

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

CAROLINE ANGÉLICA BERKENBROCK

**COMPARATIVO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO
FLEXÍVEL SIMULADO NUMERICAMENTE, COM BASE NOS DADOS
OBTIDOS PELOS ENSAIOS COM O FWD E COM A VIGA BENKELMAN**

JOINVILLE

2022

CAROLINE ANGÉLICA BERKNEBROCK

**COMPARATIVO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO
FLEXÍVEL SIMULADO NUMERICAMENTE, COM BASE NOS DADOS
OBTIDOS PELOS ENSAIOS COM O FWD E COM A VIGA BENKELMAN**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos

JOINVILLE

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Berkenbrock, Caroline Angélica

Comparativo da resposta estrutural de um pavimento flexível simulado numericamente, com base nos dados obtidos pelos ensaios com o FWD e com a viga Benkelman / Caroline Angélica Berkenbrock. -- 2022.
165 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2022.

1. FWD. 2. Viga Benkelman. 3. Tensões. 4. Deformações. 5. MEF. I. Santos, Adriana Goulart dos. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CAROLINE ANGÉLICA BERKENBROCK

**COMPARATIVO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO
FLEXÍVEL SIMULADO NUMERICAMENTE, COM BASE NOS DADOS
OBTIDOS PELOS ENSAIOS COM O FWD E COM A VIGA BENKELMAN**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC (Orientadora/Presidente)

Membros:

Prof. Dr. Evandro Parente Junior

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Lucas Dotto Bueno

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

JOINVILLE, 29 DE ABRIL DE 2022.

Dedico este trabalho ao meu
companheiro e melhor amigo Giovani
Schulenburg, e aos meus filhos,
bichanos de quatro patas, Nina,
Phoebe e Sheldon.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e a Nossa Senhora Desatadora dos Nós, pela vida, pela saúde, por todas as bênçãos recebidas e pedidos atendidos.

Aos meus pais Adelson e Vanilda Berkenbrock, por todo amparo, ensinamento e suporte durante minha criação.

Ao meu melhor amigo e companheiro Giovani Schulenburg, por todo apoio e incentivo fornecido durante esta jornada.

A todos os colegas do curso, em especial aos integrantes da minha turma (T-9), André, Jonas e Ricardo, por todas as experiências trocadas. Um agradecimento especial a colega Cláudia Zago, por permitir que eu participasse dos ensaios na rodovia Rio do Morro, e por todo conhecimento compartilhado.

A minha orientadora, professora Dra. Adriana Goulart dos Santos, por me instruir ao longo dessa jornada, pela orientação na elaboração deste trabalho, e principalmente, pela compreensão e dedicação para comigo no decorrer do curso.

Ao PPGEC da UDESC, pela oportunidade de crescimento acadêmico, profissional e pessoal. Estendo aqui meu agradecimento a todos os professores e servidores do programa, por todo o conhecimento transmitido e solicitações atendidas.

Aos incríveis profissionais Daniela, Diogo, Matheus e Juliano pelo exímio cuidado com minha saúde física e mental no decorrer deste último ano.

A todos os amigos e familiares, pelos momentos de descontração, que são essenciais.

A UDESC e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

As empresas Azimute, Geoforma, Infrasul e Pavesys, que disponibilizaram equipamentos e pessoal para a realização dos ensaios de campo.

*“You never know how strong you are,
until being strong is your only choice”.*

Bob Marley (1945 – 1981)

