inferiram diferenças significativas entre os valores obtidos na análise numérica em relação à instrumentação, com diferença média de 61,34% no caso do método das múltiplas camadas finitas. Na modelagem em elementos finitos constatou-se uma diferença de 28,46 % considerando o atrito e 59,94% quando o atrito entre as camadas é desconsiderado. Ainda em relação a este método, os autores observaram que o modelo em elementos finitos proporcionou resultados de deformações com maiores magnitudes em condições de atrito crescente, o que significa que as deformações elásticas ocorreram adicionadas às deformações plásticas, que aumentaram à medida que o atrito foi ampliado, devido à consequente elevação da tensão de cisalhamento na interface.

## 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

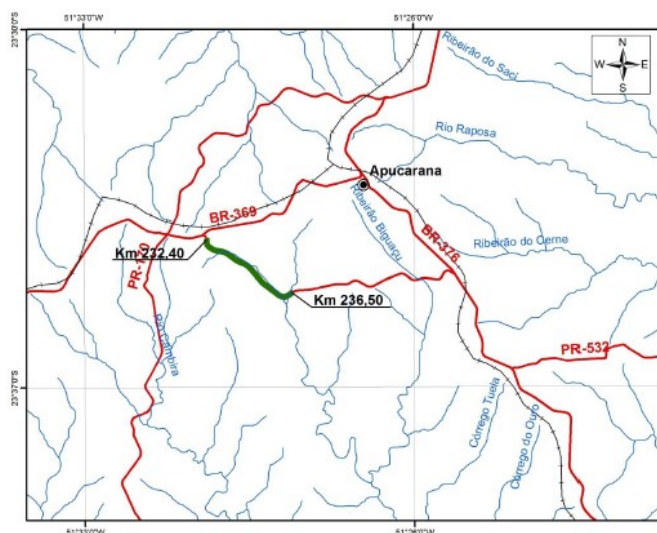
Neste trabalho será realizado um estudo de caso referente ao trecho de duplicação da BR376 - Contorno Sul de Apucarana, nomeado Trecho XXVII-A. Para isso, serão realizadas as seguintes etapas:

- Caracterização do trecho;
- Organização do banco de dados experimentais;
- Implementação do modelo numérico;
- Calibração do modelo;
- Análise paramétrica.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO

O trecho em estudo está localizado no município de Apucarana, no estado do Paraná, e tem extensão de 4.100m, os quais se iniciam no km 232+400, estendendo-se até o km 236+500 da BR 376. A Figura 3.1 traz o mapa de situação do seguimento.

**Figura 3.1 - Mapa de Situação**



Fonte: Projeto de Duplicação BR376 – Contorno Sul de Apucarana

#### 3.1.1 Geologia Geral

O trecho localizado entre o km 232+400 e o km 236+500 (Trecho XXVII-A) está inserido na Formação Serra Geral, possui afloramentos de basalto alterado e o perfil de alteração é composto por solo de alteração de rocha e solo residual, podendo ocorrer, em alguns terraplenos, uma camada de colúvio. Este trecho está inserido no Planalto de Apucarana, sendo que as formas de relevo predominantes são topos alongados, vertentes convexas e vales em “V”.

A Figura 3.2 apresenta a vista geral do relevo:

**Figura 3.2 - Vista do relevo ao longo do Trecho XXVII-A**



Fonte: Projeto de Duplicação BR376 – Contorno Sul de Apucarana

#### 3.1.2 Estudos Geotécnicos

Para a caracterização geotécnica, foram programadas sondagens a trado, percussão e sondagens mistas para os locais em corte em rocha, assim como poços de inspeção, nas seguintes quantidades:

- 241 sondagens a trado;
- 371 sondagens à percussão, com realização de ensaios SPT;
- 62 sondagens mistas;
- 15 poços de inspeção;

Nas sondagens a trado foram recolhidas amostras deformadas para a realização de ensaios de caracterização. Os ensaios realizados foram:

- Ensaios Granulométricos;
- Limites de Liquidez, de Plasticidade e Índice de Plasticidade;
- Densidade Máxima;
- Umidades Natural e Ótima;
- Expansão;
- Índice de Suporte Califórnia;
- Grau de Compactação.

#### 3.1.3 Projeto de Pavimentação

O dimensionamento do pavimento da BR-376 foi executado através do Método do DNIT e, ainda, utilizou-se verificação mecanística, que se baseia na teoria da elasticidade para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos em diversos pontos da estrutura do pavimento, quando submetido ao carregamento do tráfego.

O método do DNIT baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e materiais que constituem a estrutura do pavimento e, ainda, nos parâmetros do tráfego. Atende à limitação de deformações permanentes excessivas e de tensões que possam provocar a ruptura por cisalhamento dos solos de base, sub-base e subleito. Porém, a limitação das deformações recuperáveis ou resilientes, cuja repetição sob a ação do tráfego provoca a ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos, um dos principais tipos de defeitos apresentados nos pavimentos do Brasil, não é considerada. Este método é importante para gerar a estrutura inicial a ser analisada em um método de dimensionamento baseado na mecânica dos pavimentos.

Quanto ao tráfego, o pavimento é projetado para receber, durante o período de projeto, um número determinado de solicitações. Atingidas estas solicitações, a função para a qual foi projetado o pavimento estaria terminada; entretanto, não se deve ter a ideia de uma deficiência total da estrutura, devendo-se considerar, a partir de então, os serviços de reforço do pavimento, como, por exemplo, o recapeamento.

Após concepção da estrutura inicial do pavimento a partir de dimensionamento realizado com base no método do DNIT, realizou-se uma análise mecanística com a utilização

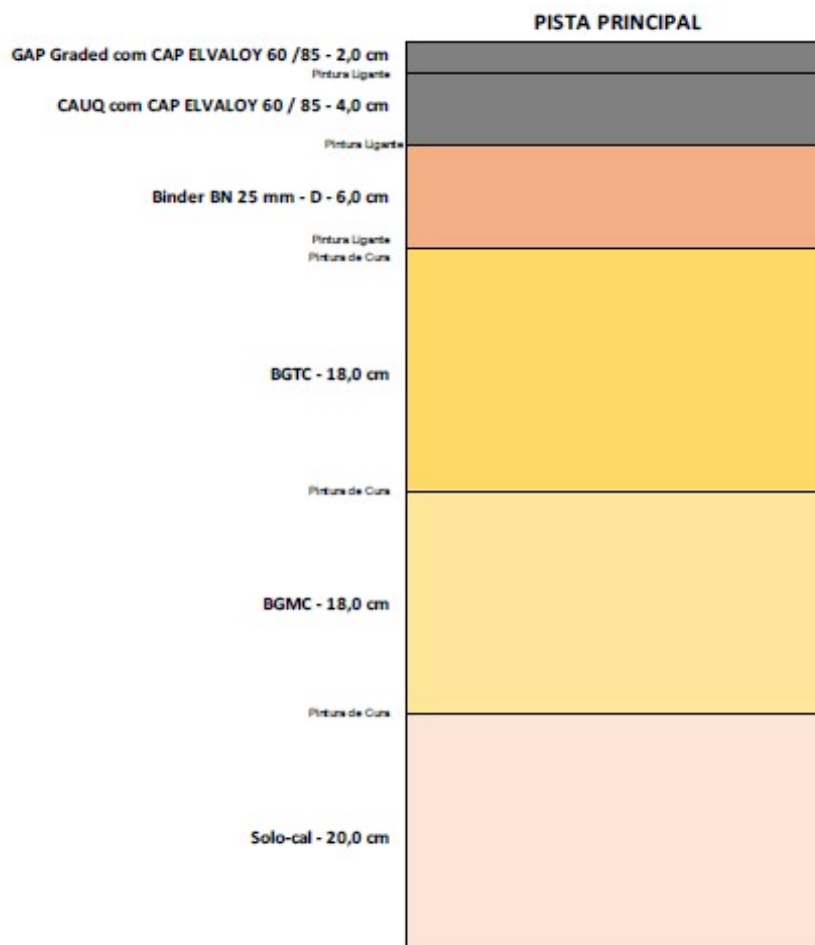
### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

do programa computacional ELSYM5, com o objetivo de se determinar as tensões, deformações e deslocamentos na estrutura.

O programa ELSYM5 foi desenvolvido originalmente pelo Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia, em Berkeley, e tem por objetivo o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos atuantes em diversos pontos da estrutura do pavimento quando submetido à ação do tráfego. Para isto, considera-se o pavimento como um sistema de múltiplas camadas de comportamento elástico-linear, admitindo-se as hipóteses de Burmister para a superposição dos efeitos. Ainda sobre o ELSYM5, consideram-se as camadas homogêneas, isotrópicas, e horizontalmente infinitas, sendo o subleito um meio semi-infinito. Cada camada possui seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Após a verificação mecanicista, obteve-se a estrutura final do pavimento. O croqui da seção de pavimento da pista principal é apresentado na Figura 3.3 a seguir:

**Figura 3.3 - Pavimento Tipo**



Fonte: Projeto de Duplicação BR376 – Contorno Sul de Apucarana

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A partir da definição da estrutura do pavimento a ser implantado estabeleceu-se as deflexões máximas admissíveis, para controle executivo a ser realizado em campo. A realização de medidas de deflexão sobre cada camada concluída do pavimento é uma medida adicional/ complementar e não dispensa os demais controles usuais e rotineiros de execução.

A obtenção de deflexões nas camadas do pavimento durante os controles de execução dos serviços nos mesmos patamares dos valores de deflexão estimados no projeto confirmará parâmetros considerados no dimensionamento. A Figura 3.4 a seguir apresenta os limites máximos estabelecidos:

**Figura 3.4 - Deflexões admissíveis**

| MATERIAL                                         | PISTA PRINCIPAL   |                       |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
|                                                  | ESPESSURA<br>(cm) | DEFLEXÃO<br>(0,01 mm) |
| GAP-GRADED COM CAP POLÍMERO RET ELVALOY DUPONT   | 2                 | < 20                  |
| GAP-GRADED COM CAP CONVENCIONAL                  | -                 | -                     |
| CAUQ COM CAP POLÍMERO                            | 4                 | < 20                  |
| CAUQ COM CAP CONVENCIONAL                        | -                 | -                     |
| CAUQCOM CAP CONVENCIONAL (BINDER) FAIXA BN 25 mm | 6                 | < 22                  |
| BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)        | 18                | < 24                  |
| BRITA GRADUADA MELHORADA COM CIMENTO (BGMC)      | 18                | -                     |
| BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS)                     | -                 | -                     |
| MACADAME SECO                                    | -                 | -                     |
| MACADAME SECO                                    | -                 | -                     |
| SOLO-CAL                                         | 20                | < 80                  |

Fonte: Projeto de Duplicação BR376 – Contorno Sul de Apucarana

#### 3.2 BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL

O controle de execução dos serviços do pavimento foi efetuado através de uma série de controles tecnológicos, geométricos, de acabamento e de aceitação, conforme especificações de serviços indicadas em projeto.

A partir desse controle, gerou-se uma série de dados experimentais que integrarão as análises realizadas nesta pesquisa, sejam como dados de entrada para os modelos concebidos

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

---

ou ainda como critérios comparativos para calibração e avaliação do nível de acurácia da abordagem em elementos finitos.

Desta forma, os ensaios a seguir contemplam o banco de dados disponível nesta pesquisa, de acordo com a camada de pavimento executada, e estão dispostos no Anexo A deste trabalho:

- Solo Cal: Densidade in situ, Índice de Suporte Califórnia, expansão, nivelamento, deflexão e taxa de imprimação;
- BGMC e BGTC: Densidade in situ, Grau de Compactação, Análise granulométria, equivalente de areia, ensaios de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias de cura, ensaio de resistência à tração por compressão diametral, deflexão e nivelamento;
- Camadas Asfálticas – Binder, CBUQ Polímero e GAP: Ensaio Marshall, granulometria dos agregados, caracterização do CAP, taxa de pintura, volume de vazios; deflexões e nivelamento.

Nas análises a serem realizadas neste trabalho, os principais dados a serem considerados dizem respeito ao controle deflectométrico das camadas. Neste controle foram realizados ensaios com a Viga Benkelman após execução de todas as camadas de pavimento, a fim de verificar o atendimento às deflexões máximas admissíveis de projeto. Os valores obtidos se enquadraram nos limites previstos, como pode ser observado no Anexo A, que se subdividem em Pista Norte e Pista Sul, além de medição no bordo externo e interno da faixa.

Foram realizados ainda ensaios com o FWD na última camada asfáltica do pavimento, a fim de se comprovar se as deflexões finais foram satisfatórias. Com os resultados obtidos é possível também determinar as bacias de deflexão, de forma a se avaliar o comportamento estrutural do pavimento em relação à distribuição das cargas e contribuição das camadas.

O Anexo B apresentam os resultados obtidos em seguimento deste trecho, compreendido entre os kms 233+40 a 236+540 na Pista Norte, assim como os resultados gerados entre os kms 233+640 e 236+230 na Pista Sul, ambos medidos na faixa 2 - faixa adjacente ao acostamento.

Com base no banco de dados faz-se possível a comparação dos valores obtidos no modelo numérico inicial com os resultados obtidos em campo, a fim de avaliar o nível de

aplicabilidade do modelo, a necessidade de calibração a partir da inserção de novas características e acurácia da análise a partir do Método dos Elementos Finitos.

#### 3.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE PAVIMENTOS

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, em sua maioria, determinam as respostas mecânicas do pavimento com base na teoria da elasticidade, apesar do comportamento da maioria dos materiais empregados em pavimentação, sob ação de cargas repetidas, não se adequar às considerações desta teoria. No pavimento real, as cargas são transientes, o solo e materiais granulares tem relações tensão-deformação fortemente não lineares e o revestimento asfáltico tem propriedades que são sensíveis a taxa de deformação e temperatura (FRANCO, 2007).

Além disso, a previsão do desempenho de pavimentos flexíveis depende fundamentalmente do conhecimento da distribuição de tensões e deformações que ocorrem em sua estrutura, uma vez que o sistema é composto por camadas e sujeito a carregamentos diversos. Para determinação dessas características podem ser utilizadas soluções exatas ou numéricas, baseadas principalmente no método dos elementos finitos. Independentemente do método, todas as soluções buscam resolver um sistema de equações diferenciais que satisfaçam as condições de contorno por meio de um algoritmo conhecido de cálculo.

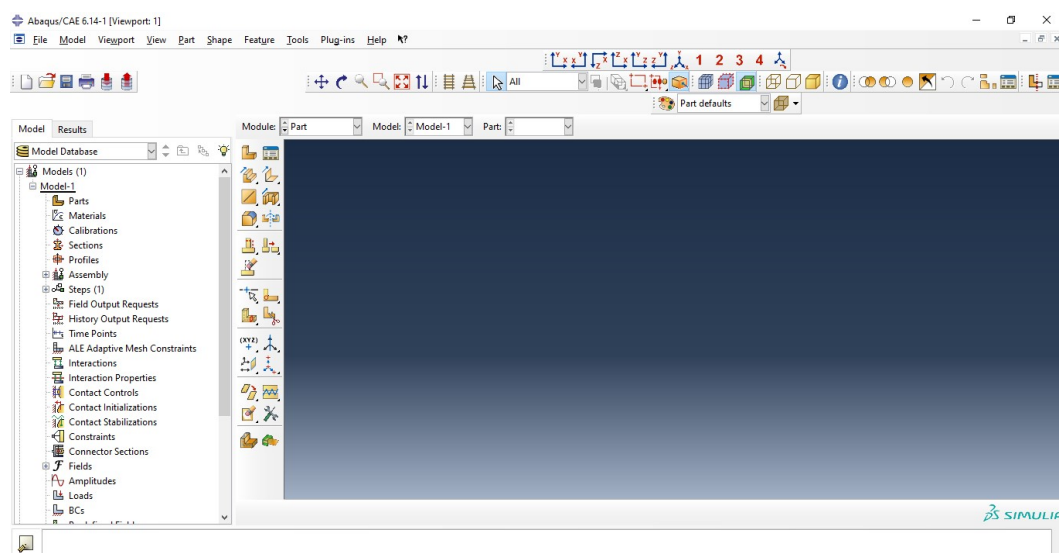
Neste contexto, a análise numérica de pavimentos flexíveis a partir da utilização de softwares que trabalham com o método dos elementos finitos tem ganhado força, uma vez que a evolução computacional possibilitou a criação de modelos complexos e com grande gama de variáveis intervenientes no problema. O ABAQUS, software utilizado neste trabalho, se destaca na elaboração de modelos que simulam o comportamento de pavimentos flexíveis, uma vez que esse tipo de estrutura é composta por sistema de camadas de materiais distintos, com comportamentos singulares e que interagem nas superfícies de contato, a fim de absorver os esforços a que estão submetidos. A seguir, é explanado de forma sucinta como é realizada a concepção do modelo no programa, bem como algumas peculiaridades e vantagens da utilização do software.

#### 3.3.1 O software ÁBAQUS

O ÁBAQUS é um software de grande potencialidade e aplicação nos problemas de engenharia, que realiza a análise de tensões e deformações em qualquer tipo de estrutura e tem como base o método dos elementos finitos. Este método se baseia na aproximação das condições de equilíbrio de um corpo sob o ponto de vista Lagrangiano, ou seja, cada ponto material do corpo é analisado como sendo uma função do tempo e de suas coordenadas, e as equações de equilíbrio são obtidas a partir do princípio dos trabalhos virtuais (HIBBIT et al., 1998).

O software possui elevado alcance tecnológico, sendo muito utilizado para análise de modelos tridimensionais, como no trabalho em questão. A modelagem do problema é iniciada a partir do módulo gráfico CAE – Computer Aided Engineering ou Engenharia Assistida por Computador, um pré-processador com interface gráfica que possibilita a definição da geometria do problema e estrutura espacial, atribuição dos materiais e propriedades, geração da malha de elementos finitos, atribuição de cargas e condições de contorno, entre outras funções. Na Figura 3.5 pode-se observar a interface do módulo gráfico CAE:

**Figura 3.5 - Interface de entrada do ABAQUS/CAE**



Fonte: Autora (2021)

A construção do modelo se dá por etapas, e de forma sintética, ocorre nos seguintes módulos:

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

---

- *Part*: Definição da geometria das partes das que irão compor o modelo e atribuição de seguimentos/pontos notáveis que receberão aplicação de cargas e/ou serão pontos de análise posterior;
- *Property*: Definição dos materiais que compõe as partes do modelo, com atribuição de suas propriedades mecânicas e comportamento estrutural, bem como atribuição destes materiais a cada parte criada;
- *Assembly*: Agrupamentos das partes que compõe o modelo na estrutura, de forma a simular o problema real;
- *Step*: Definição dos passos em que ocorrerá a análise bem como da linearidade ou não da mesma;
- *Interaction*: Definição da forma como ocorrem as interações – contatos – entre as partes do modelo, com definição de tensões cisalhantes, atribuição do atrito entre as camadas;
- *Load*: Inserção de parâmetros que simulam as condições de carregamento (forças pontuais, de superfície, de corpo, geradas por variação de temperatura, pressões de fluido) e restrições de deslocamento (condições de contorno);
- *Mesh*: Definição das dimensões e tipo da malha de elementos finitos além da atribuição da malha às partes do modelo;
- *Job*: Criação do arquivo de entrada de dados (resultados).

Vale ressaltar que, a realização de um estudo preliminar se faz necessária antes de dar início às simulações, de modo a se determinar as características, parâmetros e aspectos mais adequados a serem utilizados no modelo, como as condições de contorno, refinamento da malha, modo de interações entre as partes. Isso porque o software ABAQUS é um programa genérico e aberto para análise de estruturas em geral, de modo que o desenvolvimento de um modelo apropriado a cada aplicação é essencial para simular o comportamento do pavimento flexível.

Além disso, Rangel (2017), traz que na modelagem de pavimentos o ABAQUS sai à frente de outros softwares que utilizam o método dos elementos finitos, por dois motivos: o primeiro diz respeito à possibilidade de simulação do contato entre as camadas, disponível para modelagens em três dimensões. O autor aponta ainda que a segunda vantagem está relacionada à possibilidade de acoplamento de modelos constitutivos terceiros, através da

rotina UMAT (*user subroutine to define a material's mechanical behavior* ou subrotina do usuário para definição do comportamento mecânico de um material).