RESUMO

A deflexão de um pavimento flexível é um importante indicador de sua capacidade estrutural, e os ensaios não destrutivos são amplamente utilizados na medição dessas deflexões e na determinação dos módulos resilientes das camadas através de processos de retroanálise. Conhecidos os parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento, é possível verificar, através da análise de tensões e deformações, e de modelos de previsão de desempenho, o número de repetições de cargas que levam o pavimento à ruptura por fadiga e/ou ruptura plástica. A simulação numérica com o emprego do método dos elementos finitos (MEF), é uma das técnicas que tem se destacado para determinação das tensões e deformações do pavimento durante a aplicação de uma carga externa. No Brasil, os equipamentos mais utilizados em ensaios não destrutivos são: o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e a viga Benkelman, e apesar do princípio de funcionamento ser similar, as medidas aferidas em um mesmo ponto são distintas devido às diferentes técnicas de execução e carregamentos aplicados. Essa pesquisa objetiva contribuir com estudos que correlacionam os resultados obtidos por estes dois equipamentos, comparando as tensões e deformações de um pavimento flexível, simulado com o MEF, considerando os diferentes módulos resilientes equivalentes – M_{Reqv} obtidos com a retroanálise das deflexões aferidas com o FWD e viga Benkelman. Foram utilizados os resultados dos ensaios realizados com os dois equipamentos em 110 pontos, distribuídos em seis trechos, de uma rodovia de pavimento flexível, situada em Santa Catarina e constituída por uma estrutura tipicamente empregada nos pavimentos do estado. A partir dos M_{Reqv} obtidos pela retroanálise das deflexões foram simulados doze modelos estruturais numéricos da rodovia, sendo um modelo por segmento e por ensaio, no *software* ABAQUS. Os resultados das tensões e deformações foram comparados entre si, avaliando a diferença na resposta estrutural do pavimento, com a análise foi possível perceber que não há padrão de comportamento entre os valores de deflexão obtidos em campo e os valores de tensão e deformação dos modelos estruturais numéricos. Também foi realizada uma contagem volumétrica do tráfego para estimar o número N , e a partir dos modelos propostos por Guimarães (2009) e Fritzen adaptado para o MeDiNa avaliou-se o afundamento permanente e o percentual de área trincada estimados a partir dos modelos estruturais numéricos formulados para o FWD e para a viga Benkelman. Constatou-se que as deformações permanentes provenientes dos modelos FWD são estatisticamente iguais às obtidas pelos modelos da viga Benkelman, e que esta não será a causa de ruptura do pavimento ao fim de sua vida útil. Quanto ao percentual de área trincada observou-se que esta é mais suscetível aos valores de deflexões aferidos em campo, desta forma, ao comparar os modelos numéricos verificou-se que, nos trechos da rodovia que já estavam consolidados os resultados de trincamento foram semelhantes, já para os segmentos em consolidação as diferenças foram significativas, ao ponto de o FWD indicar a ruptura por fadiga e a viga Benkelman não.

Palavras-chave: FWD. Viga Benkelman. Tensões. Deformações. MEF.

ABSTRACT

The deflection of a flexible pavement is an important indicator of its structural capacity, and non-destructive tests are widely used in the measurement of these deflections and in the determination of the resilient modules of the layers through back-calculation processes. With the deformability parameters of the pavement layers, it is possible to verify through the analysis of stresses and deformations and of performance prediction models, the number of repetitions of loads that to leave the pavement to fatigue and his permanent deformation. Numerical simulation using the finite element method (FEM) is one of the techniques that enable determining the stresses and deformations of the pavement during the application of an external load. In Brazil, the most used equipment in non-destructive tests are the Falling Weight Deflectometer (FWD) and the Benkelman beam, and despite the operating principle being similar, the measurements taken at the same point are different because the different execution techniques and applied loads. This research contributes to studies that correlate the results obtained by this two equipment, comparing the stresses and strains of a flexible pavement, simulated with the FEM, considering the different equivalent resilient modules - R_{Meqv} obtained with the back-calculation of the deflections measured with the FWD and Benkelman beam. The results of the tests conducted with the two equipment in 110 points, distributed in six segments of a flexible pavement highway, located in Santa Catarina and constituted by a structure typically used in the pavements of the state. Twelve numerical structural models of the highway were simulated from the R_{Meqv} obtained by the back-calculation of the deflections, one model per segment and per test, in the ABAQUS software. The results of stresses and strains were compared, evaluating the difference in the structural response of the pavement, with the analysis it was possible to notice that there is no pattern of behavior between the deflection values obtained in the field and the stress and strain values of the structural models numeric. A volumetric count of the traffic was also conducted to estimate the number N , and from the models proposed by Guimarães (2009) and Fritzen adapted to the MeDiNa, the permanent deformation and the percentage of cracked area was estimate from the numerical structural models formulated for the FWD and for the Benkelman beam. It was found that the permanent deformations from the FWD models are statistically equal to those obtained by the Benkelman beam models, and that this will not be the cause of failure of the pavement at the end of its useful life. As for the percentage of cracked area, it was observed that this is more susceptible to the values of deflections measured in the field, thus, when comparing the numerical models, it was found that, in the stretches of the highway that were already consolidated, the cracking results were similar, for the segments undergoing consolidation, the differences were significant then that the FWD indicates fatigue failure and the Benkelman beam does not.