Outro fator considerável está relacionado à evolução computacional vigente, que permite a resolução de problemas complexos de engenharia a partir da utilização de softwares que trabalham com o método dos elementos finitos. O ABAQUS possibilita a correlação de um grande número de variáveis e modelos constitutivos distintos em uma mesma estrutura, de modo que o pavimento é modelado por milhares de nós e em cada um deles são calculadas as tensões e deformações. Se o modelo constitutivo utilizado for elástico linear, serão obtidos resultados de deformações elásticas para o material (deflexão elástica), ao passo que na utilização de modelos plásticos faz-se possível a consideração de deformações permanentes na estrutura em análise (RANGEL,2017).

#### 3.4 MODELO NUMÉRICO

Para elaboração do modelo numérico que represente a estrutura do pavimento utilizou-se o software ABAQUS, com licença do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. A fim de simular as condições de ensaio da Viga Benkelman e FWD, foram elaborados dois modelos numéricos, nomeados neste trabalho Modelo I e Modelo II, respectivamente. A estrutura do pavimento foi configurada em camadas, assentes sobre um subleito de fundação. O subleito e camadas de reforço, base e sub-base foram modelados separadamente como elementos sólidos de comportamento elástico linear, ao passo que para as camadas de revestimento asfáltico considerou-se comportamento viscoelástico. Será detalhado a seguir as premissas adotadas para definição da geometria, material, carregamentos, malha e condições de contorno utilizados nos modelos.

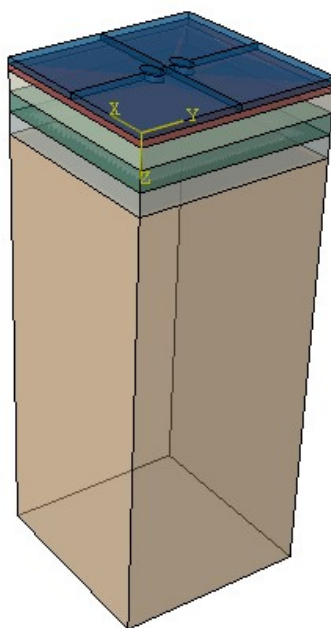
#### 3.5 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO PROBLEMA

Para o desenvolvimento das análises numéricas no software ABAQUS deve-se inicialmente definir a geometria do elemento em estudo, de modo a representá-lo de maneira mais próxima quanto possível do problema real.

Nos modelos propostos a concepção da geometria baseia-se em um sistema de referência no espaço em que o eixo X corresponde à direção de tráfego da rodovia, eixo Y

corresponde à direção transversal a rodovia e o eixo Z é normal à superfície de rolamento, como pode ser observado na Figura 3.6 a seguir:

**Figura 3.6 – Modelo e sistema de referência no espaço**



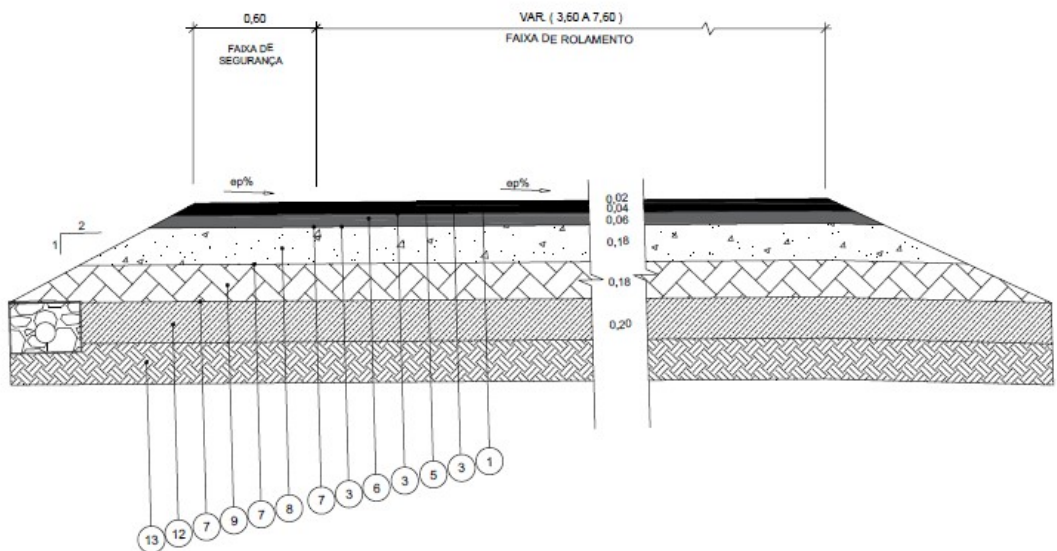
Fonte: Autora (2022)

Em relação às dimensões da estrutura, a faixa de rolamento padrão no projeto em análise possui 3,60 metros de largura, ao passo que a medida da deflexão em campo, realizada com a utilização da Viga Benkelman, é efetuada conforme Figura 2.8.

A partir destas condições, determinou-se uma largura correspondente à metade da largura da faixa de rolamento, totalizando 1,80 metros. Tal configuração se mostra bastante conveniente pois permite que a área carregada esteja disposta de forma simétrica em relação ao eixo X, visto que a determinação da deflexão é realizada a 0,90 metros do bordo externo da pista (referente à região de formação da trilha de roda).

De modo a simplificar as análises e devido aos tempos computacionais atrelados às simulações as dimensões do pavimento no plano XY foram consideradas simétricas, estabelecendo-se um sólido de 1,80m de largura e 1,80 metros de comprimento, o que implicou na modelagem apenas do semieixo. Em relação às dimensões em Z, atribuiu-se as espessuras das camadas em concordância com o pavimento-tipo analisado, evidenciado na Figura 3.7 e Figura 3.8:

Figura 3.7 - Pavimento Tipo de Projeto



Fonte: Projeto Executivo de Duplicação da Rodovia BR376/PR – Km236+500 a 243+000

Figura 3.8 - Especificação das camadas do Pavimento-Tipo

|   |                                                                              |      |
|---|------------------------------------------------------------------------------|------|
| ① | GAP-GRADED COM POLÍMERO RET ELVALOY DUPONT 60/85 E - FAIXA 3 (6mm) - ENGELOG | 0.02 |
| ③ | IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE                                               |      |
| ⑤ | CAUQ COM CAP POLÍMERO RET ELVALOY DUPONT 60/85 E - FAIXA III (E-002 ENGELOG) | 0.04 |
| ③ | IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE                                               |      |
| ⑥ | CAUQ COM CAP CONVENCIONAL (BINDER) FAIXA BN 25 mm - D - ENGELOG              | 0.06 |
| ③ | IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE                                               |      |
| ⑦ | IMPRIMADURA BETUMINOSA DE CURA                                               |      |
| ⑧ | BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - FAIXA I - DER/PR *               | 0.18 |
| ⑦ | IMPRIMADURA BETUMINOSA DE CURA                                               |      |
| ⑨ | BRITA GRADUADA MELHORADA COM CIMENTO (BGMG) - FAIXA I - DER/PR *             | 0.18 |
| ⑦ | IMPRIMADURA BETUMINOSA DE CURA                                               |      |
| ⑫ | SOLO-CAL                                                                     | 0.20 |
| ⑬ | SUBLEITO LOCAL                                                               |      |

Fonte: Projeto Executivo de Duplicação da Rodovia BR376/PR

O subleito, considerado como espaço semi-infinito, pode ser representado por uma camada suficientemente grande. Deste modo, atribuiu-se a espessura de 3 metros para o subleito, que gerou resultados dentro da nuvem de pontos dos resultados experimentais.

#### 3.6 O MATERIAL

Foram atribuídas as propriedades pertinentes ao material constituinte de cada camada do pavimento, admitindo a hipótese de materiais homogêneos e isotrópicos. Para as camadas de subleito, reforço de subleito, sub-base e base considerou-se comportamento elástico linear, ao passo que para as camadas de revestimento asfáltico, admitiu-se comportamento viscoelástico. Dois parâmetros principais regem o comportamento destes materiais: o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson (relação entre a deformação radial e a deformação axial de um material), sendo que tais características foram consideradas com base nos resultados dos ensaios de campo e munidos de equações empregadas em larga escala na literatura.

##### 3.6.1 Subleito

Ao longo de toda extensão do Trecho os solos são em sua maioria, lateríticos argilosos, com boa capacidade de suporte quando compactados. No método DNIT utiliza-se o CBR para caracterização das camadas de fundação do pavimento.

O CBR característico do trecho foi calculado com base nas “Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos/Instruções para Acompanhamento e Análise” (Publicação IPR-739-2010). Com base nos resultados obtidos a partir das sondagens de campo foi realizada uma análise estatística e a Figura 3.9 apresenta o  $CBR_{carac.}$  adotado para o dimensionamento:

**Figura 3.9 - CBR característico**

| <b>Análise Estatística</b>               |     |
|------------------------------------------|-----|
| <b>Capacidade de Suporte do Subleito</b> |     |
| $CBR_{médio}$                            | 13  |
| $\sigma$ desvio padrão                   | 2,7 |
| Nº de Amostras                           | 67  |
| CBR carac. (%)                           | 10  |

Fonte: Projeto Executivo de Duplicação da Rodovia BR376/PR

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

---

Assim, para determinação do módulo de resiliência do subleito utilizou-se a equação desenvolvida por Medina, Pinto & Preussler, que correlaciona o Módulo de Resiliência ao valor de CBR:

$$M_r = 326 + 67 (\text{CBR}) (\text{Kgf/cm}^2) \quad (11)$$

Desta forma, para elaboração do modelo considerou-se o valor de 100Mpa para o módulo de resiliência do subleito.

#### 3.6.2 Solo Cal

Embora nas condições ótimas de umidade e compactação o subleito se apresente com capacidade de suporte da ordem de 10% de CBR, constatou-se que em in situ o material encontrava-se em condições desfavoráveis em relação à umidade ótima. Em função desta condição e conseqüentemente da menor probabilidade de se atingir as deflexões previstas de projeto, definiu-se a execução de camada de reforço do subleito em solo-cal, de espessura de 20 cm.

Nos ensaios realizados após a execução da camada de solo cal neste seguimento, obteve-se um CBR médio de 65%. A determinação do módulo de resiliência se deu com base na equação 12, que correlaciona este parâmetro ao valor do CBR do material no caso de reforço de subleito com material laterítico, e é apresentada na obra “Pavimentação Asfáltica” de Balbo (2007):

$$M_r = 22 \times \text{CBR}^{0,8} \quad (12)$$

Desta forma, obtém-se o valor de Módulo de Resiliência de 636 Mpa, adotado para as análises deste trabalho.

#### 3.6.3 Camadas de Base e Sub-base

Para as camadas granulares o módulo de resiliência foi estimado a partir do emprego de equações que correlacionam este parâmetro à resistência à compressão da mistura, também apresentada na obra “Pavimentação Asfáltica” de Balbo (2007):

$$E = 4617 \times \sqrt{f_{ck}} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

Com base nos resultados experimentais, a camada de BGMC apresentou  $f_{ck}$  médio de 3,83 Mpa, resultando em módulo de resiliência estimado em 7224 Mpa. Para a camada de BGTC, o  $f_{ck}$  médio obtido nos ensaios é de 7,32 Mpa, resultando em 12492 Mpa para o módulo de resiliência desta camada.

#### 3.6.4 Camadas de concreto asfáltico

Para as camadas de revestimento, adotou-se o valor de módulo de resiliência especificados em projeto, e que seguem a faixa de valores apresentados na literatura. Sejam eles, 5000 Mpa para a camada de Binder e 4000 Mpa para a camada de CBUQ.

Com o objetivo de se aproximar da estrutura real do pavimento executado, considerou-se o comportamento viscoelástico da camada de concreto asfáltico. Para isso, definiu-se o comportamento do material a partir da utilização de um modelo matemático largamente utilizado na representação do comportamento viscoelástico: o modelo de séries de Prony, no domínio de frequência, que já possui código implementado no software ABAQUS.

De acordo com Endo (2013), o modelo constitutivo de viscoelasticidade isotrópica é comumente descrito por meio de séries de Prony nos atuais softwares comerciais de elementos finitos. A escolha da série de Prony é consequência da consagração alcançada na representação do comportamento viscoelástico linear por este modelo (Silva e Pagliosa, 2008). Uma das principais vantagens desse modelo é a abordagem relativamente simples de representação do módulo do material, tanto no domínio do tempo como no da frequência, apresentando bons resultados na modelagem final.

Estas séries são muito utilizadas pois permitem ajustar as curvas provenientes dos resultados experimentais em parâmetros provenientes da série, através de um algoritmo

### 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

computacional de otimização, e com isto garantir uma melhor abordagem na aproximação real do comportamento mecânico do material.

CHEN (2000) traz que as séries Prony são escritas com o seguinte formato geral:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i e^{\left(\frac{-t}{\beta_i}\right)} \quad (14)$$

Em que  $\alpha_i$  e  $\beta_i$ , são os coeficientes da série;  $n$  é o número de termos da série e  $t$ , o tempo.

A curva mestra do módulo dinâmico e os fatores de variação de temperatura foram obtidos de um modelo de previsão desenvolvido a partir do estudo LTPP (Long Term Performance Pavement) usando asfalto Binder tipo PG 64-22, com volume de vazios de 4%.

Gardete et al (2017), explica que o Programa LTPP monitoriza secções de pavimentos reais, recolhendo informação sobre essas mesmas secções durante períodos superiores a 10 anos. A informação recolhida tem a vantagem de permitir avaliar os pavimentos em situações reais de serviço apresentando um valor inerente muito elevado. A base de dados do programa LTPP é disponibilizada em DVD. Para simplificar a procura e a utilização dos dados, o LTPP facilita o acesso online à informação simplificada no sítio <http://www.infopave.com>.

A Tabela 3.1 traz um resumo dos parâmetros utilizados na elaboração do modelo.

**Tabela 3.1 - Parâmetros do Modelo**

| <b>Camada</b> | <b>Espessura (cm)</b> | <b>Módulo de Resiliência (Mpa)</b> | <b>Coefficiente de Poisson (v)</b> |
|---------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Revestimento  | 6                     | 4000                               | 0,30                               |
| Binder        | 6                     | 5000                               | 0,30                               |
| BGTC          | 18                    | 12492                              | 0,20                               |
| BGMC          | 18                    | 7224                               | 0,20                               |
| Solo Cal      | 20                    | 636                                | 0,35                               |
| Subleito      | Semi-Infinito         | 100                                | 0,40                               |

Fonte: Autora (2022)

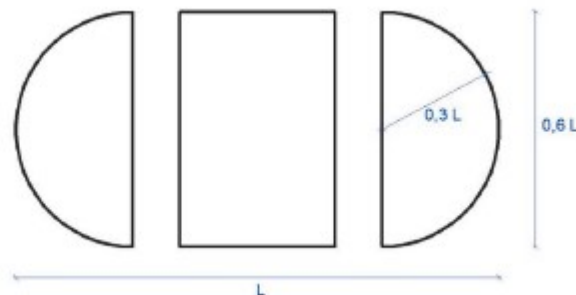
#### 3.7 CARREGAMENTOS

##### 3.7.1 Modelo I - Simulação da Viga Benkelman

O carregamento foi aplicado ao modelo como uma tensão uniformemente distribuída sobre a área de contato entre pneus e pavimento. Para definição do valor da tensão a ser aplicada ao modelo tomou-se como base a carga do eixo padrão rodoviário brasileiro, aplicado no ensaio de Viga Benkelman, onde se utiliza um caminhão com 8,2 tf de carga no eixo traseiro, simetricamente distribuída em relação às rodas. O eixo traseiro é simples e com roda dupla.

Para definição da área de atuação das cargas, a geometria de contato entre o pneu e pavimento baseou-se nos estudos de Huang (2004), também utilizado na pesquisa de Santos(2018), onde autor aponta que a forma mais realista de representar a área de aplicação das cargas consiste na união de um retângulo e dois semi-círculos, formadores de uma elipse, como evidencia a Figura 3.10:

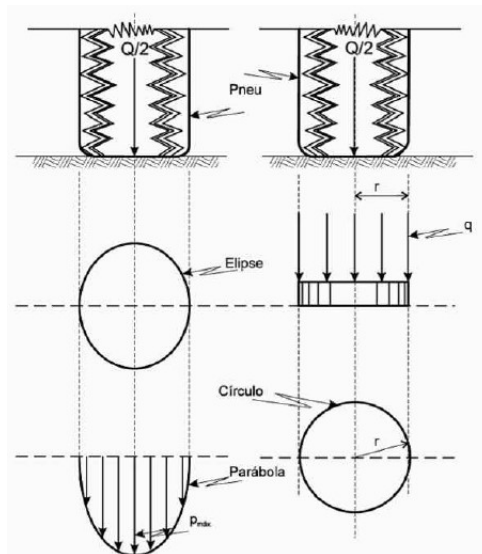
**Figura 3.10 - Área de contato pneu-pavimento**



Fonte: SANTOS (2018) Apud HUANG (2004)

O Manual de Técnicas de pavimentação também traz que a área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma aproximadamente elíptica, e a pressão exercida, dada a relativa rigidez dos pneus, tem uma distribuição aproximadamente parabólica, com pressão máxima exercida no centro da área carregada, como apresentado na Figura 3.11:

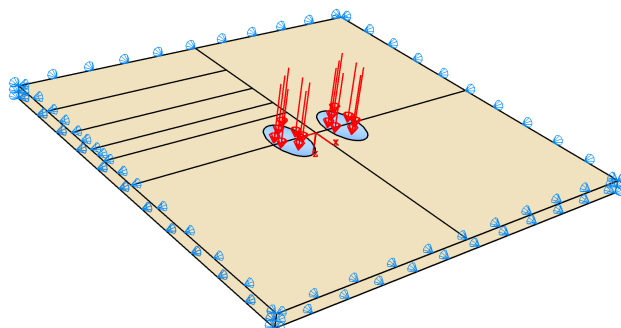
**Figura 3.11– Áreas de contato pneu x pavimento**



Fonte: Manual de Técnicas de Pavimentação (2008)

Assim, para a carga de 2,05 toneladas por roda e pressão de inflação do pneu de 0,56 Mpa, considerada igual à pressão de contato com o pavimento, obtém-se uma área de contato de 36607 mm<sup>2</sup>, o que resulta em uma elipse de dimensões  $L=278$  mm e  $0,6L=167$ mm. Definiu-se uma distância de 288 mm entre as rodas, valor utilizado no software Elsym5. Vale ressaltar que foram considerados apenas as componentes verticais das cargas oriundas do tráfego de veículos, como pode ser visto na Figura 3.12 onde identifica-se a aplicação do carregamento:

**Figura 3.12 - Aplicação do carregamento ao modelo I**

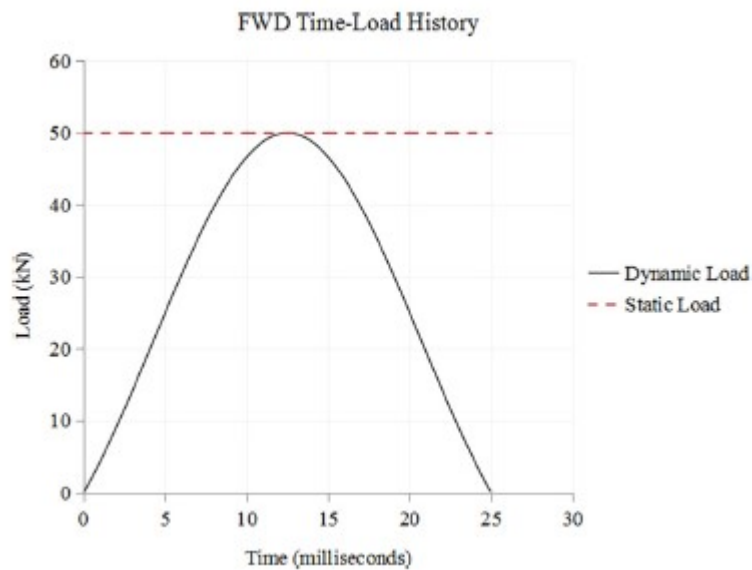


Fonte: Autora (2022)