Keywords: FWD. Benkelman Beam. Stresses. Strains. FEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico.....	25
Figura 2 – Esquema do ensaio do coeficiente de <i>Poisson</i>	26
Figura 3 – Modelo esquemático de registro das deformações após a aplicação de uma carga.....	28
Figura 4 – Modelos do FWD e representação das deflexões.....	32
Figura 5 – Esquema da viga Benkelman (a) e do ensaio em campo (b).....	33
Figura 6 – Viga Benkelman automatizada desenvolvida pela COPPE/UFRJ ..	34
Figura 7 – Gráfico das tensões e deformações de tração obtidas por Gomes (2012)	38
Figura 8 – Gráfico das tensões e deformações de compressão obtidas por Gomes (2012).....	39
Figura 9 – Comparativo entre as deflexões aferidas com o FWD e com a Viga Benkelman no ponto D ₀	41
Figura 10 – Deformação em materiais granulares durante um ciclo de aplicação de carga.....	42
Figura 11 – Configuração de elementos finitos em uma estrutura estratificada	44
Figura 12 – Tipos de Elementos Finitos	45
Figura 13 – Discretização do contínuo em elementos finitos	46
Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas	57
Figura 15 – Mapa de localização dos municípios: Araquari e Joinville.....	58
Figura 16 – Mapa da rodovia Rio do Morro	59
Figura 17 – Composição das camadas da rodovia	60
Figura 18 – Marcação dos pontos de teste na pista.....	61
Figura 19 – Equipamento FWD utilizado nos ensaios.....	62
Figura 20 – Realização do ensaio com a viga Benkelman.....	62
Figura 21 – Realização da contagem de tráfego.....	63
Figura 22 – Conversão de carregamento e das deflexões da viga Benkelman	65
Figura 23 – Modelo da estrutura e sua disposição espacial.....	70
Figura 24 – Modelo de malha utilizado nas simulações	70
Figura 25 – Dimensões dos elementos da malha	71
Figura 26 – Eixo padrão rodoviário	72