#### 3.7.2 Modelo II - Simulação do FWD

O carregamento aplicado pelo FWD apresenta o formato de meia onda senoidal, também conhecido como carga dinâmica. Desta forma, para simulação do ensaio deflectométrico modelou-se a carga aplicada no formato circular, uma vez que, neste tipo de teste a carga é transmitida ao pavimento através de uma placa de 300mm de diâmetro. A duração do carregamento é de 25 a 30ms e representa a passagem de um veículo com velocidade entre 60 e 80km/h. Para concepção do modelo assumiu-se uma carga de 40kN, como utilizado em campo, sendo o pico atingido em 12,5ms. A Figura 3.13 demonstra o padrão de aplicação da carga em função do tempo para o teste FWD e utilizada no modelo numérico:

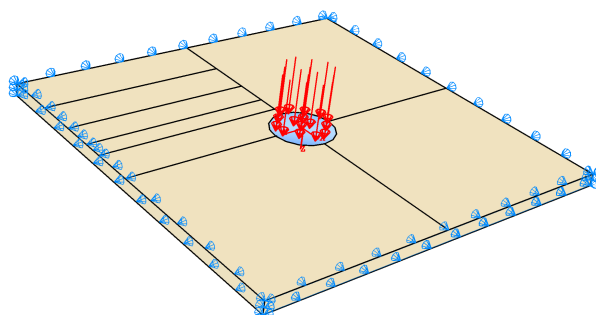
**Figura 3.13 – Aplicação da carga e Amplitude**



Fonte: Hamim et al (2018)

A Figura 3.14 evidencia a aplicação da carga dinâmica ao modelo, sobre área circular de 300mm de diâmetro:

**Figura 3.14 – Aplicação de carregamento ao modelo II**

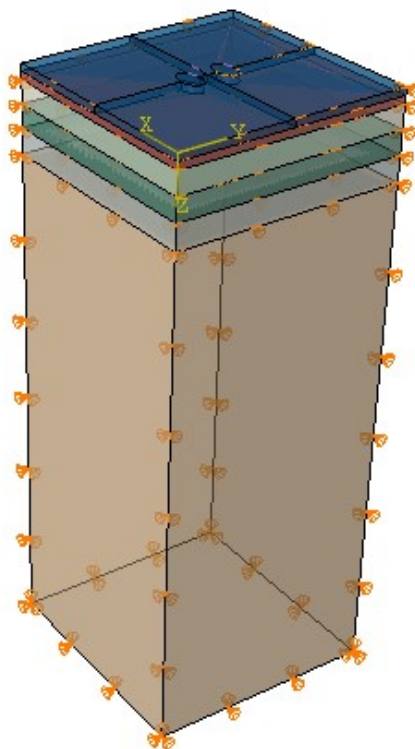


Fonte: Autora (2022)

#### 3.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foram atribuídas três condições de contorno à estrutura em análise. As faces laterais no plano XZ das camadas foram restritas ao movimento no eixo Y, ao passo que as faces laterais do plano YZ foram impedidas de se movimentar no eixo X. A superfície inferior do subleito teve sua movimentação impedida no eixo Z. A Figura 3.15 mostra tais condições de vinculação:

**Figura 3.15 - Aplicação das condições de contorno**



Fonte: Autora (2021)

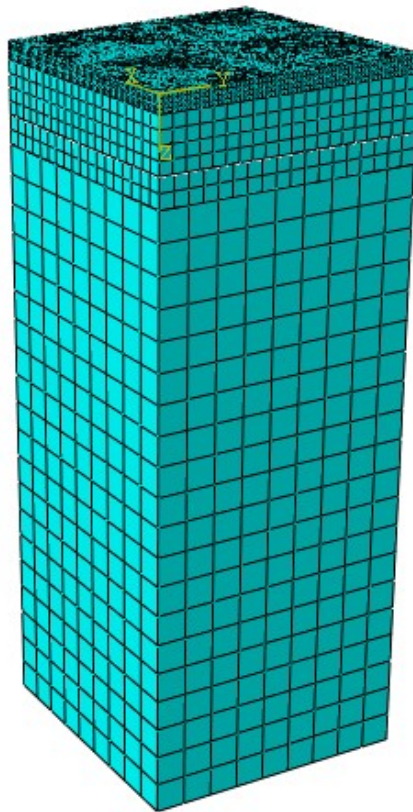
#### 3.9 MALHA

A acurácia da análise constituída por elementos finitos depende do tamanho da malha. Para apresentar melhores resultados, a malha precisa ser suficientemente refinada, principalmente em torno do carregamento. Entretanto, deve ser levado em consideração o custo computacional envolvido, uma vez que quanto menor o número de elementos que compõe a malha, maior o tempo despendido no processamento.

No modelo em estudo adotou-se uma malha não-homogênea composta por elementos denominados C3D8R (elementos sólidos contínuos que possuem 8 nós).

Em relação às dimensões da malha, a discretização seguiu uma proporcionalidade em relação à espessura de cada camada, o que encontra-se evidenciado na Tabela 3.2. Tal consideração se mostrou bastante viável uma vez que as camadas superiores e próximas ao local de aplicação da carga foram definidas com malhas mais refinadas (Figura 3.16).

**Figura 3.16 - Discretização da malha no modelo**



Fonte: Autora (2021)

**Tabela 3.2 - Dimensões da malha em cada camada**

| Camada       | Espessura (mm) | Discretização da Malha (mm) |
|--------------|----------------|-----------------------------|
| Revestimento | 60             | 30                          |
| Binder       | 60             | 30                          |
| BGTC         | 180            | 90                          |
| BGMC         | 180            | 90                          |
| Solo Cal     | 200            | 100                         |
| Subleito     | Semi-Infinito  | 160                         |

Fonte: Autora (2022)

#### 3.10 SUPERFÍCIE DE CONTATO

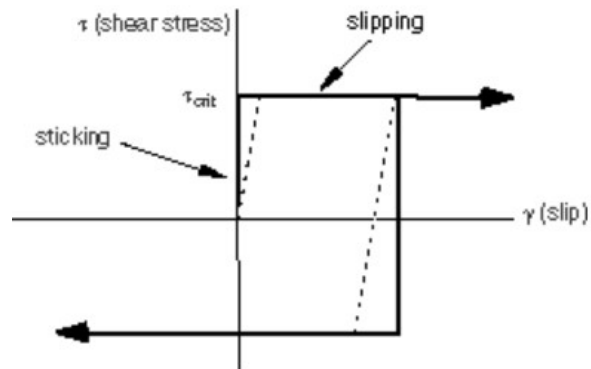
A avaliação da condição de interface entre as camadas da estrutura é de extrema importância para concepção do modelo, uma vez que este parâmetro pode afetar significativamente as respostas do pavimento sob carregamento estático ou dinâmico. Diante disto, com o objetivo de simular condição perfeita de aderência entre as camadas utilizou-se a opção de contato *Tie Constraint*. Esta opção permite condicionar o movimento de cada nó de uma superfície ao movimento do nó mais próximo da superfície adjacente (ABAQUS, 2014b), o que significa que não há movimento relativo entre os nós. Para se aproximar desta condição em campo, a técnica mais comum é a aplicação de uma pintura de ligação entre as camadas, realizada com o emprego de emulsão asfáltica na estrutura em estudo. Ainda, espera-se que as camadas da estrutura do pavimento permaneçam em contato sem abertura de fendas, uma vez que a área de contato é significativamente grande e devido à magnitude do carregamento compressivo em função da gravidade somado ao carregamento do tráfego. Portanto, é razoável supor que os movimentos relativos e absolutos das superfícies de contato nas interfaces das camadas são pequenos ou nulos.

Deste modo, para modelagem do contato empregou-se a classificação das superfícies em *slave* e *master*. A superfície *slave* foi atribuída à face do material menos rígido.

Após validação do modelo, uma análise paramétrica considerando a variação da condição de aderência entre as camadas de base e sub-base foi realizada. Isto porque, em campo, ocorre uma dificuldade em alcançar a condição de aderência perfeita entre camadas na execução do projeto. Para isto, utilizou-se o modelo de Coulomb, que relaciona basicamente a

tensão de cisalhamento máxima permitida na interface à pressão de contato entre as camadas. A Figura 3.17 traz a forma básica do modelo, onde é possível observar que duas superfícies em contato transmitem tensões de cisalhamento até certa magnitude antes de começarem a se deslocar entre si:

**Figura 3.17 - Comportamento da interface pelo modelo de atrito de Coulomb**



Fonte: ABAQUS (2014)

A Equação a seguir mostra que no modelo de Coulomb a tensão de cisalhamento é dada como uma fração da pressão de contato entre as superfícies ( $p$ ):

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (15)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de atrito. Para condição parcial de aderência definiu-se os valores de coeficiente de atrito igual a 0,4, 0,6 e 0,8.

## **4 RESULTADOS**

Este capítulo traz os resultados das deflexões no topo do pavimento obtidas a partir do modelo numérico construído com a utilização do software ABAQUS de acordo com as premissas descritas na metodologia. O modelo foi calibrado e validado com base nos dados experimentais de campo, principalmente os ensaios de Viga Benkelman e FWD, executados no trecho de duplicação da BR-376, nomeado Trecho XXII-A. Realizou-se o total de 240 simulações e os resultados individuais encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

### **4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO**

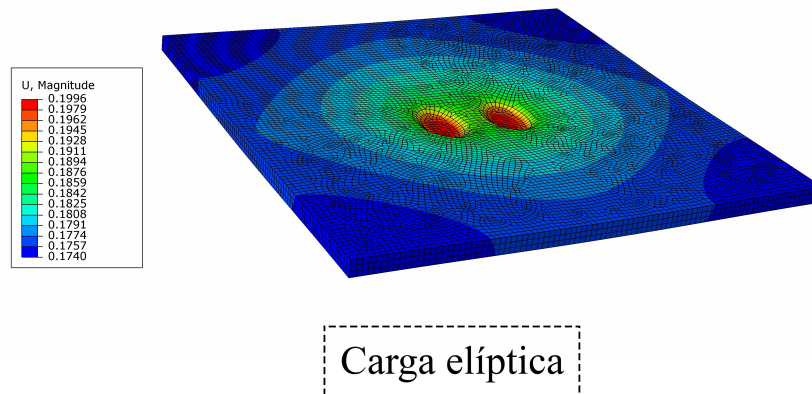
Este item apresenta a validação de dois modelos numéricos, nomeados Modelo I e Modelo II. O primeiro modelo simula as condições do ensaio de Viga Benkelman, cuja principal característica é a aplicação de carregamento estático sobre duas áreas em formato de elipse, representando o pneu de rodas duplas. O Modelo II traz uma avaliação da aplicação de carregamento dinâmico e em formato circular, simulando a placa de carga do FWD.

#### **4.1.1 Modelo I**

Para melhor entendimento e avaliação dos resultados de deflexão obtidos na estrutura completa do pavimento, inicialmente modelou-se a estrutura camada a camada. Foram aplicadas as cargas definidas neste trabalho e os resultados foram avaliados a partir do formato da bacia de deflexão obtido, além da realização de um comparativo entre os valores de deflexão máxima encontrados em detrimento àqueles verificados em ensaios de campo com a Viga Benkelman, no controle de execução da estrutura e deflexões máximas estipuladas em projeto.

Para obtenção da bacia de deflexão a ser avaliada, foram definidos onze pontos de leitura do deslocamento vertical, distantes  $\pm 200$ ,  $\pm 300$ ,  $\pm 450$ ,  $\pm 650$  e  $\pm 900$  milímetros em relação ao ponto de leitura  $L_0$  definido pelo ensaio de Viga Benkelman, além do próprio deslocamento máximo no ponto de prova.

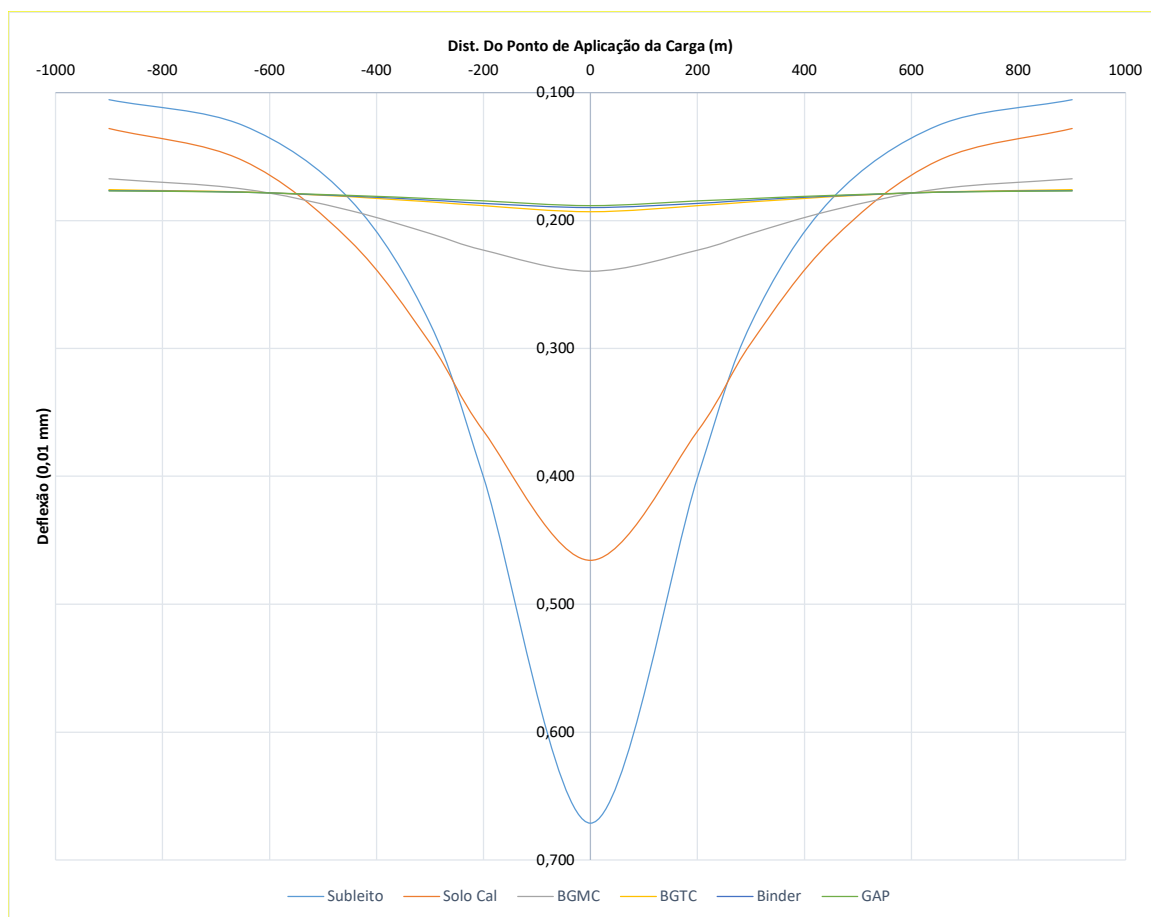
Observa-se na Figura 4.1 a bacia de deflexão no topo do pavimento sob aplicação de carregamento estático, simulando o ensaio de Viga:

**Figura 4.1 - Deflexão sob carregamento estático**

Fonte: Autora (2022)

Diante da influência da malha próximo ao local de aplicação do carregamento, considerou-se malha de 60mm para avaliação da deflexão no modelo contendo apenas a camada de subleito, e modelo contendo subleito e solo cal. As demais simulações seguiram as premissas citadas na metodologia descrita neste trabalho. A Figura 4.2 traz os resultados das bacias de deflexão encontradas após aplicação do carregamento camada a camada:

Figura 4.2 - Bacias de Deflexão



Fonte: Autora (2022)

Com base nestes resultados, observa-se que a medida que as camadas superiores são inseridas ao modelo ocorre uma redução significativa nos valores de deflexão máxima e o aumento expressivo do raio de curvatura das bacias de deflexão. A Tabela 4.1 traz o percentual de redução dos valores de deflexão máxima encontrados:

Tabela 4.1 - Redução das deflexões

| Interface           | Redução da deflexão (%) |
|---------------------|-------------------------|
| Subleito - Solo Cal | 31%                     |
| Solo Cal - BGMC     | 48%                     |
| BGMC - BGTC         | 19%                     |
| BGTC - Binder       | 2%                      |
| Binder - GAP        | 1%                      |

Fonte: Autora (2022)

Os resultados obtidos se mostram bastantes satisfatórios. Pode-se observar que o ponto mais significativo de redução dos valores de deflexão ocorre justamente no momento em que a camada cimentícia de sub-base é inserida ao modelo, ao passo que para as camadas de revestimento constatou-se uma redução inexpressiva nos resultados, o que já era esperado. Esse fato condiz com o comportamento real da estrutura, uma vez que as camadas de base e sub-base possuem função estrutural e tem por objetivo absorver as tensões verticais oriundas do tráfego, mitigando as tensões a serem distribuídas ao subleito.

Um aumento expressivo no valor do raio de curvatura ocorre com a inserção das camadas de base e sub-base, provocando uma nítida suavização da bacia de deflexão (vide Figura 4.2), corroborando para uma distribuição mais uniforme das cargas de tráfego e consequente distribuição de tensões atuantes nas camadas subjacentes.

Ainda, realizou-se um comparativo entre os resultados de deflexão obtidos em relação aos parâmetros de deflexão máxima estipulada em projeto, bem como aos valores de deflexão média no trecho em estudo, obtidos em campo com a utilização da viga Benkelman durante a execução. A Tabela 4.2 traz esse comparativo:

**Tabela 4.2 – Comparativo de Deflexões**

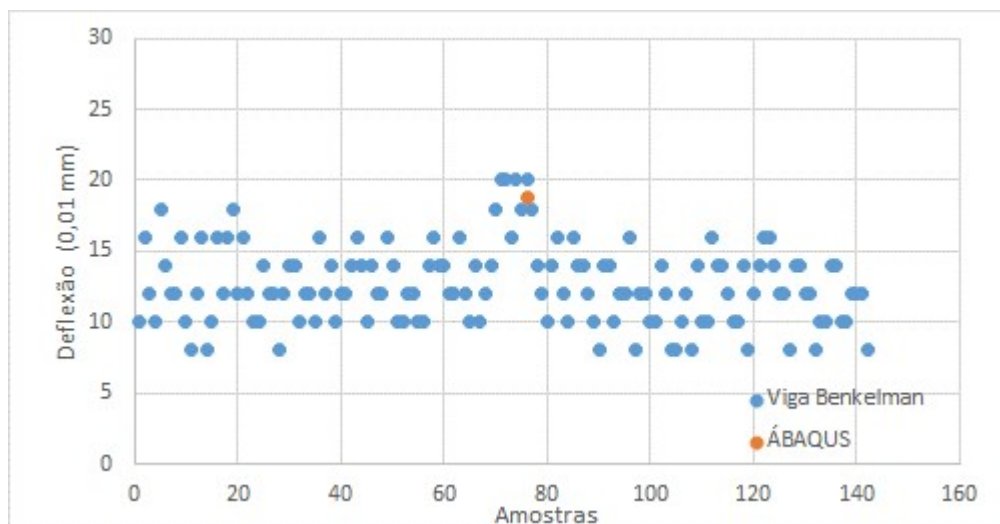
| <b>Camada</b> | <b>Deflexão Máx.<br/>Projeto<br/>(0,01mm)</b> | <b>Deflexão Viga<br/>Benkelman<br/>(0,01mm)</b> | <b>Resultado<br/>ÀBAQUS<br/>(0,01mm)</b> |
|---------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| GAP           | 20                                            | 12,3                                            | 18,8                                     |
| Binder        | 22                                            | 16                                              | 19,0                                     |
| BGTC          | 24                                            | 16,5                                            | 19,3                                     |
| BGMC          | 40                                            | 30,8                                            | 24,0                                     |
| Solo Cal      | 80                                            | 63,1                                            | 46,6                                     |
| Subleito      | -                                             | -                                               | 67,1                                     |

Fonte: Autora (2022)

Ainda, é possível observar que os resultados obtidos no modelo possuem mesma ordem de grandeza daqueles obtidos em campo e preconizados em projeto, e seguem uma proporcionalidade entre si. Para as camadas inferiores, os valores de deflexão obtidos no Software se mostraram menores se comparados aos resultados de campo, ao passo que para as camadas superiores, os deslocamentos verticais foram maiores neste comparativo.