Figura 27 – Modelo do carregamento e das condições de contorno.....	72
Figura 28 – Pontos de análise das tensões e deformações.....	75
Figura 29 – Valores de ε_t obtidos na camada de revestimento	81
Figura 30 – Valores de ε_c obtidos na camada de base	82
Figura 31 – Valores de ε_c obtidos na camada de sub-base	83
Figura 32 – Valores de ε_c obtidos na camada do conjunto subleito	84
Figura 33 – Valores de σ_t obtidos na camada de revestimento.....	85
Figura 34 – Valores σ_c obtidos na camada de base.....	85
Figura 35 – Valores de σ_c obtidos na camada de sub-base.....	86
Figura 36 – Valores de σ_c obtidos na camada do conjunto subleito.....	86
Figura 37 – Valores de $\delta_{P\ TOTAL}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro de aplicação de carga – combinação 1	92
Figura 38 – Valores de $\delta_{P\ TOTAL}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro de aplicação de carga – combinação 2	95
Figura 39 – Valores de $\delta_{P\ TOTAL}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro da roda – combinação 1	98
Figura 40 – Valores de $\delta_{P\ TOTAL}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro da roda - combinação 2	100
Figura 41 – Valores de %AT para os modelos FWD e VB	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores usuais de coeficiente de <i>Poisson</i>	27
Tabela 2 – Modelos constitutivos do comportamento do módulo resiliente de algumas classes de materiais.....	29
Tabela 3 – Modelos de regressões entre VB e FWD propostos por Borges 2001	37
Tabela 4 – Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e FWD..	40
Tabela 5 – Segmentação da Rodovia	61
Tabela 6 – Parâmetros informados no BackMeDiNa para retroanálise.....	66
Tabela 7 – Espessuras e propriedades mecânicas do pavimento consideradas nos modelos estruturais numéricos	69
Tabela 8 – Pontos de análise e tipos de tensões e deformações analisadas ..	74
Tabela 9 – Propriedades dos materiais granulares considerados para o cálculo da deformação permanente – combinação 1	76
Tabela 10 – Propriedades dos materiais granulares considerados para o cálculo da deformação permanente – combinação 2	77
Tabela 11 – Resumo da contagem de tráfego	79
Tabela 12 – NAASHTO e NUSACE determinados para os anos de 2020 a 2034	80
Tabela 13 – % de variação dos valores obtidos com os modelos FWD em relação aos modelos VB considerando o centro de aplicação de carga.....	87
Tabela 14 – Valores de σ_d , σ_3 , ϵ^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro de aplicação de carga – combinação 1	90
Tabela 15 – Valores de σ_d , σ_3 , ϵ^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro de aplicação de carga – combinação 2	93
Tabela 16 – Valores de σ_d , σ_3 , ϵ^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro da roda – combinação 1	96
Tabela 17 – Valores de σ_d , σ_3 , ϵ^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro da roda – combinação 2	98
Tabela 18 – Valores de $D_{médio}$, fS , N' e %AT para os modelos FWD	103
Tabela 19 – Valores de $D_{médio}$, fS , N' e %AT para os modelos VB.....	104
Tabela 20 – Variação entre os %AT obtidos pelos modelos FWD em relação aos modelos VB considerando as 4 classes de misturas asfálticas	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

AASHTO	<i>American association of state highway and transportation officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	<i>Asphalt Institute</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ATR	Afundamento de trilha de roda
BGS	Brita graduada simples
CAE	<i>Computer aided engineering</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBR	<i>California bearing ratio</i>
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
CNT	Confederação nacional do transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa em engenharia
DEINFRA-SC	Departamento estadual de infraestrutura de Santa Catarina
DER-SP	Departamento de estradas e rodagem de São Paulo
DNER	Departamento nacional de estradas de rodagem
DNIT	Departamento nacional de infraestrutura de transportes
EAC	Engenharia assistida por computador
FCL	Fator de campo laboratório
FEC	Fator equivalente de Carga
FT	Função de transferência
FWD	<i>Falling weight deflectometer</i>
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
IPR	Instituto de pesquisas rodoviárias
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal

LCPC	<i>Laboratoire central des ponts et chaussées</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
m	Metro
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
ME	Método de ensaio
MeDiNa	Método de dimensionamento nacional
MEF	Método dos elementos finitos
MG	Minas Gerais
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
M _R	Módulo resiliente ou módulo de resiliência
MReqv	Módulo resiliente equivalente
ms	Milissegundo
N	Número equivalente de passagens do eixo padrão rodoviário
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PRO	Procedimentos
RMS	<i>Root-mean-square</i>
SC	Santa Catarina
SENAT	Serviço nacional de aprendizagem do transporte
SEST	Serviço social do transporte
tf	Tonelada-força
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VMD	Volume médio diário
μm	Micrometro

LISTA DE SÍMBOLOS

%AT	Percentual de área trincada
°C	Grau Celsius
{F}	Vetor de cargas nodais
[K]	Matriz de rigidez global da estrutura
{δ}	Vetor de deslocamentos nodais
CV	Coeficiente de variação
D	Deflexão
D ₀	Deflexão medida sob o centro de aplicação da carga
D _{médio}	Dano médio
D _{FWD}	Deflexão do FWD
D _{VB}	Deflexão da viga Benkelman
f	Frequência
fS	Fator deslocamento
h	Altura
h _{CA}	Altura da camada asfáltica
k ₁ , k ₂	Parâmetros da curva de fadiga
L _i	Leitura inicial
L _f	Leitura final
N'	Número N equivalente deslocado (ou ajustado)
N _f	Número de aplicações de carga até a ruptura por fadiga
N _{lab}	Vida de fadiga em laboratório
p	Pressão de contato entre superfícies
r	Coeficiente de correlação de Pearson
R ²	Coeficiente de determinação
Sd	Desvio padrão amostral
T	Temperatura
t	Tempo
δ _{max}	Deslocamento máximo
δ _P	Afundamento permanente
δ _{P TOTAL}	Afundamento permanente total
ε	Deformação específica
ε _c	Deformação específica de compressão