A fim de validar o modelo numérico proposto e diante do alto índice de dispersão dos resultados de campo obtidos com a utilização da Viga Benkelman no segmento, mostrou-se conveniente o demonstrativo da nuvem de pontos da Figura 4.3, a seguir:

**Figura 4.3 Valores de deflexão de campo e modelo numérico**



Fonte: Autora (2022)

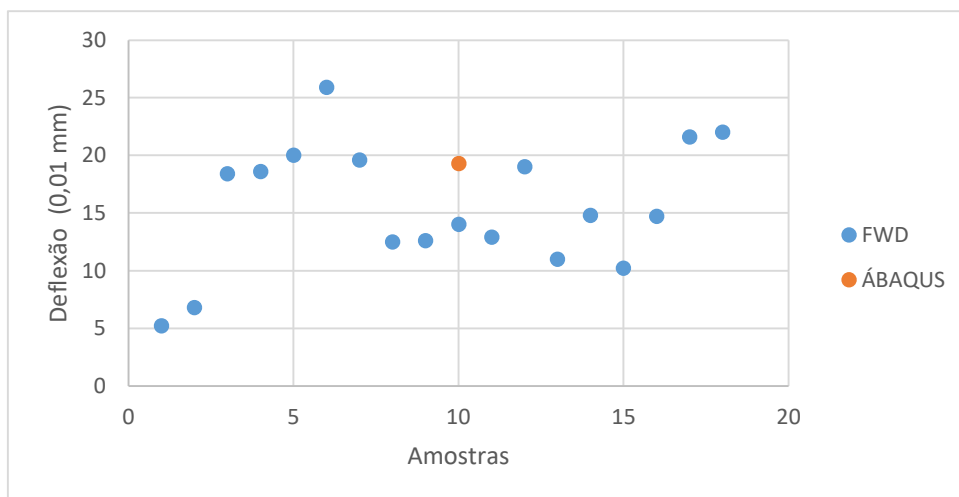
Vale ressaltar que no caso de determinação da deflexão a partir da viga Benkelman, o resultado de deflexão obtido no ponto de prova não se trata do deslocamento máximo no pavimento, que ocorre abaixo do ponto de aplicação da carga. Diante o exposto, observa-se que o valor de deflexão máxima obtida no modelo numérico está inserido na nuvem de pontos dos resultados experimentais, validando assim as premissas adotadas em sua concepção.

#### 4.1.2 Modelo II

Para validação do modelo numérico que simula as respostas estruturais sob aplicação de carregamento dinâmico utilizou-se os dados experimentais de deflexão obtidos em campo com o emprego do FWD. Como descrito neste trabalho, as deflexões com FWD foram determinadas apenas no topo da estrutura do pavimento acabado, após finalização da execução do projeto. Neste ensaio obteve-se a leitura do deslocamento vertical em 7 pontos, distantes +200, +300, +450, +650 e +900 milímetros em relação ao ponto de leitura  $L_0$ , além do ponto de prova, no centro da placa de carga. Como os resultados obtidos em campo com o FWD mostram-se bastante dispersos, é conveniente o demonstrativo da nuvem de pontos da

Figura 4.4, evidenciando que o resultado de deflexão máximo obtido no topo da camada de revestimento no modelo numérico apresenta-se dentro da nuvem de pontos dos dados experimentais, como segue:

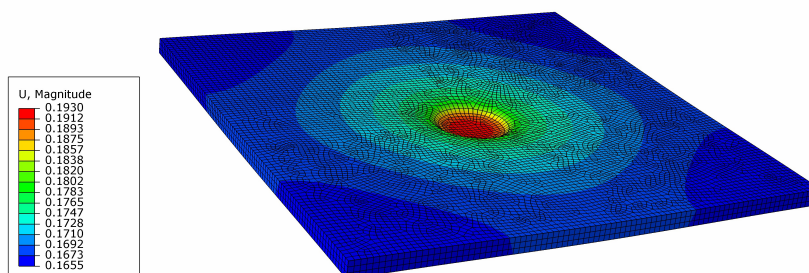
**Figura 4.4 Valores de deflexão de campo e modelo numérico**



Fonte: Autora (2022)

Observa-se na Figura 4.5 a bacia de deflexão no topo do pavimento sob aplicação de carregamento dinâmico, simulando o ensaio de FWD:

**Figura 4.5 Deflexão sob carregamento dinâmico**



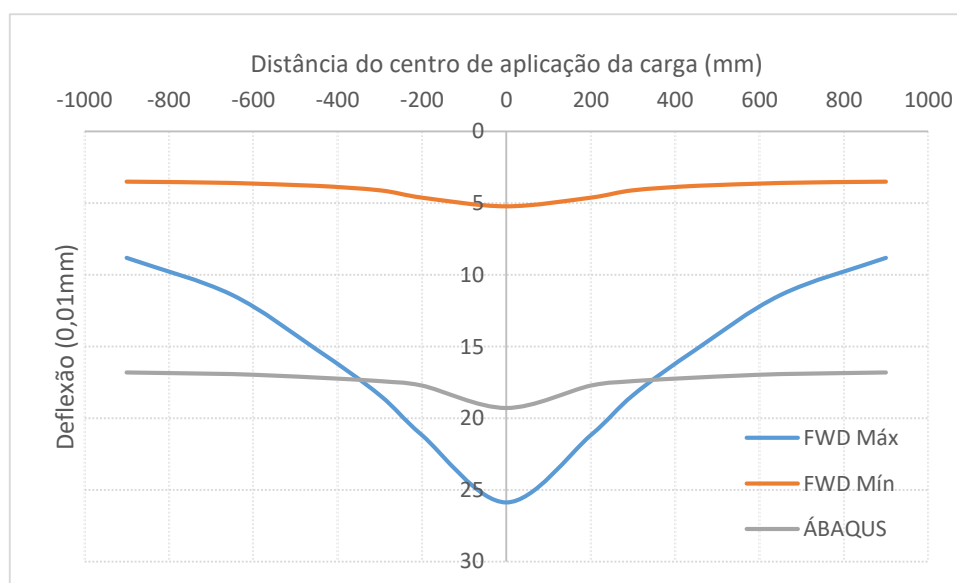
Carga circular

Fonte: Autora (2022)

Ainda, foram avaliadas as bacias de deflexão obtidas em campo em seus valores extremos, máximos e mínimos, e comparadas à bacia de deflexão obtida na análise numérica.

Para isso, foram definidos 13 pontos de leitura do deslocamento vertical no modelo em distâncias análogas às medições com FWD, sendo +/-200, +/-300, +/-450, +/-650 e +/-900 milímetros, além do ponto de leitura  $L_0$ , no centro de aplicação do carregamento circular. A Figura 4.6 traz o comparativo entre as bacias de deflexão obtidas:

**Figura 4.6 Comparativo entre as bacias de deflexão de campo e modelo numérico**



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que a bacia de deflexão obtida no modelo numérico apresenta formato bastante próximo à bacia de deflexão evidenciada no valor mínimo de medição com FWD, concluindo-se que a distribuição dos esforços no modelo simula o comportamento real de forma adequada. Ainda, em se tratando de deflexão máxima no ponto de aplicação do carregamento, os valores obtidos no modelo numérico apresentam-se dentro dos limites obtidos nos valores experimentais. Diante o exposto tem-se a validação do modelo numérico, bem como das premissas adotadas em sua construção.

## 4.2 RESPOSTAS ESTRUTURAIS

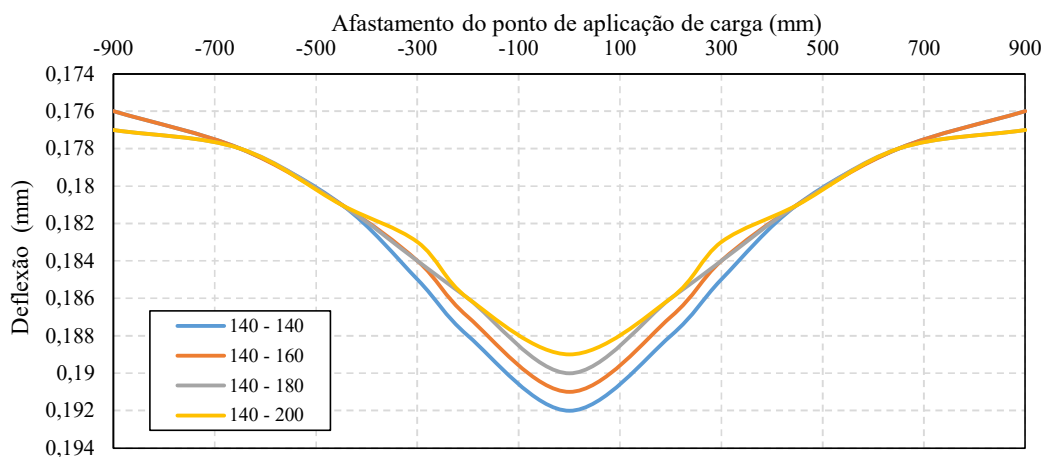
A partir do modelo validado fez-se possível a avaliação das respostas estruturais do pavimento diante da variação de características inerentes ao projeto original. As análises foram aplicadas para os casos de carregamento estático (Modelo I) e dinâmico (Modelo II), utilizando-se os dois modelos validados neste trabalho.

#### 4.2.1 Variação da espessura das camadas de base e sub-base

Neste tópico, avaliam-se as bacias de deflexão no topo da estrutura do pavimento a partir da variação da espessura das camadas de base e sub-base, BGTC e BGMC, respectivamente. Foram adotados os valores de 14, 16, 18 e 20cm, e os resultados obtidos foram comparados à estrutura do projeto inicial, em que ambas as camadas apresentam 18cm de espessura.

A seguir demonstram-se os resultados das análises considerando as variações de espessura descritas aplicadas ao Modelo I. A Figura 4.7 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 14 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. Observa-se que a medida que a camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem, corroborando com o comportamento esperado. Ainda, à distância média de +/-400mm em relação à aplicação do carregamento as bacias se cruzam, apresentando valores de deflexão análogos para os casos avaliados. Após este ponto os valores de deflexão passam a ser menores à medida que a espessura da camada de BGMC diminui.

**Figura 4.7 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 14 cm para o Modelo I**

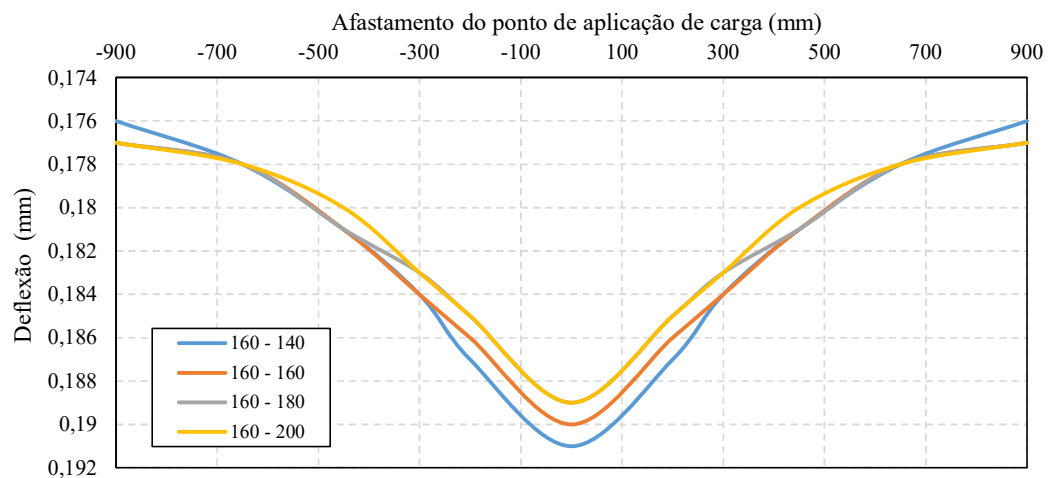


Fonte: Autora (2022)

Um comportamento similar se revela nas demais análises. A Figura 4.8 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 16 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. Do mesmo modo, à medida que a

camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem. Neste caso, no entanto, não há um ponto comum em que as bacias de deflexão se encontrem. Vale destacar, ainda, que para os casos de espessura da camada de sub-base de 18 e 20 cm as deflexões próximas à área carregada são iguais, apresentando variação à distância média de  $\pm 330\text{mm}$  do ponto de prova.

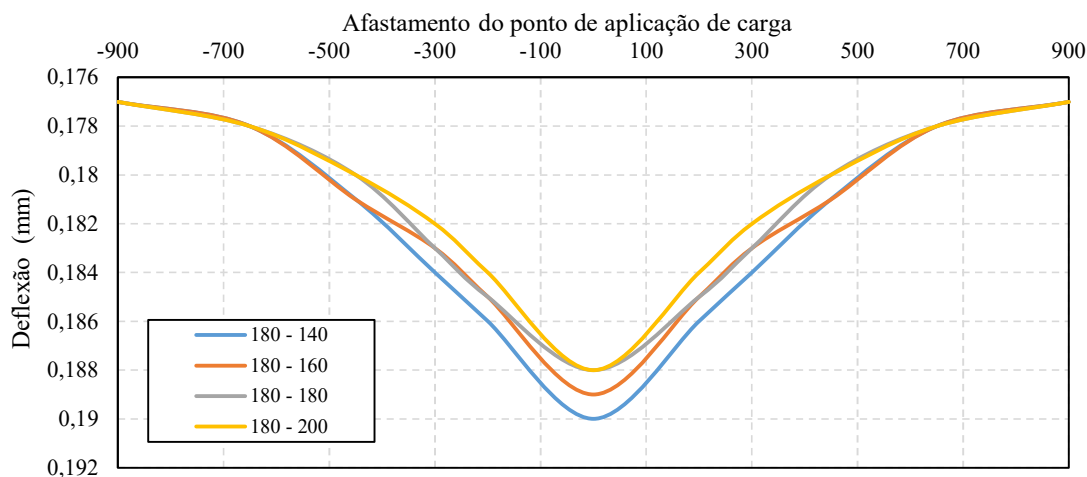
**Figura 4.8 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 16 cm para o Modelo I**



Fonte: Autora (2022)

A Figura 4.9 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 18 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. Como descrito nos casos anteriores, o comportamento esperado se mantém: à medida que a camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem. Ainda, à distância média de  $\pm 650\text{mm}$  em relação à aplicação do carregamento o deslocamento vertical é o mesmo para todos os casos.

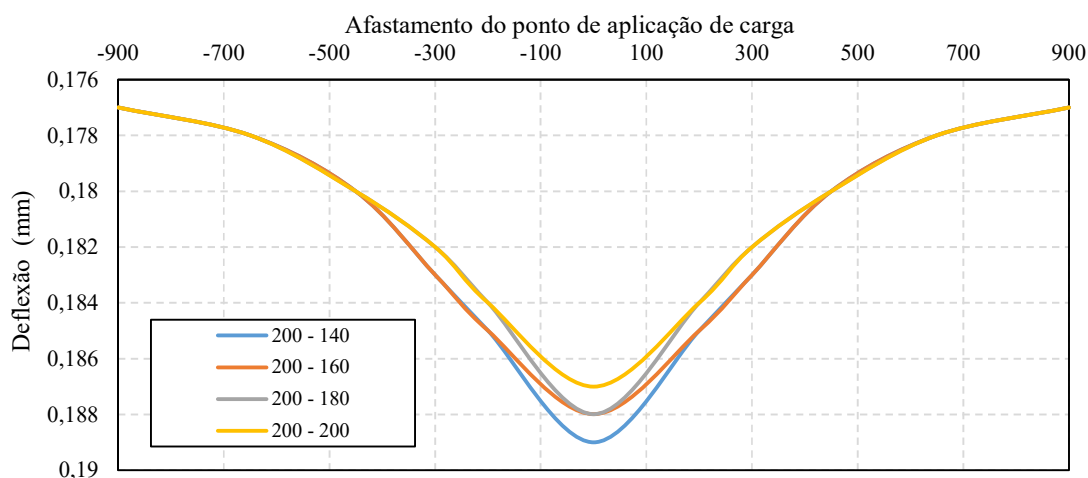
**Figura 4.9 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 18 cm para o Modelo I**



Fonte: Autora (2022)

Por fim, a Figura 4.10 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 20 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. A estrutura mais robusta apresenta os menores valores de deflexão e destaca-se que a distância média de  $\pm 450$  mm em relação à aplicação do carregamento as bacias de deflexão se sobrepõe, seguindo este comportamento até o último ponto avaliado ( $\pm 900$  mm).

**Figura 4.10 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 20 cm para o Modelo I**



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 4.3 apresenta as diferenças percentuais entre as deflexões máximas obtidas com a variação das espessuras e a deflexão máxima considerando a estrutura de projeto:

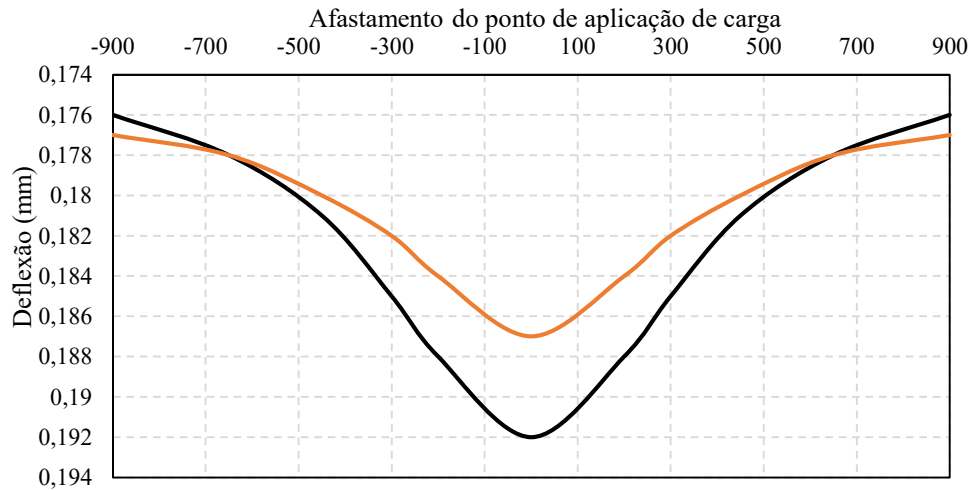
**Tabela 4.3 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo I**

| <b>Esp. BGTC (mm)</b> | <b>Esp.BGMC (mm)</b> | <b>Dif(%) Projeto</b> |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 140                   | 140                  | 2,13%                 |
| 140                   | 160                  | 1,60%                 |
| 140                   | 180                  | 1,06%                 |
| 140                   | 200                  | 0,53%                 |
| 160                   | 140                  | 1,60%                 |
| 160                   | 160                  | 1,06%                 |
| 160                   | 180                  | 0,53%                 |
| 160                   | 200                  | 0,53%                 |
| 180                   | 140                  | 1,06%                 |
| 180                   | 160                  | 0,53%                 |
| 180                   | 180                  | 0,00%                 |
| 180                   | 200                  | 0,00%                 |
| 200                   | 140                  | 0,53%                 |
| 200                   | 160                  | 0,00%                 |
| 200                   | 180                  | 0,00%                 |
| 200                   | 200                  | -0,53%                |

Fonte: Autora (2022)

Na avaliação geral, observa-se que as diferenças percentuais não se mostram significativas, apresentando no caso mais crítico o valor de 2,13% de aumento de deflexão, que ocorre para o caso da estrutura menos robusta em que as camadas de BGMC e BGTC possuem 14cm. Ainda, a diferença percentual entre os extremos (espessuras de 14 e 20cm para ambas as camadas), não possui grande relevância, apresentando 2,67%, e evidenciado na Figura 4.11:

**Figura 4.11 Comparativo entre extremos: deflexões considerando camadas de base e sub base com 14 e 20cm**

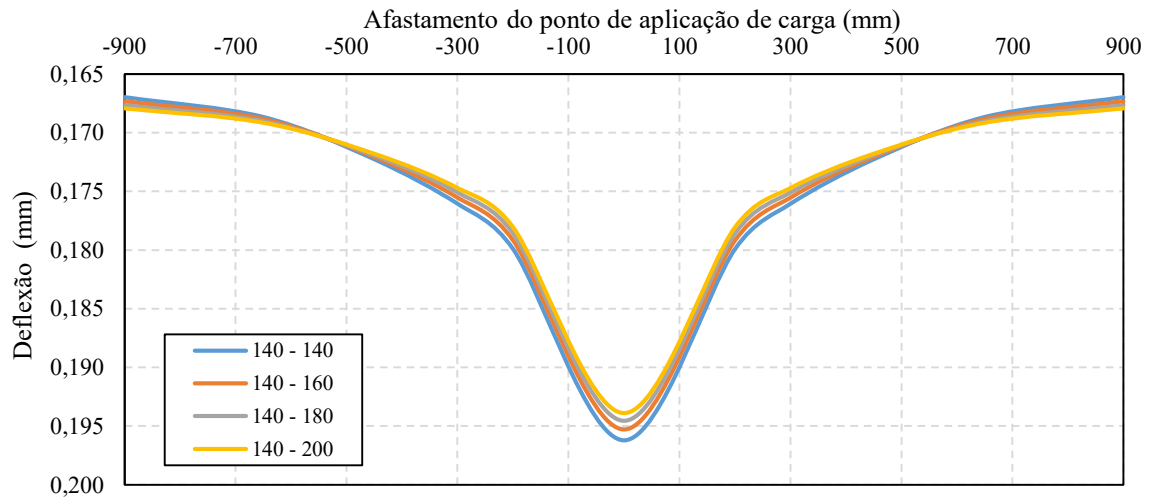


Fonte: Autora (2022)

Destaca-se que em todos os casos o deslocamento no topo do pavimento não superou os limites máximos definidos em projeto.

A seguir demonstram-se os resultados das análises considerando as variações de espessura descritas aplicadas ao Modelo II, de análise dinâmica. A Figura 4.12 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 14 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. Nota-se que à medida que a camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem, corroborando com o comportamento esperado. De forma análoga às análises do Modelo I, observa-se que à distância média de  $\pm 550$  mm em relação à aplicação do carregamento as bacias se cruzam, apresentando valores idênticos de deflexão para os casos avaliados. Após este ponto os valores de deflexão passam a ser menores à medida que a espessura da camada de BGMC diminui.

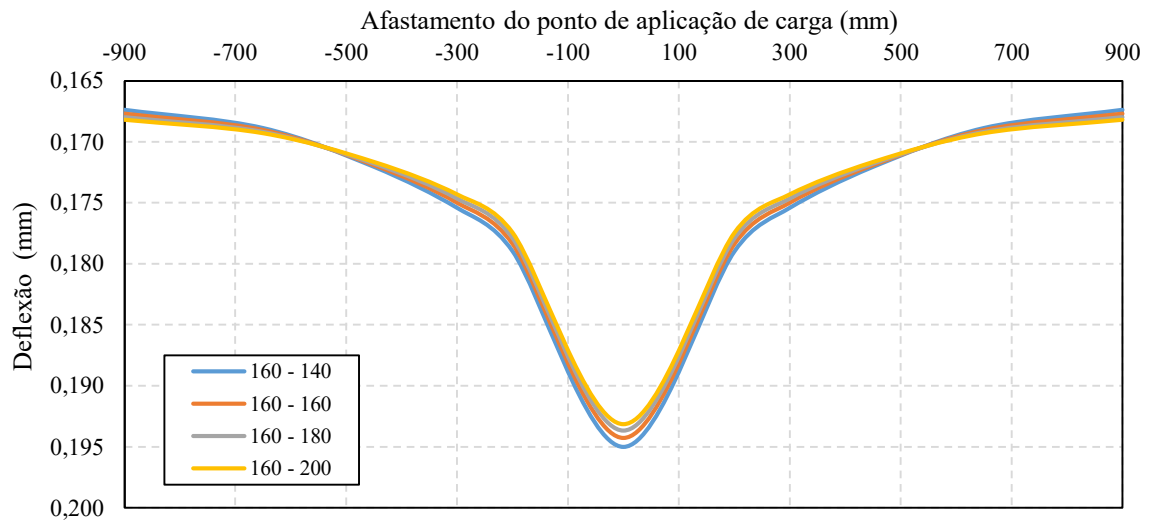
**Figura 4.12 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 14 cm para o Modelo II**



Fonte: Autora (2022)

Um comportamento similar se revela nas demais análises. A Figura 4.13 traz os resultados das bacias de deflexão considerando espessura fixa de 16 cm para a camada de BGTC e variando-se a espessura da camada de BGMC. Do mesmo modo, à medida que a camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem. Como no caso anterior, à distância média de +/-550mm em relação à aplicação do carregamento as bacias se cruzam, apresentando valores idênticos de deflexão para os casos avaliados.

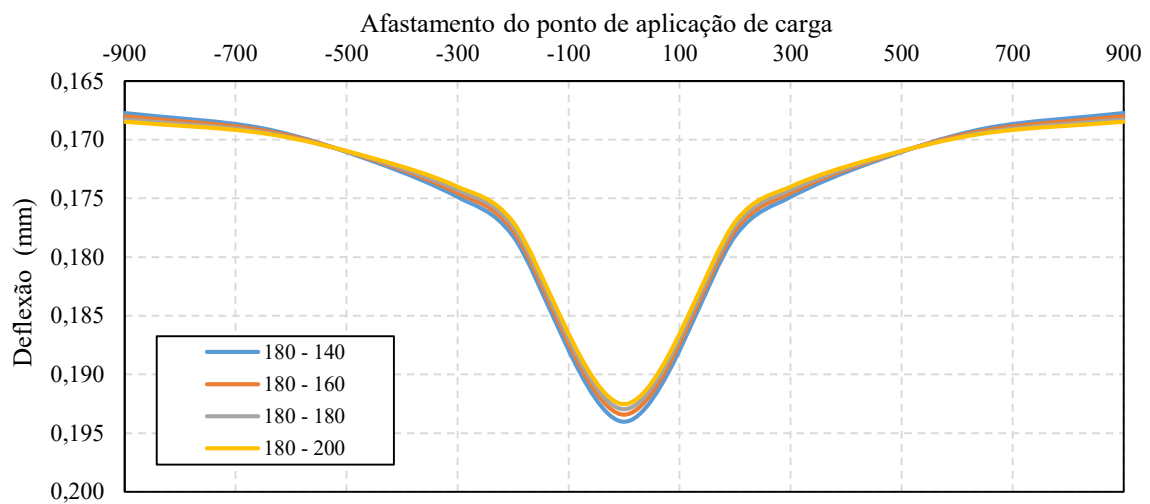
**Figura 4.13 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 16 cm para o Modelo II**



Fonte: Autora (2022)

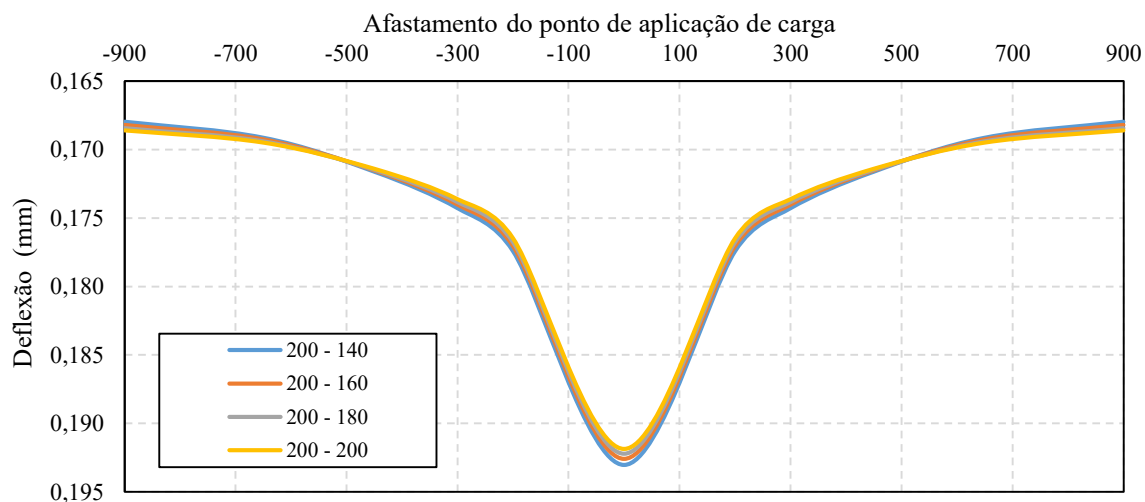
Outro fato interessante é observado ao longo das análises do Modelo II: à medida que a camada de BGTC torna-se mais robusta, os valores de deflexão máxima aproximam-se, mostrando menor influência das variações de espessura da camada de sub-base nos valores de deslocamento vertical. Este contexto pode ser notado na Figura 4.14 e Figura 4.15:

**Figura 4.14 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 18 cm para o Modelo II**



Fonte: Autora (2022)

**Figura 4.15 Deflexões considerando camada de BGTC com espessura de 20 cm para o Modelo II**



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 4.4 apresenta as diferenças percentuais entre as deflexões máximas obtidas com a variação das espessuras e a deflexão máxima considerando a estrutura de projeto:

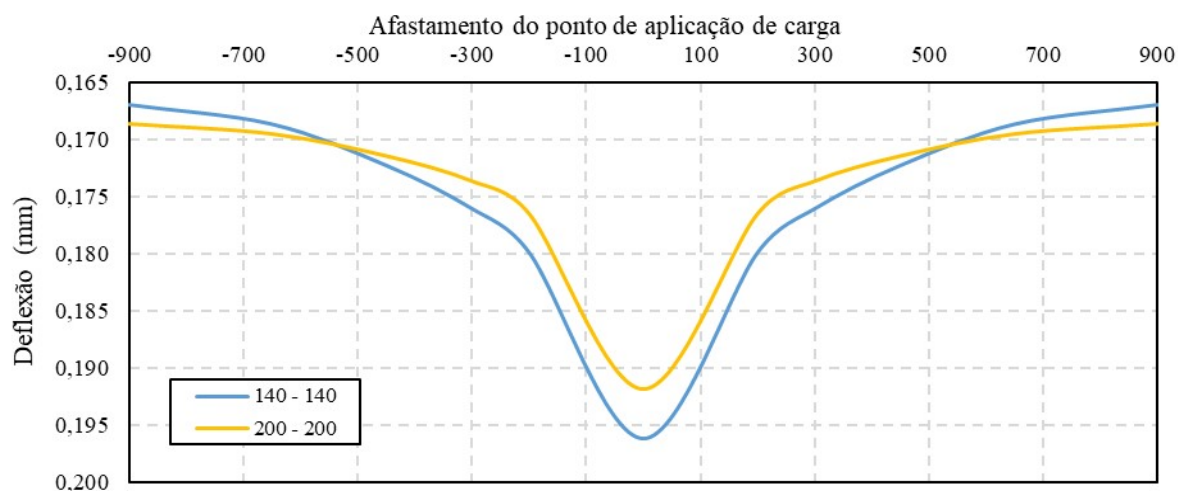
**Tabela 4.4 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo II**

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | Dif(%) Projeto |
|----------------|---------------|----------------|
| 140            | 140           | 1,69%          |
| 140            | 160           | 1,22%          |
| 140            | 180           | 0,82%          |
| 140            | 200           | 0,48%          |
| 160            | 140           | 1,07%          |
| 160            | 160           | 0,68%          |
| 160            | 180           | 0,37%          |
| 160            | 200           | 0,09%          |
| 180            | 140           | 0,55%          |
| 180            | 160           | 0,25%          |
| 180            | 180           | 0,00%          |
| 180            | 200           | -0,23%         |
| 200            | 140           | 0,04%          |
| 200            | 160           | -0,19%         |
| 200            | 180           | -0,39%         |
| 200            | 200           | -0,57%         |

Fonte: Autora (2022)

Nota-se que a maior diferença percentual é de 1,69% acima da deflexão da estrutura de projeto e ocorre para a estrutura em que as camadas de BGMC e BGTC possuem 14cm. Observa-se que esta diferença é menor que no caso de análise estática – Modelo I. Ainda, a diferença percentual entre os extremos (espessuras de 14 e 20cm para ambas as camadas) também não se mostra significativa, apresentando 2,27%, caso demonstrado na Figura 4.16:

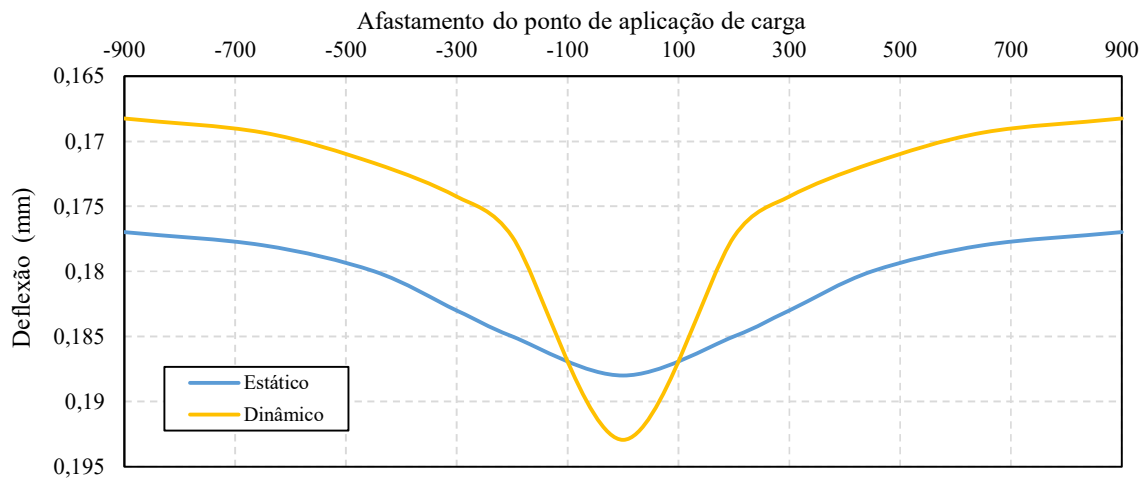
**Figura 4.16 Deflexões considerando camadas de base e sub base com 14 e 20cm.**



Fonte: Autora (2022)

Ressalta-se que os resultados obtidos não superaram os limites definidos em projeto em nenhum dos casos.

Outra análise importante se dá no comparativo entre os modelos I e II. Neste contexto, observa-se que os valores de deflexão máxima obtidos apresentam diferença percentual pouco significativa, na ordem de 2,58% se considerado a estrutura de projeto. No entanto, o formato da bacia de deflexão se altera significativamente em todos os casos. A Figura 4.17 traz este comparativo:

**Figura 4.17 Comparativo entre o formato da bacia de deflexão para os Modelos I e II**

Fonte: Autora (2022)

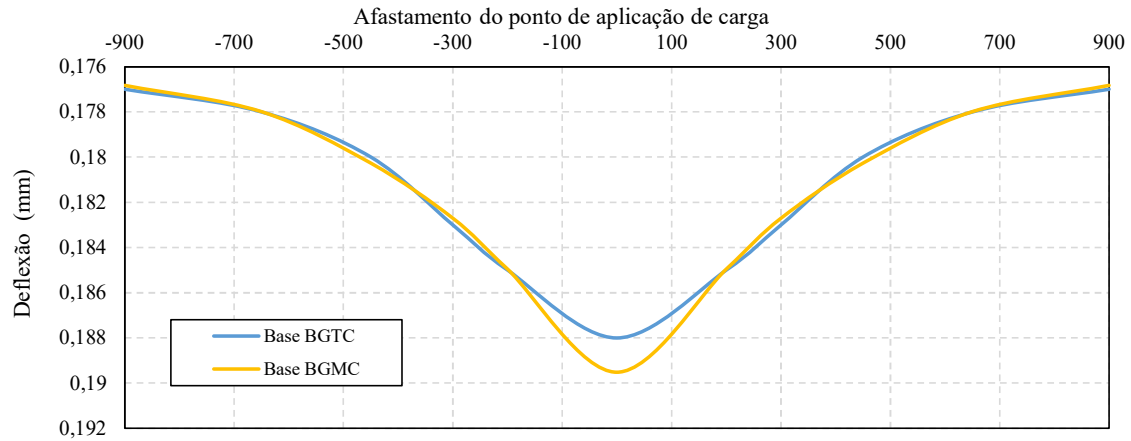
Para o modelo I, de análise e carregamento estático, a bacia de deflexão apresenta-se mais suave, com raio de curvatura maior em detrimento ao caso dinâmico. No modelo II, nota-se a ocorrência da concentração das deflexões de maior magnitude próximas ao carregamento.

#### 4.2.2 Inversão das camadas de base e sub-base

Neste item, avaliam-se as bacias de deflexão no topo da estrutura do pavimento a partir da inversão das camadas de base e sub-base. Neste caso, a camada de BGMC passa a atuar como camada de base da estrutura do pavimento, enquanto a camada de BGTC é adotada como camada de sub-base. Apresenta-se a seguir o comparativo entre os resultados de deslocamento vertical obtidos nos modelos I e II em relação à estrutura do projeto inicial.

A Figura 4.18 demonstra a bacia de deflexão obtida no Modelo I, considerando estrutura de projeto, e comparada ao caso em que a camada de BGMC é considerada base do pavimento:

**Figura 4.18 Comparativo entre deflexões considerando a inversão das camadas de base e sub-base para o Modelo I**



Fonte: Autora (2022)

Neste caso, a deflexão considerando a camada de BGMC como camada de base na estrutura do pavimento é 0,81% maior se comparado à estrutura original, em que a camada de BGTC é camada de base. Conclui-se, portanto, que o comportamento nos dois casos é bastante similar, e não há ganhos significativos relacionados à deflexão.

Em segundo momento variou-se as espessuras das camadas de base e sub-base, nos valores de 14, 16, 18 e 20cm. A Tabela 4.5 traz o comparativo das diferenças percentuais entre as deflexões obtidas e a deflexão da estrutura de projeto:

**Tabela 4.5 – Diferenças percentuais de deflexão máxima em relação à estrutura de projeto para o Modelo I no caso de inversão de camadas**

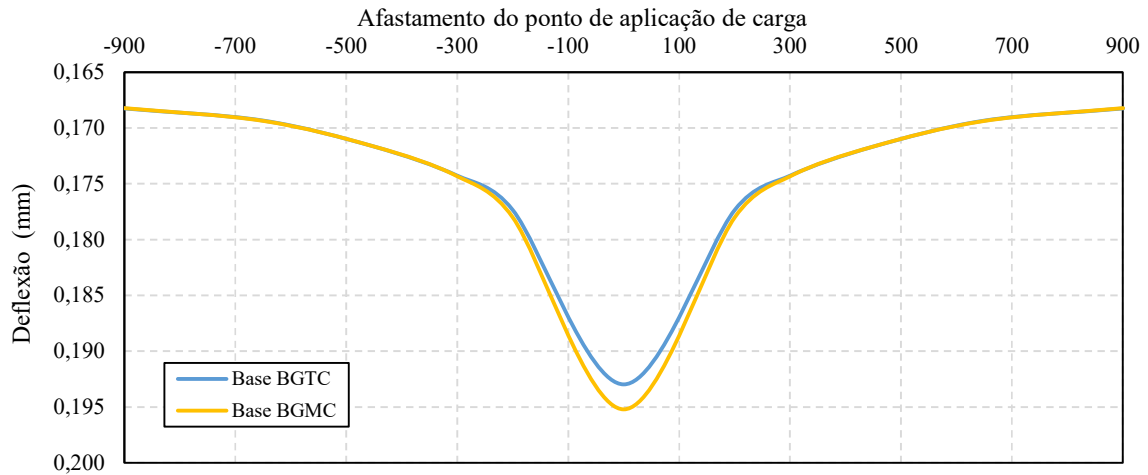
| Esp.BGMC (mm) | Esp.BGTC (mm) | Dif(%) Projeto |
|---------------|---------------|----------------|
| 140           | 140           | 2,50%          |
| 140           | 160           | 2,01%          |
| 140           | 180           | 1,61%          |
| 140           | 200           | 1,28%          |
| 160           | 140           | 1,88%          |
| 160           | 160           | 1,50%          |
| 160           | 180           | 1,17%          |
| 160           | 200           | 0,91%          |
| 180           | 140           | 1,37%          |
| 180           | 160           | 1,06%          |
| 180           | 180           | 0,81%          |
| 180           | 200           | 0,60%          |
| 200           | 140           | 0,91%          |
| 200           | 160           | 0,67%          |
| 200           | 180           | 0,48%          |
| 200           | 200           | 0,31%          |

Fonte: Autora (2022)

Observa-se que os valores encontrados são muito similares aos resultados já apresentados neste trabalho, em que a camada de BGMC é sub-base da estrutura do pavimento. Assim como no caso da estrutura do projeto inicial, a variação de espessura das camadas de BGTC e BGMC não apresentou influências significativas nos valores de deflexão encontrados.