ε^{esp}	Deformação específica (%)
ε_h	Deformação específica horizontal
ε_t	Deformação específica de tração
ε_p^{esp}	Deformação permanente específica
ε_v	Deformação específica vertical
θ	Tensão octaédrica
μ	Coeficiente de atrito
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
σ_3	Tensão confinante
σ_c	Tensão de compressão
σ_d	Tensão desvio
σ_t	Tensão de tração
τ_{crit}	Tensão crítica de cisalhamento
$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$	Parâmetros do modelo de deformação permanente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral.....	23
1.2.2	Objetivos específicos.....	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	24
2.1.1	Mecânica dos pavimentos	24
2.1.1.1	<i>Coeficiente de Poisson</i>	26
2.1.1.2	<i>Módulo de resiliência</i>	27
2.1.1.3	<i>Abordagem elástica linear</i>	30
2.1.2	Ensaios utilizados na avaliação estrutural de pavimentos flexíveis	30
2.1.2.1	<i>Falling weight deflectometer – FWD</i>	31
2.1.2.2	<i>Viga Benkelman.....</i>	33
2.1.3	Módulos resilientes equivalentes obtidos por retroanálise	35
2.2	ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE O FWD E A VIGA BENKELMAN	36
2.2.1	Correlações das deflexões D_0 propostas por Pinto (1991) e Borges (2001).....	36
2.2.2	Comparação das tensões e deformações de tração e de compressão obtidas por Gomes (2012)	37
2.2.3	Comparação e correlações das deflexões e dos módulos resilientes retroanalizados realizadas por Nery (2020).....	39
2.3	DEFORMAÇÕES E FADIGA DO PAVIMENTO	42
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF	43
2.4.1	Tipos de elementos e discretização da malha.....	44
2.4.2	Modelagem espacial.....	46
2.5	ABAQUS	47
2.6	MODELOS DE RUPTURA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS	48
2.6.1	Modelo proposto por Franco.....	49

2.6.2	Modelo proposto por Pinto.....	50
2.6.3	Modelo proposto pelo <i>Asphalt Institute</i> – AI.....	50
2.6.4	Modelo proposto pelo <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i> – LCPC.....	51
2.6.5	Modelo de cálculo de deformação permanente proposto por Guimarães (2009).....	51
2.6.6	Modelo de previsão de área trincada desenvolvido por Fritzen e adaptado para o MeDiNa.....	53
3	METODOLOGIA	57
3.1	DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	58
3.2	ATIVIDADES EM CAMPO.....	60
3.2.1	Realização dos ensaios com o FWD e com a viga Benkelman	60
3.2.2	Contagem do tráfego	63
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS DE DEFLEXÃO E DETERMINAÇÃO DO MÓDULO RESILIENTE EQUIVALENTE	64
3.4	CÁLCULO DO NÚMERO N.....	67
3.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	68
3.5.1	Definição das dimensões e das propriedades mecânicas	68
3.5.2	Modelagem	69
3.5.3	Malha de elementos finitos	70
3.5.4	Carregamento e condições de contorno	71
3.5.5	Aderência entre as camadas	73
3.6	TENSÕES E DEFORMAÇÕES.....	74
3.7	ESTIMATIVA DO AFUNDAMENTO PERMANENTE E DA ÁREA TRINCADA AO FIM DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO	75
3.7.1	Estimativa e comparação do afundamento permanente do pavimento	75
3.7.2	Percentual de área trincada	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1	CONTAGEM DE TRÁFEGO E DETERMINAÇÃO DO NÚMERO N.....	79
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES E DEFORMAÇÕES OBTIDAS PELOS MODELOS ESTRUTURAIS NUMÉRICOS.....	80
4.2.1	Deformações de tração e de compressão	80