A Figura 4.19 demonstra a bacia de deflexão obtida no Modelo II, considerando estrutura de projeto, e comparada ao caso em que a camada de BGMC é considerada base do pavimento:

**Figura 4.19 Comparativo entre deflexões considerando a inversão das camadas de base e sub-base para o Modelo II**



Fonte: Autora (2022)

No caso de análise dinâmica, observa-se que a diferença entre os deslocamentos verticais é um pouco maior se comparada ao Modelo I, com 1,17% de aumento no valor da deflexão para o caso de BGMC como camada de base da estrutura.

Em segundo momento variou-se as espessuras das camadas de base e sub-base para o Modelo II, nos valores de 14, 16, 18 e 20cm. A Tabela 4.6 traz o comparativo das diferenças percentuais entre as deflexões obtidas com a variação de espessura das camadas de base e sub-base e a deflexão da estrutura de projeto:

**Tabela 4.6 – Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto**

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | Dif(%) Projeto |
|----------------|---------------|----------------|
| 140            | 140           | 2,46%          |
| 140            | 160           | 2,11%          |
| 140            | 180           | 1,82%          |
| 140            | 200           | 1,53%          |
| 160            | 140           | 1,94%          |
| 160            | 160           | 1,68%          |
| 160            | 180           | 1,46%          |
| 160            | 200           | 1,23%          |
| 180            | 140           | 1,52%          |
| 180            | 160           | 1,32%          |
| 180            | 180           | 1,17%          |
| 180            | 200           | 0,98%          |
| 200            | 140           | 1,13%          |
| 200            | 160           | 1,00%          |
| 200            | 180           | 0,89%          |
| 200            | 200           | 0,75%          |

Fonte: Autora (2022)

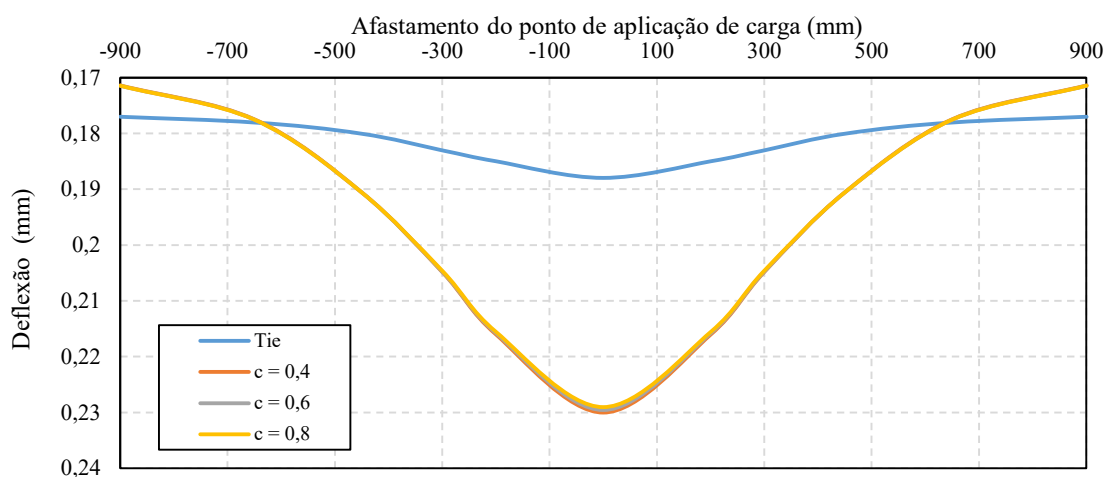
Em suma, os deslocamentos verticais obtidos nos Modelos I e II apresentam-se muito próximos entre si, quando considerada a inversão das camadas de base e sub-base e variação das espessuras. Ainda, observa-se que os valores encontrados são muito similares aos resultados já apresentados neste trabalho, em que a camada de BGMC é sub-base da estrutura do pavimento. Assim como no caso da estrutura do projeto inicial, a variação de espessura das camadas de BGTC e BGMC não apresentou influências significativas nos valores de deflexão encontrados.

#### **4.2.3 Variação das condições de aderência entre as camadas e espessura das camadas de base e sub-base**

Este tópico traz os resultados das análises de deflexão no topo do pavimento a partir da variação da condição de aderência entre as camadas. Para a validação do modelo, a opção de contato *Tie Constraint* foi considerada, a fim de simular uma condição de estrutura monolítica, premissa esta adotada em projeto. No entanto, na estrutura real do pavimento, esta condição idealizada é dificilmente alcançada. Deste modo, a fim de simular uma condição parcial de aderência, utilizou-se o modelo Coulomb a partir da variação do coeficiente de atrito entre as camadas em 0,4, 0,6 e 0,8.

A Figura 4.20 apresenta os resultados desta avaliação considerando aderência completa e parcial, aplicada ao Modelo I para o caso da estrutura de projeto inicial:

**Figura 4.20 Comparativo considerando aderência completa e parcial para o Modelo I**



Fonte: Autora (2022)

Nota-se que ocorre um aumento significativo nos valores de deflexão a partir da consideração de aderência parcial entre as camadas. A Tabela 4.7 a seguir traz as diferenças percentuais dos valores de deflexão obtidos em relação à condição de aderência completa entre as camadas, obtida com o emprego da opção de contato *Tie Constraint*:

**Tabela 4.7 – Diferenças percentuais em relação à condição de aderência completa**

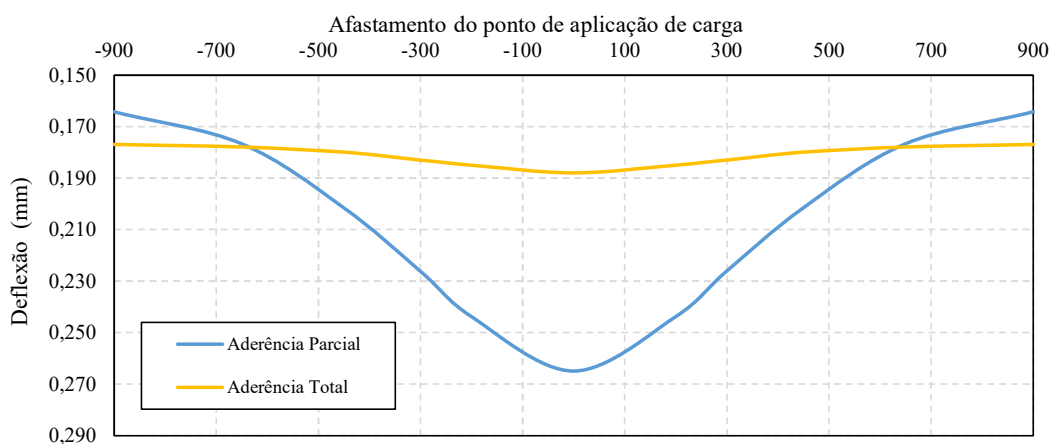
| Coef. Atrito | Dif. Projeto (%) |
|--------------|------------------|
| 0,4          | 22,36%           |
| 0,6          | 22,10%           |
| 0,8          | 21,84%           |

Fonte: Autora (2022)

Os valores encontrados são bastante relevantes, observando-se um aumento de deflexão de 22,36% para o caso de coeficiente de atrito igual a 0,4. No entanto, destaca-se que se restringindo aos casos de aderência parcial, não há variação significativa com a alteração do coeficiente de atrito, onde obteve-se variação menor que 1% entre os casos extremos, com coeficiente de atrito 0,4 e 0,8.

Em um segundo momento, avaliou-se ainda a influência da variação da espessura das camadas de base e sub-base, aplicado aos casos de aderência parcial entre as camadas. Diverso do caso de aderência completa, em que os valores de deflexão apresentaram diferença percentual máxima de 2,13% em relação à estrutura de projeto, no caso de aderência parcial estes valores foram significativamente maiores com a variação da espessura. O valor menos favorável ocorre para o Modelo I, considerando coeficiente de atrito 0,4 e espessura das camadas de 14 cm, chegando a 40,93% de aumento do deslocamento vertical no topo do pavimento. Este resultado é apresentado na Figura 4.21:

**Figura 4.21 Diferença Máxima de 40,93% no Modelo I para o caso de  $C=0,4$**



Fonte: Autora (2022)

A seguir são apresentados os comparativos entre as deflexões obtidas com a variação da espessura das camadas de base e sub-base considerando condição de aderência parcial, em detrimento à deflexão da estrutura de projeto em condição de aderência total. Esta análise foi realizada para os casos de coeficiente de atrito igual a 0,4, 0,6 e 0,8.

A Tabela 4.8 apresenta as diferenças percentuais dos valores de deslocamento vertical máximo no ponto de prova em relação à estrutura de projeto, considerando variação da espessura das camadas de base e sub-base e coeficiente de atrito igual a 0,4:

**Tabela 4.8 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando  $C=0,4$  para o Modelo I**

| <b>Esp. BGTC (mm)</b> | <b>Esp.BGMC (mm)</b> | <b>Dif(%) Projeto</b> |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 140                   | 140                  | 40,93%                |
| 140                   | 160                  | 36,37%                |
| 140                   | 180                  | 31,90%                |
| 140                   | 200                  | 25,71%                |
| 160                   | 140                  | 33,24%                |
| 160                   | 160                  | 30,11%                |
| 160                   | 180                  | 26,91%                |
| 160                   | 200                  | 22,23%                |
| 180                   | 140                  | 26,73%                |
| 180                   | 160                  | 24,60%                |
| 180                   | 180                  | 22,36%                |
| 180                   | 200                  | 18,91%                |
| 200                   | 140                  | 19,16%                |
| 200                   | 160                  | 17,98%                |
| 200                   | 180                  | 16,67%                |
| 200                   | 200                  | 14,55%                |

Fonte: Autora (2022)

Como exposto, observa-se a ocorrência do aumento significativo nos valores de deflexão no topo do pavimento em todos os casos avaliados. Ainda, é possível concluir que no caso de aderência parcial entre as camadas, a variação da espessura das camadas de base e sub-base, em quaisquer dimensões, afeta consideravelmente os valores de deslocamento vertical.

A Tabela 4.9 apresenta as diferenças percentuais dos valores de deslocamento vertical no ponto de prova em relação à estrutura de projeto, considerando variação da espessura das camadas de base e sub-base e coeficiente de atrito igual a 0,6:

**Tabela 4.9 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando  $C=0,6$  para o Modelo I**

| <b>Esp. BGTC (mm)</b> | <b>Esp.BGMC (mm)</b> | <b>Dif(%) Projeto</b> |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 140                   | 140                  | 40,33%                |
| 140                   | 160                  | 35,87%                |
| 140                   | 180                  | 31,49%                |
| 140                   | 200                  | 25,40%                |
| 160                   | 140                  | 32,80%                |
| 160                   | 160                  | 29,72%                |
| 160                   | 180                  | 26,57%                |
| 160                   | 200                  | 21,97%                |
| 180                   | 140                  | 26,40%                |
| 180                   | 160                  | 24,30%                |
| 180                   | 180                  | 22,10%                |
| 180                   | 200                  | 18,70%                |
| 200                   | 140                  | 18,96%                |
| 200                   | 160                  | 17,78%                |
| 200                   | 180                  | 16,50%                |
| 200                   | 200                  | 14,40%                |

Fonte: Autora (2022)

Como no caso anterior, a variação da espessura das camadas de BGMC e BGTC exerce grande influência nos valores de deflexão máxima no topo da estrutura. Quanto mais robusta a estrutura, menores os valores de deslocamento vertical encontrados, chegando a diferenças percentuais de 22,67% entre os extremos – casos de 14cm e 20cm para as duas camadas. No entanto, destaca-se que estes percentuais são muito próximos aos resultados encontrados para o caso de coeficiente de atrito igual a 0,4, demonstrando que a alteração deste parâmetro não resulta em variações significativas.

A Tabela 4.10 apresenta as diferenças percentuais dos valores de deslocamento vertical máximos em relação à estrutura de projeto, considerando variação da espessura das camadas de base e sub-base e coeficiente de atrito igual a 0,8:

Tabela 4.10 Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto considerando

C=0,8 para o Modelo I

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | Dif(%) Projeto |
|----------------|---------------|----------------|
| 140            | 140           | 39,78%         |
| 140            | 160           | 35,39%         |
| 140            | 180           | 31,09%         |
| 140            | 200           | 25,11%         |
| 160            | 140           | 32,38%         |
| 160            | 160           | 29,35%         |
| 160            | 180           | 26,25%         |
| 160            | 200           | 21,73%         |
| 180            | 140           | 26,09%         |
| 180            | 160           | 24,02%         |
| 180            | 180           | 21,84%         |
| 180            | 200           | 18,49%         |
| 200            | 140           | 18,76%         |
| 200            | 160           | 17,60%         |
| 200            | 180           | 16,33%         |
| 200            | 200           | 14,25%         |

Fonte: Autora (2022)

Analogamente aos casos anteriores, observa-se o aumento significativo nos valores de deflexão no topo do pavimento considerando aderência parcial com coeficiente de atrito igual a 0,8. A variação da espessura das camadas de base e sub-base exercem forte influência neste caso, chegando a diferenças percentuais de 22,34% nos valores de deslocamento vertical.

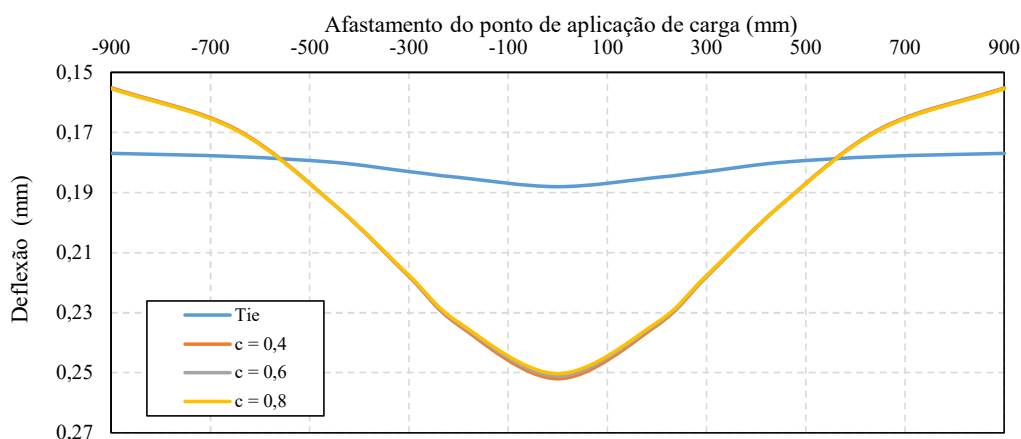
Em suma, os três casos avaliados apresentaram resultados similares no comparativo em relação à estrutura de projeto.

#### 4.2.4 Variação das condições de aderência entre as camadas, inversão das camadas de base e sub-base e variação da espessura das camadas de base e sub-base

Seguindo a avaliação para os casos de aderência parcial, avaliou-se o efeito da inversão das camadas de base e sub-base, em que a camada de BGMC passa a atuar como base na estrutura do pavimento. Neste contexto, observou-se uma diferença percentual nos valores de deflexão ainda maior que a constatada na análise anterior, em que a camada de BGTC atua como base.

A Figura 4.22 apresenta os resultados desta avaliação para o modelo I e compara os casos de aderência completa e parcial, considerando as espessuras de projeto inicial e camada de BGMC como base da estrutura:

**Figura 4.22 Comparativo considerando aderência completa e parcial para o Modelo I – Base de BGMC**



Fonte: Autora (2022)

Nota-se que ocorre um aumento significativo nos valores de deflexão a partir da consideração de aderência parcial entre as camadas. A Tabela 4.11 a seguir traz as diferenças percentuais dos valores de deflexão obtidos em relação à condição de aderência completa entre as camadas, obtida com o emprego da opção de contato *Tie Constraint*:

**Tabela 4.11 – Diferenças percentuais em relação à condição de aderência completa – Base de BGMC**

| Coef. Atrito | Dif. Projeto (%) |
|--------------|------------------|
| 0,4          | 34,04%           |
| 0,6          | 33,56%           |
| 0,8          | 33,11%           |

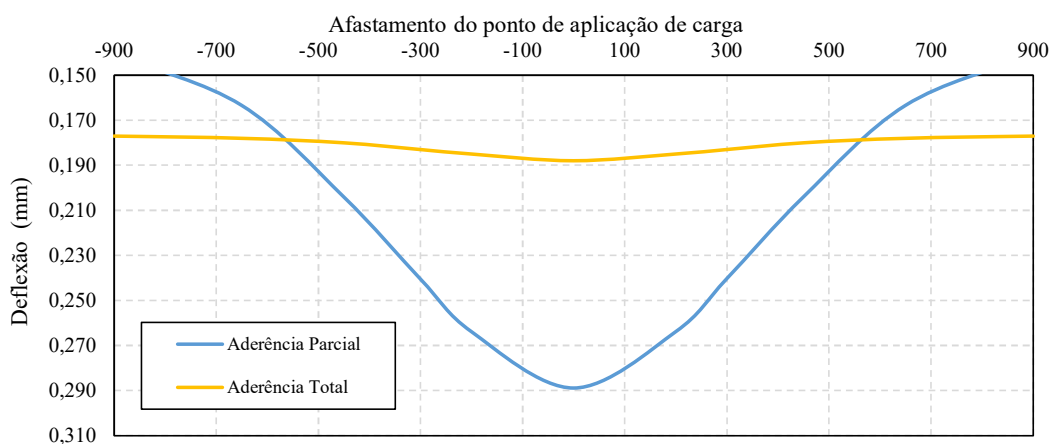
Fonte: Autora (2022)

Os valores encontrados são bastante relevantes, observando-se um aumento de deflexão de até 34,04% para o caso de coeficiente de atrito igual a 0,4. Ainda, analogamente às análises anteriores, destaca-se que se restringindo aos casos de aderência parcial, não há

variação significativa com a alteração do coeficiente de atrito, onde obteve-se variação menor que 1% entre os casos extremos, com coeficiente de atrito 0,4 e 0,8.

Em segundo momento, avaliou-se ainda a influência da variação da espessura das camadas de base e sub-base, aplicado aos casos de aderência parcial entre as camadas. Destaca-se que os valores de deslocamento vertical foram surpreendentemente afetados pela variação de espessura, atingindo 53,65% de aumento da deflexão para o caso menos favorável, considerando coeficiente de atrito 0,4 e espessura das camadas de 14 cm. Este resultado é apresentado na Figura 4.23:

**Figura 4.23 Comparativo entre aderência completa e parcial no caso crítico  $C=0,4$**



Fonte: Autora (2022)

A seguir são apresentados os comparativos entre as deflexões obtidas com a variação da espessura das camadas de base e sub-base considerando condição de aderência parcial e base de BGMC, em detrimento à deflexão da estrutura de projeto em condição de aderência completa. Esta análise foi realizada para os casos de coeficiente de atrito igual a 0,4, 0,6 e 0,8.

A Tabela 4.12 apresenta as diferenças percentuais dos valores de deslocamento vertical máximo no ponto de prova em relação à estrutura de projeto:

**Tabela 4.12 - Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto para o Modelo I – Base de BGMC**

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | C=0,4  | C=0,6  | C=0,8  |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|
| 140            | 140           | 53,65% | 52,77% | 51,94% |
| 140            | 160           | 48,81% | 48,02% | 47,27% |
| 140            | 180           | 43,87% | 43,17% | 42,52% |
| 140            | 200           | 36,71% | 36,17% | 35,66% |
| 160            | 140           | 46,17% | 45,48% | 44,82% |
| 160            | 160           | 42,63% | 41,98% | 41,38% |
| 160            | 180           | 38,86% | 38,28% | 37,73% |
| 160            | 200           | 33,14% | 32,67% | 32,23% |
| 180            | 140           | 39,40% | 38,85% | 38,33% |
| 180            | 160           | 36,84% | 36,32% | 35,84% |
| 180            | 180           | 34,04% | 33,56% | 33,11% |
| 180            | 200           | 29,57% | 29,17% | 28,79% |
| 200            | 140           | 30,62% | 30,24% | 29,89% |
| 200            | 160           | 29,08% | 28,72% | 28,37% |
| 200            | 180           | 27,32% | 26,97% | 26,65% |
| 200            | 200           | 24,38% | 24,08% | 23,79% |

Fonte: Autora (2022)

Como exposto, observa-se a ocorrência do aumento significativo nos valores de deflexão no topo do pavimento em todos os casos avaliados. Ainda, é possível concluir que no caso de aderência parcial entre as camadas, a variação da espessura das camadas de base e sub-base, em quaisquer dimensões, afeta consideravelmente os valores de deslocamento vertical e que esta influência é ainda maior quando a camada de BGMC atua como base da estrutura.

Outro fato relevante diz respeito ao comparativo entre as deflexões determinadas com a variação das espessuras das camadas de base e sub-base, dentro do próprio caso de aderência parcial. Neste contexto, o comportamento da estrutura se assemelha ao caso em que a camada de BGTC é base, com diferenças menores que 1% em relação ao caso. Os resultados obtidos nesta análise estão dispostos na Tabela 4.13 a seguir:

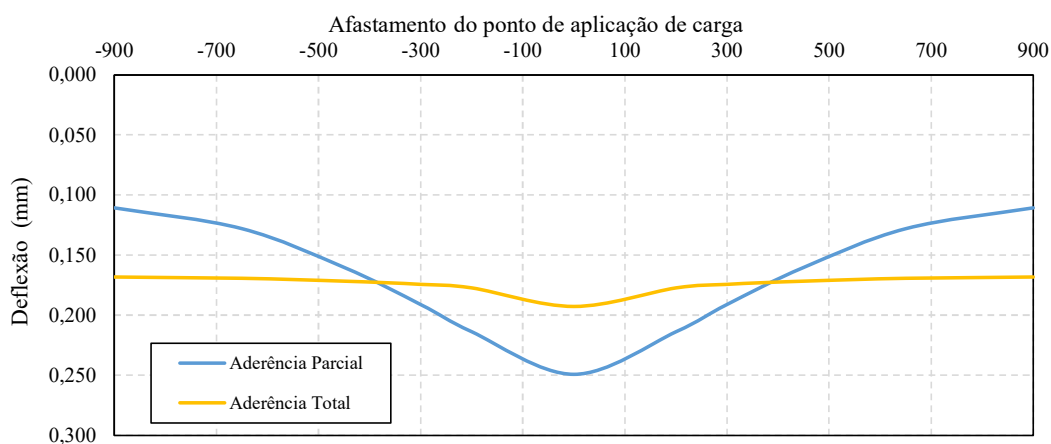
**Tabela 4.13 – Influência da variação de espessura para os casos de aderência parcial no Modelo I – Base de BGMC**

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | C=0,4  | C=0,6  | C=0,8  |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|
| 140            | 140           | 14,63% | 14,38% | 14,15% |
| 140            | 160           | 11,02% | 10,82% | 10,64% |
| 140            | 180           | 7,33%  | 7,20%  | 7,07%  |
| 140            | 200           | 1,99%  | 1,95%  | 1,92%  |
| 160            | 140           | 9,05%  | 8,92%  | 8,80%  |
| 160            | 160           | 6,41%  | 6,31%  | 6,21%  |
| 160            | 180           | 3,59%  | 3,53%  | 3,47%  |
| 160            | 200           | -0,67% | -0,67% | -0,66% |
| 180            | 140           | 4,00%  | 3,96%  | 3,93%  |
| 180            | 160           | 2,09%  | 2,07%  | 2,05%  |
| 180            | 180           | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  |
| 180            | 200           | -3,33% | -3,29% | -3,24% |
| 200            | 140           | -2,55% | -2,48% | -2,42% |
| 200            | 160           | -3,70% | -3,63% | -3,56% |
| 200            | 180           | -5,01% | -4,93% | -4,85% |
| 200            | 200           | -7,21% | -7,10% | -7,00% |

Fonte: Autora (2022)

No caso do Modelo II, de análise dinâmica, a variação da opção de contato também gerou alterações significativas nos valores de deflexão, no entanto, menores que para o Modelo I. Para o caso mais crítico, com  $C=0,4$  e 14 cm de espessura para as camadas de base e sub-base a deflexão teve aumento de 29,19%, como evidenciado na Figura 4.24:

**Figura 4.24 Diferença Máxima de 29,19% para o caso de  $C=0,4$**



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 4.14 a seguir traz o compilado destes resultados:

**Tabela 4.14 – Diferenças percentuais em relação à estrutura de projeto para o Modelo II – Base de BGMC**

| Esp. BGTC (mm) | Esp.BGMC (mm) | C=0,4  | C=0,6  | C=0,8  |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|
| 140            | 140           | 29,19% | 28,58% | 28,00% |
| 140            | 160           | 35,01% | 34,26% | 33,55% |
| 140            | 180           | 20,84% | 20,35% | 19,87% |
| 140            | 200           | 14,84% | 14,43% | 14,04% |
| 160            | 140           | 22,87% | 22,36% | 21,88% |
| 160            | 160           | 29,45% | 19,37% | 18,92% |
| 160            | 180           | 16,66% | 16,22% | 24,88% |
| 160            | 200           | 11,87% | 11,51% | 11,15% |
| 180            | 140           | 17,19% | 16,77% | 16,37% |
| 180            | 160           | 15,02% | 14,62% | 14,24% |
| 180            | 180           | 21,74% | 12,29% | 11,92% |
| 180            | 200           | 8,92%  | 8,59%  | 8,28%  |
| 200            | 140           | 9,93%  | 9,61%  | 9,30%  |
| 200            | 160           | 8,61%  | 8,30%  | 8,00%  |
| 200            | 180           | 7,13%  | 6,82%  | 6,53%  |

Fonte: Autora (2022)

Com base no exposto é possível observar que a variação de espessura nos casos de aderência parcial exerce maior influência sobre os valores de deslocamento vertical máximo para o Modelo I, de análise estática. Ainda assim, para o Modelo II, essa influência também é bastante significativa.

#### 4.2.5 Variação de Pressão dos Pneus

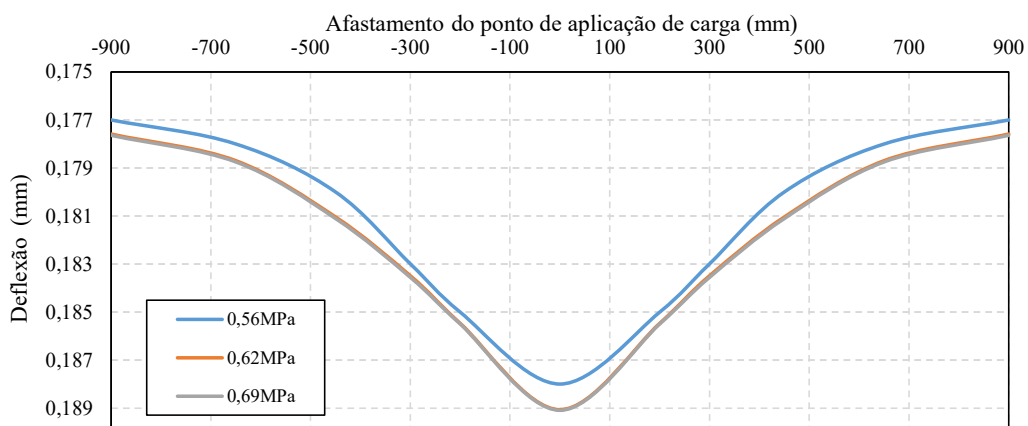
A fim de avaliar a influência da pressão de enchimento dos pneus na determinação da deflexão no pavimento, foram feitas simulações considerando dois níveis distintos à pressão padrão normalizada para a determinação da deflexão, sendo eles:

- Pressão igual a 0,62 MPa, considerada média;
- Pressão igual a 0,69 MPa, considerada alta.

Estes valores foram referenciados no trabalho de Albano (1998) e seu estudo acerca dos efeitos da pressão dos pneus sobre um pavimento.

A Figura 4.25 apresenta o comparativo das bacias de deflexão para os casos de pressão dos pneus 0,56MPa, 0,62 MPa e 0,69 MPa:

**Figura 4.25 Alteração da pressão de inflação dos pneus**



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que a variação da deflexão máxima é pouco significativa, com 0,58% de aumento para o caso de pressão de inflação 0,69MPa. A Tabela 4.15 apresenta os valores absolutos de deflexão máxima para os 3 casos, considerando a estrutura do projeto inicial:

**Tabela 4.15 – Deflexão máxima para as diferentes pressões de inflação**

| <b>Pressão dos Pneus (Mpa)</b> | <b>Deflexão Máx.</b> |
|--------------------------------|----------------------|
| 0,56                           | 0,188                |
| 0,62                           | 0,189                |
| 0,69                           | 0,189                |

Fonte: Autora (2022)

Ainda, variou-se as espessuras das camadas de base e sub-base em 14, 16, 18 e 20cm para ambos os casos de pressão de inflação. No entanto, não foram observadas diferenças maiores que 1% em relação ao caso de pressão normativa de 0,56Mpa, indicando pouca influência deste parâmetro dos resultados de deslocamento vertical.

---

**5 CONCLUSÃO**

No presente trabalho avaliou-se o comportamento mecânico de pavimentos rodoviários via Método dos Elementos Finitos a partir da determinação das deflexões induzidas no topo do pavimento. Para tal, foram criados dois modelos, denominados Modelo I e Modelo II e que diferem entre si principalmente nas condições de carregamento. A calibração e validação destes modelos com base nos dados experimentais obtidos em campo durante o controle executivo de obra de pavimentação rodoviária trouxe uma estimativa do nível de aplicabilidade do modelo concebido. Nos dois casos analisados, a estrutura seguiu o padrão de comportamento esperado em relação à estrutura real de pavimento flexível.

Os resultados gerados possibilitaram a análise do comportamento do pavimento quando submetido às ações das cargas verticais de tráfego, em relação aos deslocamentos na superfície. Os principais resultados dizem respeito à deflexão máxima e bacia de deflexão na superfície da estrutura. As análises iniciais revelam a nítida influência das camadas granulares, de base e sub-base, na dissipação dos esforços e mitigação dos valores de deflexão em relação à camada de reforço de subleito. A suavização das bacias de deflexão também sinaliza as melhorias da capacidade estrutural do pavimento à medida que as camadas superiores são inseridas ao modelo.

Nas avaliações das respostas estruturais do pavimento foram realizadas 240 simulações e os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios. Em suma, os dois modelos apresentaram valores máximos de deflexão similares, mas os formatos da bacia de deflexão bastante distintos. No modelo I, sob carregamento estático, o raio de curvatura da bacia de deflexões é maior, ao passo que para o Modelo II, caso de análise dinâmica, ocorre uma concentração de deflexões de maior magnitude próximas à área carregada.

Para o caso de aderência completa, a alteração de espessura das camadas de base e sub-base apresentou pouca influência nos resultados dos deslocamentos verticais. Nos casos avaliados, considerando a espessura fixa para a camada de BGTC, observa-se que à medida que a camada de sub-base se torna mais robusta, os valores de deslocamento vertical máximo diminuem. No entanto, para pontos de leitura afastados em relação ao ponto de aplicação da carga este comportamento variou em alguns casos: as bacias de deflexão se cruzam e os valores de deslocamento vertical passam a ser menores à medida que a espessura da camada de BGMC diminui. Neste contexto, a variação de espessura das camadas de base e sub-base apresentou diferenças percentuais máximas de deflexão de 2,13% para o Modelo I. No caso

de análise dinâmica - Modelo II - a estrutura segue os mesmos comportamentos descritos na análise estática, no entanto, apresentam diferença percentual um pouco menor neste caso, com valor máximo de 1,69% na configuração menos favorável.

Destaca-se ainda que a inversão das camadas de BGMC e BGTC na estrutura pouco alteraram os resultados. A deflexão considerando a camada de BGMC como camada de base na estrutura do pavimento é 0,81% maior se comparado à estrutura original, em que a camada de BGTC é camada de base. Conclui-se, portanto, que o comportamento nos dois casos é bastante similar, e não há ganhos significativos relacionados à deflexão. A variação de espessura das camadas de base e sub-base neste caso não influencia significativamente os resultados, apresentando diferenças percentuais máximas de 2,50% para o Modelo I e 2,46% para o Modelo II.

Em todas as estruturas analisadas, ficou evidente o impacto da condição de interface entre as camadas nos deslocamentos no topo do pavimento. Nota-se que ocorre um aumento significativo nos valores de deflexão a partir da consideração de aderência parcial entre as camadas. Para o Modelo I, os valores encontrados são bastante relevantes, observando-se um aumento de deflexão de 22,36% para o caso de coeficiente de atrito igual a 0,4, considerando a configuração de projeto. A variação de espessura das camadas granulares para os casos de aderência parcial também apresentou grande influência sobre os resultados de deslocamento vertical. O caso menos favorável ocorre para o Modelo I, considerando coeficiente de atrito 0,4 e espessura das camadas de 14 cm, chegando a 40,93% de aumento do deslocamento vertical no topo do pavimento em relação à estrutura de projeto. O efeito da inversão das camadas de BGMC e BGTC, atrelado à variação da espessura destas camadas, também é significativo, atingindo 53,65% de aumento da deflexão para o caso mais crítico. Outro comportamento relevante se observa considerando apenas os casos de aderência parcial, em que a variação de espessura das camadas granulares também mostra grande impacto nos resultados, chegando a diferenças percentuais de 22,67% entre os extremos – casos de 14cm e 20cm para as duas camadas. Vale destacar, no entanto, que a variação exclusiva do coeficiente de atrito para o modelo de contato de Coulomb pouco afetou os resultados, com diferenças menores que 1% entre os casos extremos de coeficiente de atrito 0,4 e 0,8.

Por fim, a variação da pressão dos pneus teve pouca influência nas análises, com diferenças percentuais máximas de 0,58% nos valores de deflexão. Ainda, a variação da espessura das camadas atrelada à diferentes pressões de inflação não mostraram relevância na

## **5 – CONCLUSÃO**

---

determinação dos resultados, sendo observadas diferenças menores que 1% em relação ao caso de pressão normativa de 0,56Mpa.

### REFERÊNCIAS

DNIT. IPR 723 - **Manual de estudos de tráfego**. - Rio de Janeiro, RJ, 2006.

ALMEIDA, J. V. **Modelagem numérica tridimensional de pavimentos de concreto submetidos às cargas do tráfego e ao empenamento térmico**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

NÓBREGA, E. S. Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

FABRICIO, J. M.; GONÇALVES, E. A.; FABRÍCIO, O. F. Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis Através da Interpretação das Bacias de Deformação. Anais da 23ª Reuniao Anual de Pavimentação, v. 3, Florianópolis, 1988. P. 1415-1446.

ABAQUS (2014) Getting Started with ABAQUS, Keywords Edition 14, 2014. Disponível em <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/gsk/default.htm> (acesso em 10/07/2021).

SANTOS, A. G.; ASSIS, R. K. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 89–101, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i2.1597.

PONTE, R. S.; BRANCO V. T. F. C; HOLANDA, A. S.; SOARES, J. B. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 85–94, 2014. DOI: 10.14295/transportes.v22i2.792.

CARVALHO, N. T. N. de; ALBUQUERQUE, F. S. Análise de deformações específicas de tração na fibra inferior de revestimento asfáltico através de instrumentação e métodos numéricos. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 56–72, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i2.1579.

UDDIN, W.; ZHANG, D.; FERNANDEZ F. Finite element simulation of pavement discontinuities and dunamic load response. **Transportation Research Record**, Issue Number 1448, p.100-106, 1994. ISSN:0361-1981.

HADI, M. N. S.; BODHINAYAKE, B. C. Non-linear element analysis of flexible pavements. **Advances in Engineering Software**, V.34, Issues 11-12, Pages 657-662, 2003. DOI:10.1016/S0965-9978(03)00109-1

HAMIM, A.; YUSOFF, N. I. M; CEYLAN H.; ROSYIDI, S. A. P.; EL-SHAFIE, A. Comparative study on using static and dynamic finite elemento models to develop FWD measurement on flexible pavement structures. **Construction and Building Materials**, V.176, Pages 583-592, 2018.

BRITO, L. A. T. (2006) Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HOLANDA, A. S.; PARENTE JUNIOR, E.; MELO, L. T. B.; SILVA, H. N.; SOUZA, S. C. Utilização de modelos resilientes na análise de pavimentos asfálticos. CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 11., 2007, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2007. p. 1-10.

Yi,K e Hedrick, K. (1992) – **Use of Semi-Active Suspentions to Reduce Pavement Damage**. ASTM STP 1164.

CORREIA, N. S. **Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema de anti-reflexão de trincas**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2010.

SANTANA, H. (1993) “**Manual de Pré-Misturado a Frio**”. IBP.

Senço, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. Volume I, 2ª edição. 2008.p

Hibbitt, Karlsson e Sorensen, 1998. – “*ABAQUS/Standard – User’s manual*”- Volumes I, II e III, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, EUA.

RANGEL, G. W. A. *Um método para a estimativa de deflexões do pavimento ferroviário lastreado*. Tese (doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

FRANCO, F.A.C.P., 2007. **Método de dimensionamento mecânico - empírico de pavimentos asfálticos**, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDINA, J. & MOTTA, L.M.G., 2005, **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição, Edição dos autores. Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

SILVA, C.F.S.C, 2014. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado**. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, A. G. **Estudo Teórico do Efeito da Interação entre as Camadas no Comportamento Estrutural de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2018.

Hass, R., et al. (1994). **Modern Pavement Management**. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company.

CARNEIRO, F.B.L. **Viga Benkelman - Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação**. Caderno de Engenharia Rodoviária 2. Secretaria de Comunicações e Transporte. DER/RJ, 1966.

BORGES, C. B. S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ALBERNAZ, C. A. V. *Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 1997.

PEREIRA, J. M. B. **Um Procedimento de Retroanálise para Pavimentos Flexíveis baseado na Teoria do Ponto Inerte e em Modelagem Matemática**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2007.

VELLASCO, B. Q. **Análise Crítica do Controle Construtivo de Pavimentos com a Viga Benkelman: Aplicação ao caso da Ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2018.