4.2.2	Tensões de tração e compressão	84
4.2.3	Variação percentual entre as deformações e as tensões	87
4.3	ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES DAS CAMADAS GRANULARES OBTIDAS PELOS MODELOS ESTRUTURAIS NUMÉRICOS	90
4.3.1	No centro de aplicação da carga.....	90
4.3.2	No centro da roda.....	95
4.3.3	Síntese dos resultados de afundamento permanente	101
4.4	ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DO PERCENTUAL DE ÁREA TRINCADA.....	102
5	CONCLUSÕES	109
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	111
5.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	112
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – DADOS DO ENSAIO COM A VIGA BENKELMAN	123
	APÊNDICE B – DADOS DA CONTAGEM DE TRÁFEGO	127
	APÊNDICE C – TESTE DE NORMALIDADE E TESTE T DE STUDENT	128
	ANEXO A – DADOS DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE	137
	ANEXO B – DADOS DO ENSAIO COM O FWD.....	146
	ANEXO C – LEITURA DAS DEFLEXÕES CORRIGIDAS PARA A TEMPERATURA DE 25°C	149
	ANEXO D – MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES RETROANALISADOS A PARTIR DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM O FWD	151
	ANEXO E – MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES RETROANALISADOS A PARTIR DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN	157
	ANEXO F – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO FWD.....	163
	ANEXO G – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA VIGA BENKELMAN	164

1 INTRODUÇÃO

A manutenção de uma via pavimentada é fundamental para garantir a segurança dos usuários, a integridade dos veículos e economicidade do transporte rodoviário. Conforme pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte – CNT, Serviço Social do Transporte – SEST e Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte – SENAT (2021), no Brasil o transporte rodoviário era responsável por cerca de 65% da movimentação de cargas e 95% do deslocamento de pessoas, devido a sua participação significativa, este modal é um dos principais fatores que estimulam o crescimento e o desenvolvimento regional.

O pavimento rodoviário, segundo Pinto e Preussler (2002) é visto pelos usuários como uma superfície que suporta o tráfego oferecendo conforto e segurança a esses, e sob o ponto de vista da engenharia é considerado uma estrutura de multicamadas sujeita a aplicação de cargas que devem ser distribuídas ao longo desta, de modo que a capacidade de suporte dos materiais constituintes não seja ultrapassada.

Os pavimentos são, usualmente, classificados como flexíveis e rígidos, essa diferenciação se dá, principalmente, pelo tipo de material empregado no revestimento, sendo os flexíveis constituídos por material asfáltico e os rígidos por concreto de cimento *Portland* (CNT, 2017; MEDINA; MOTTA, 2015).

No Brasil, há a predominância de pavimentos flexíveis nas rodovias, e segundo dados de uma pesquisa realizada pela CNT (2017), o horizonte de projeto dessas estruturas é da ordem de 8 a 12 anos, ou seja, durante esse período a integridade da estrutura, a segurança e o conforto dos usuários devem ser garantidos, porém, a pesquisa revelou registros de vias que apresentaram problemas estruturais sete meses após a sua inauguração.

Nos últimos anos, conforme Machado (2019), o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, a Agência Nacional de Petróleo – ANP, a Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, entre outros órgãos rodoviários e universidades brasileiros têm desenvolvido um método mecanístico-empírico condizente com o real comportamento dos solos e materiais de pavimentação empregados no Brasil, aprofundando-se na

mecânica dos pavimentos para elaboração de modelos de previsão do comportamento da estrutura.

Embora a metodologia mecanística-empírica para dimensionamento e reforço de pavimentos tenha avançado significativamente com o lançamento da versão teste do Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa (programa computacional disponibilizado pelo DNIT em 2018), muitos dos pavimentos brasileiros existentes foram e ainda são projetados pelo método empírico, baseado no modelo da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, adaptado para o Brasil pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza em 1966, cuja determinação das espessuras mínimas de cada camada depende do tráfego e, do tipo e capacidade de suporte dos materiais empregados, esta última avaliada pelo *California Bearing Ratio* – CBR.

Torna-se, portanto, necessário pesquisar métodos para avaliar o desempenho estrutural dessa malha viária existente, utilizando a análise mecanística-empírica para estudar o comportamento de tensões e deformações do pavimento, provendo informações que possam auxiliar na gestão dessas estruturas.