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

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. New Jersey, Prentice Hall Inc., 1993.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

CARDOSO, S.H. *Faixas de Módulos Dinâmicos (Elásticos) Obtidos por Retroanálises durante Sete Anos*. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT, out. 1999.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., ALBERNAZ, C.A.V. *Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos*. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, set. 1994.



| Carga    | CAMADA PRINCIPAL | ATRITO | CONTATO | PRESSÃO DOS PNEUS | ESP. BGTC (mm) | ESP. BGMC (mm) | 0     | 200   | 300   | 450   | 650   | 900   |
|----------|------------------|--------|---------|-------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 140            | 0,192 | 0,188 | 0,185 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 160            | 0,191 | 0,187 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 180            | 0,19  | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 200            | 0,189 | 0,186 | 0,183 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 140            | 0,191 | 0,187 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 160            | 0,19  | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 180            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 200            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 140            | 0,19  | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 160            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 180            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 200            | 0,188 | 0,184 | 0,182 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 140            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 160            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 180            | 0,188 | 0,184 | 0,182 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 200            | 0,187 | 0,184 | 0,182 | 0,18  | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 140            | 0,193 | 0,188 | 0,185 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 160            | 0,192 | 0,187 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 180            | 0,191 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 200            | 0,190 | 0,186 | 0,183 | 0,181 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 140            | 0,192 | 0,187 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 160            | 0,191 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 180            | 0,190 | 0,186 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 200            | 0,190 | 0,185 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 140            | 0,191 | 0,186 | 0,183 | 0,181 | 0,178 | 0,176 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 160            | 0,190 | 0,185 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 180            | 0,190 | 0,185 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 200            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 140            | 0,189 | 0,184 | 0,182 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 160            | 0,189 | 0,184 | 0,182 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 180            | 0,189 | 0,184 | 0,182 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Estática | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 200            | 0,189 | 0,184 | 0,182 | 0,180 | 0,178 | 0,177 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 140            | 0,196 | 0,180 | 0,176 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 160            | 0,195 | 0,179 | 0,176 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 180            | 0,195 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 200            | 0,194 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 140            | 0,195 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 160            | 0,194 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 180            | 0,194 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 200            | 0,193 | 0,177 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 140            | 0,194 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 160            | 0,193 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 180            | 0,193 | 0,177 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 200            | 0,193 | 0,177 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 140            | 0,193 | 0,177 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 160            | 0,193 | 0,177 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 180            | 0,192 | 0,177 | 0,174 | 0,171 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGTC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 200            | 0,192 | 0,176 | 0,174 | 0,171 | 0,169 | 0,169 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 140            | 0,198 | 0,180 | 0,176 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 160            | 0,197 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 180            | 0,196 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 140            | 200            | 0,196 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 140            | 0,197 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,167 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 160            | 0,196 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 180            | 0,196 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 160            | 200            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 140            | 0,196 | 0,179 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 160            | 0,196 | 0,178 | 0,175 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 180            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 180            | 200            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 140            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 160            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 180            | 0,195 | 0,178 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,168 |
| Dinâmica | BGMC             | nao    | tie     | 0,56              | 200            | 200            | 0,194 | 0,177 | 0,174 | 0,171 | 0,169 | 0,169 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 140            | 0,265 | 0,244 | 0,226 | 0,201 | 0,177 | 0,164 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 160            | 0,256 | 0,237 | 0,221 | 0,199 | 0,177 | 0,166 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 180            | 0,248 | 0,230 | 0,216 | 0,196 | 0,177 | 0,168 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 200            | 0,236 | 0,221 | 0,208 | 0,192 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 140            | 0,250 | 0,232 | 0,217 | 0,197 | 0,177 | 0,167 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 160            | 0,245 | 0,228 | 0,214 | 0,195 | 0,177 | 0,168 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 180            | 0,239 | 0,223 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 200            | 0,230 | 0,216 | 0,204 | 0,190 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 140            | 0,238 | 0,223 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 160            | 0,234 | 0,219 | 0,207 | 0,192 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 180            | 0,230 | 0,216 | 0,205 | 0,191 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 200            | 0,224 | 0,211 | 0,201 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 140            | 0,224 | 0,211 | 0,201 | 0,188 | 0,177 | 0,172 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 160            | 0,222 | 0,209 | 0,200 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 180            | 0,219 | 0,207 | 0,198 | 0,187 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 200            | 0,215 | 0,204 | 0,195 | 0,185 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 140            | 0,264 | 0,243 | 0,226 | 0,201 | 0,177 | 0,164 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 160            | 0,255 | 0,236 | 0,221 | 0,199 | 0,177 | 0,166 |

| Carga    | CAMADA PRINCIPAL | ATRITO | CONTATO | PRESSÃO DOS PNEUS | ESP. BGTC (mm) | ESP. BGMC (mm) | 0     | 200   | 300   | 450   | 650   | 900   |
|----------|------------------|--------|---------|-------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 180            | 0,247 | 0,230 | 0,215 | 0,196 | 0,177 | 0,168 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 200            | 0,236 | 0,220 | 0,208 | 0,192 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 140            | 0,250 | 0,232 | 0,217 | 0,197 | 0,177 | 0,167 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 160            | 0,244 | 0,227 | 0,214 | 0,195 | 0,177 | 0,168 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 180            | 0,238 | 0,222 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 200            | 0,229 | 0,215 | 0,204 | 0,190 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 140            | 0,238 | 0,222 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 160            | 0,234 | 0,219 | 0,207 | 0,192 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 180            | 0,230 | 0,216 | 0,205 | 0,191 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 200            | 0,223 | 0,211 | 0,201 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 140            | 0,224 | 0,211 | 0,201 | 0,188 | 0,177 | 0,172 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 160            | 0,221 | 0,209 | 0,200 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 180            | 0,219 | 0,207 | 0,198 | 0,187 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 200            | 0,215 | 0,204 | 0,195 | 0,185 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 140            | 0,263 | 0,243 | 0,225 | 0,201 | 0,177 | 0,164 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 160            | 0,255 | 0,236 | 0,220 | 0,199 | 0,177 | 0,166 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 180            | 0,246 | 0,229 | 0,215 | 0,196 | 0,177 | 0,168 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 200            | 0,235 | 0,220 | 0,208 | 0,192 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 140            | 0,249 | 0,232 | 0,217 | 0,197 | 0,177 | 0,167 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 160            | 0,243 | 0,227 | 0,213 | 0,195 | 0,177 | 0,169 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 180            | 0,237 | 0,222 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 200            | 0,229 | 0,215 | 0,204 | 0,190 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 140            | 0,237 | 0,222 | 0,210 | 0,193 | 0,177 | 0,170 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 160            | 0,233 | 0,219 | 0,207 | 0,192 | 0,177 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 180            | 0,229 | 0,216 | 0,205 | 0,191 | 0,178 | 0,171 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 200            | 0,223 | 0,210 | 0,201 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 140            | 0,223 | 0,211 | 0,201 | 0,189 | 0,177 | 0,172 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 160            | 0,221 | 0,209 | 0,200 | 0,188 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 180            | 0,219 | 0,207 | 0,198 | 0,187 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGTC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 200            | 0,215 | 0,204 | 0,195 | 0,185 | 0,177 | 0,173 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 140            | 0,289 | 0,264 | 0,240 | 0,204 | 0,163 | 0,141 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 160            | 0,280 | 0,257 | 0,235 | 0,202 | 0,165 | 0,144 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 180            | 0,270 | 0,249 | 0,230 | 0,199 | 0,166 | 0,148 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 200            | 0,257 | 0,238 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 140            | 0,275 | 0,253 | 0,232 | 0,200 | 0,165 | 0,146 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 160            | 0,268 | 0,247 | 0,228 | 0,199 | 0,166 | 0,149 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 180            | 0,261 | 0,242 | 0,224 | 0,197 | 0,167 | 0,151 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 200            | 0,250 | 0,233 | 0,217 | 0,194 | 0,169 | 0,156 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 140            | 0,262 | 0,242 | 0,224 | 0,197 | 0,167 | 0,151 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 160            | 0,257 | 0,238 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 180            | 0,252 | 0,234 | 0,218 | 0,194 | 0,169 | 0,155 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 200            | 0,244 | 0,227 | 0,213 | 0,192 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 140            | 0,246 | 0,229 | 0,214 | 0,192 | 0,170 | 0,158 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 160            | 0,243 | 0,226 | 0,212 | 0,191 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 180            | 0,239 | 0,224 | 0,210 | 0,190 | 0,171 | 0,160 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 200            | 0,234 | 0,219 | 0,207 | 0,189 | 0,171 | 0,162 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 140            | 0,287 | 0,263 | 0,240 | 0,204 | 0,164 | 0,141 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 160            | 0,278 | 0,256 | 0,235 | 0,202 | 0,165 | 0,144 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 180            | 0,269 | 0,249 | 0,229 | 0,199 | 0,166 | 0,148 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 200            | 0,256 | 0,238 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 140            | 0,273 | 0,252 | 0,232 | 0,200 | 0,166 | 0,146 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 160            | 0,267 | 0,247 | 0,228 | 0,199 | 0,167 | 0,149 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 180            | 0,260 | 0,241 | 0,223 | 0,197 | 0,168 | 0,152 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 200            | 0,249 | 0,232 | 0,217 | 0,194 | 0,169 | 0,156 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 140            | 0,261 | 0,242 | 0,224 | 0,197 | 0,168 | 0,151 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 160            | 0,256 | 0,238 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 180            | 0,251 | 0,234 | 0,218 | 0,194 | 0,169 | 0,155 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 200            | 0,243 | 0,227 | 0,213 | 0,192 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 140            | 0,245 | 0,228 | 0,213 | 0,192 | 0,170 | 0,158 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 160            | 0,242 | 0,226 | 0,212 | 0,191 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 180            | 0,239 | 0,223 | 0,210 | 0,191 | 0,171 | 0,160 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 200            | 0,233 | 0,219 | 0,206 | 0,189 | 0,172 | 0,163 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 140            | 0,286 | 0,262 | 0,239 | 0,204 | 0,164 | 0,141 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 160            | 0,277 | 0,255 | 0,234 | 0,202 | 0,165 | 0,145 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 180            | 0,268 | 0,248 | 0,229 | 0,199 | 0,166 | 0,148 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 200            | 0,255 | 0,237 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 140            | 0,272 | 0,251 | 0,231 | 0,200 | 0,166 | 0,147 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 160            | 0,266 | 0,246 | 0,227 | 0,198 | 0,167 | 0,149 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 180            | 0,259 | 0,240 | 0,223 | 0,197 | 0,168 | 0,152 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 200            | 0,249 | 0,232 | 0,217 | 0,194 | 0,169 | 0,156 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 140            | 0,260 | 0,241 | 0,223 | 0,197 | 0,168 | 0,152 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 160            | 0,255 | 0,237 | 0,221 | 0,196 | 0,168 | 0,153 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 180            | 0,250 | 0,233 | 0,218 | 0,194 | 0,169 | 0,155 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 200            | 0,242 | 0,227 | 0,212 | 0,192 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 140            | 0,244 | 0,228 | 0,213 | 0,192 | 0,170 | 0,158 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 160            | 0,241 | 0,226 | 0,212 | 0,191 | 0,170 | 0,159 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 180            | 0,238 | 0,223 | 0,210 | 0,191 | 0,171 | 0,160 |
| Estática | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 200            | 0,233 | 0,219 | 0,206 | 0,189 | 0,172 | 0,163 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 140            | 0,249 | 0,214 | 0,191 | 0,160 | 0,128 | 0,111 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 160            | 0,261 | 0,225 | 0,202 | 0,172 | 0,140 | 0,123 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 180            | 0,233 | 0,201 | 0,182 | 0,156 | 0,130 | 0,116 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 140            | 200            | 0,222 | 0,192 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |

| Carga    | CAMADA PRINCIPAL | ATRITO | CONTATO | PRESSÃO DOS PNEUS | ESP. BGTC (mm) | ESP. BGMC (mm) | 0     | 200   | 300   | 450   | 650   | 900   |
|----------|------------------|--------|---------|-------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 140            | 0,237 | 0,204 | 0,184 | 0,157 | 0,130 | 0,115 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 160            | 0,250 | 0,216 | 0,195 | 0,168 | 0,141 | 0,127 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 180            | 0,225 | 0,195 | 0,177 | 0,154 | 0,131 | 0,119 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 160            | 200            | 0,216 | 0,187 | 0,171 | 0,151 | 0,132 | 0,122 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 140            | 0,226 | 0,195 | 0,177 | 0,154 | 0,131 | 0,119 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 160            | 0,222 | 0,192 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 180            | 0,235 | 0,204 | 0,186 | 0,164 | 0,143 | 0,132 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 180            | 200            | 0,210 | 0,182 | 0,167 | 0,149 | 0,132 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 140            | 0,212 | 0,183 | 0,168 | 0,149 | 0,132 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 160            | 0,210 | 0,181 | 0,166 | 0,149 | 0,132 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,4     | 0,56              | 200            | 180            | 0,207 | 0,179 | 0,165 | 0,148 | 0,133 | 0,125 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 140            | 0,248 | 0,214 | 0,191 | 0,160 | 0,128 | 0,111 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 160            | 0,259 | 0,224 | 0,202 | 0,172 | 0,140 | 0,123 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 180            | 0,232 | 0,201 | 0,182 | 0,156 | 0,130 | 0,116 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 140            | 200            | 0,221 | 0,192 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 140            | 0,236 | 0,204 | 0,184 | 0,157 | 0,130 | 0,115 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 160            | 0,230 | 0,199 | 0,180 | 0,155 | 0,130 | 0,117 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 180            | 0,224 | 0,194 | 0,177 | 0,154 | 0,131 | 0,119 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 160            | 200            | 0,215 | 0,187 | 0,171 | 0,151 | 0,132 | 0,122 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 140            | 0,225 | 0,195 | 0,177 | 0,154 | 0,131 | 0,119 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 160            | 0,221 | 0,192 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 180            | 0,217 | 0,188 | 0,172 | 0,151 | 0,132 | 0,122 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 180            | 200            | 0,210 | 0,182 | 0,167 | 0,149 | 0,133 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 140            | 0,212 | 0,183 | 0,168 | 0,150 | 0,132 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 160            | 0,209 | 0,181 | 0,166 | 0,149 | 0,133 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 180            | 0,206 | 0,179 | 0,165 | 0,148 | 0,133 | 0,125 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,6     | 0,56              | 200            | 200            | 0,201 | 0,175 | 0,162 | 0,147 | 0,133 | 0,127 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 140            | 0,247 | 0,213 | 0,191 | 0,161 | 0,129 | 0,111 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 160            | 0,258 | 0,224 | 0,202 | 0,172 | 0,141 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 180            | 0,231 | 0,201 | 0,181 | 0,156 | 0,130 | 0,116 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 140            | 200            | 0,220 | 0,191 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 140            | 0,235 | 0,203 | 0,183 | 0,157 | 0,130 | 0,115 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 160            | 0,229 | 0,199 | 0,180 | 0,156 | 0,130 | 0,117 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 180            | 0,241 | 0,210 | 0,191 | 0,167 | 0,142 | 0,129 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 160            | 200            | 0,214 | 0,187 | 0,171 | 0,151 | 0,132 | 0,122 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 140            | 0,225 | 0,195 | 0,177 | 0,154 | 0,131 | 0,119 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 160            | 0,220 | 0,191 | 0,174 | 0,153 | 0,131 | 0,120 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 180            | 0,216 | 0,188 | 0,172 | 0,152 | 0,132 | 0,122 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 180            | 200            | 0,209 | 0,182 | 0,167 | 0,149 | 0,133 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 140            | 0,211 | 0,183 | 0,168 | 0,150 | 0,132 | 0,124 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 160            | 0,208 | 0,181 | 0,166 | 0,149 | 0,133 | 0,125 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 180            | 0,206 | 0,179 | 0,165 | 0,148 | 0,133 | 0,125 |
| Dinâmica | BGMC             | sim    | 0,8     | 0,56              | 200            | 200            | 0,201 | 0,175 | 0,162 | 0,147 | 0,133 | 0,127 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 140            | 140            | 0,193 | 0,189 | 0,186 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 140            | 160            | 0,192 | 0,188 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 140            | 180            | 0,191 | 0,187 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 140            | 200            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 160            | 140            | 0,192 | 0,187 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 160            | 160            | 0,191 | 0,187 | 0,184 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 160            | 180            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 160            | 200            | 0,189 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 180            | 140            | 0,190 | 0,187 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 180            | 160            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 180            | 180            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 180            | 200            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 200            | 140            | 0,189 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 200            | 160            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 200            | 180            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,62              | 200            | 200            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 140            | 140            | 0,193 | 0,189 | 0,186 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 140            | 160            | 0,192 | 0,188 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 140            | 180            | 0,191 | 0,187 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 140            | 200            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 160            | 140            | 0,192 | 0,188 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 160            | 160            | 0,191 | 0,187 | 0,185 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 160            | 180            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 160            | 200            | 0,189 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 180            | 140            | 0,190 | 0,187 | 0,184 | 0,182 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 180            | 160            | 0,190 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 180            | 180            | 0,189 | 0,185 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 180            | 200            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 200            | 140            | 0,189 | 0,186 | 0,184 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 200            | 160            | 0,189 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 200            | 180            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |
| Estática | BGTC             | nao    | tie     | 0,69              | 200            | 200            | 0,188 | 0,185 | 0,183 | 0,181 | 0,179 | 0,178 |



| CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD |                |                    |      |      |                                             |      |      |                |                  |                            |             |      |
|--------------------------------|----------------|--------------------|------|------|---------------------------------------------|------|------|----------------|------------------|----------------------------|-------------|------|
| RODOVIA<br>BR-376              |                | TRECHO<br>27A      |      |      | SENTIDO<br>NORTE                            |      |      | PISTA<br>DUPLA |                  | FAIXA<br>2                 |             |      |
| INÍCIO<br>km 236,540           |                | FIM<br>km 233,040  |      |      | EQUIPAMENTO<br>Falling Weight Deflectometer |      |      |                |                  | RAIO DE APLICAÇÃO<br>15 cm |             |      |
| Hodômetro<br>(km)              | Força<br>(kgf) | DEFLEXÃO (0,01 mm) |      |      |                                             |      |      |                | Temperatura (°C) |                            | Data e Hora |      |
|                                |                | Df1                | Df2  | Df3  | Df4                                         | Df5  | Df6  | Df7            | Ar               | Pav                        |             |      |
| 236.540                        | 4163           | 58,8               | 43,1 | 34,8 | 26,5                                        | 21,0 | 15,5 | 10,6           | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 7:54 |
| 236.500                        | 4170           | 45,5               | 36,2 | 31,2 | 24,9                                        | 18,9 | 12,8 | 9,4            | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 7:55 |
|                                |                |                    |      |      |                                             |      |      |                |                  |                            |             |      |
| 233.720                        | 4227           | 5,2                | 4,6  | 4,1  | 3,8                                         | 3,6  | 3,5  | 2,0            | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 8:00 |
| 233.680                        | 4206           | 6,8                | 6,3  | 6,1  | 5,6                                         | 5,5  | 5,0  | 3,4            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:00 |
| 233.640                        | 4192           | 18,4               | 15,0 | 13,5 | 12,0                                        | 9,7  | 7,6  | 1,9            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:01 |
| 233.600                        | 4156           | 18,6               | 14,5 | 12,0 | 9,8                                         | 8,2  | 6,8  | 4,0            | 27,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:01 |
| 233.560                        | 4206           | 20,0               | 15,4 | 13,5 | 10,9                                        | 8,7  | 7,1  | 1,1            | 27,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:02 |
| 233.520                        | 4185           | 25,9               | 21,2 | 18,4 | 15,2                                        | 11,4 | 8,8  | 0,5            | 27,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:02 |
| 233.480                        | 4199           | 19,6               | 15,2 | 13,5 | 10,7                                        | 8,4  | 6,2  | 2,0            | 27,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:03 |
| 233.440                        | 4199           | 12,5               | 10,2 | 9,8  | 8,8                                         | 7,8  | 6,4  | 4,0            | 27,0             | 29,0                       | 03/12/2020  | 8:03 |
| 233.400                        | 4185           | 12,6               | 10,6 | 8,9  | 8,4                                         | 7,0  | 6,1  | 2,0            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:04 |
| 233.360                        | 4199           | 14,0               | 12,8 | 11,3 | 10,6                                        | 8,8  | 7,8  | 4,0            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:04 |
| 233.320                        | 4192           | 12,9               | 10,7 | 9,9  | 9,6                                         | 8,0  | 7,5  | 5,0            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:05 |
| 233.280                        | 4170           | 19,0               | 15,9 | 14,4 | 12,6                                        | 10,3 | 8,2  | 6,0            | 25,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:05 |
| 233.240                        | 4185           | 11,0               | 9,1  | 7,8  | 7,3                                         | 7,0  | 6,3  | 4,0            | 25,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 8:06 |
| 233.200                        | 4185           | 14,8               | 12,8 | 11,3 | 9,7                                         | 8,6  | 6,9  | 5,0            | 26,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:06 |
| 233.160                        | 4185           | 10,2               | 9,0  | 8,3  | 7,8                                         | 6,9  | 5,8  | 4,0            | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 8:07 |
| 233.120                        | 4163           | 14,7               | 11,1 | 9,7  | 8,7                                         | 7,7  | 6,6  | 4,8            | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 8:07 |
| 233.080                        | 4170           | 21,6               | 14,7 | 12,1 | 9,2                                         | 7,6  | 7,1  | 5,0            | 26,0             | 31,0                       | 03/12/2020  | 8:08 |
| 233.040                        | 4178           | 22,0               | 20,4 | 17,3 | 15,3                                        | 12,5 | 10,3 | 0,4            | 28,0             | 30,0                       | 03/12/2020  | 8:08 |