Na gestão de pavimentos, a tomada de decisões sobre a realização das manutenções depende da estimativa das condições da rodovia. Essa avaliação do pavimento é realizada através de modelos de desempenho que estimam as condições funcionais e estruturais deste, considerando os fatores que geraram sua deterioração (YSHIBA; FERNANDES JR., 2005).

A avaliação dos pavimentos, de acordo com Bourahli e Jacques (2010), é a identificação e a quantificação das degradações existentes na estrutura, durante o processo avaliativo verificam-se a funcionalidade e a condição estrutural do pavimento.

Do ponto de vista funcional, Bernucci *et al.* (2010) mencionam que, o pavimento precisa garantir a trafegabilidade em quaisquer condições climáticas, mantendo o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários, assegurando um desempenho adequado da via no decorrer de sua vida útil. Sobre o aspecto estrutural, Fuentes *et al.* (2019) apresentam o conceito de utilidade, usado para avaliar as condições dos pavimentos, quantificando a capacidade que uma seção de pavimento tem para suportar o tráfego, dada sua condição atual.

Quando se trata de grandes extensões de rodovias, Bernucci *et al.* (2010) mencionam que, os métodos mais adequados para estimar a capacidade estrutural das rodovias são os ensaios não destrutivos, que possibilitam várias repetições no mesmo ponto permitindo o acompanhamento da resposta estrutural do pavimento com o passar do tempo.

São raras as situações de rompimento súbito de estruturas de pavimento, conforme Souza Jr. (2018), os trincamentos por fadiga e os afundamentos de trilhas de roda são os principais defeitos que deterioram a capacidade estrutural do pavimento, esses por sua vez são oriundos das deformações totais provocadas pela ação do tráfego sobre a superfície do pavimento.

Conhecidos os parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento, é possível verificar, através da análise das tensões e deformações destas, o número de repetições de cargas que levam o pavimento à ruptura por fadiga e/ou ruptura plástica (MEDINA; MOTTA, 2015).

Uma das técnicas que tem se destacado para determinação de tensões e deformações do pavimento asfáltico é o Método dos Elementos Finitos – MEF. Este permite a modelagem de geometrias bidimensionais, tridimensionais, deformações, análises dinâmicas, entre outras que podem contribuir com a análise do desempenho do pavimento (BORDIM, 2010; SCHWARTZ, 2002).

Medina e Motta (2015) complementam que, a utilização de abordagens numéricas, como o MEF, permite economia de tempo e maior versatilidade nas análises, visto que, permite eliminar simplificações adotadas em modelos analíticos.

Uma das condições que podem ser modeladas com o MEF, é a aderência entre as camadas do pavimento. Sobre essa condição, Santos, Assis e Fernandes Jr. (2019) destacam que, o programa computacional ABAQUS, baseado no MEF, vêm sendo empregado na simulação de tensões e deformações dos pavimentos, devido a possibilidade de modelagem de contato entre as camadas, permitindo assim a definição da condição de aderência entre estas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Goel e Das (2008) afirmam que: a avaliação estrutural dos pavimentos permite estimar a capacidade atual do pavimento e averiguar se atende a solicitação

demandada, determinar a vida útil da estrutura e, auxiliar na escolha de procedimentos para a manutenção das vias degradadas.

Segundo Marecos *et al.* (2017) e Saleh (2016), inspeções rodoviárias normalmente avaliam as trincas, irregularidades superficiais e resistência à derrapagem, entretanto, é necessário observar além da superfície, avaliando a condição estrutural do pavimento, para obtenção de um diagnóstico completo da estrutura. Liao *et al.* (2019), complementam que a deflexão do pavimento é um importante indicador de sua capacidade estrutural, e que os equipamentos *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e viga Benkelman são amplamente utilizados na medição das deflexões.

Salviano e Motta (2015) relatam que a viga Benkelman é o equipamento mais conhecido pelos engenheiros e projetistas brasileiros, sendo utilizado desde os anos 70, e embora seja muito simplificado ainda é muito comum o seu uso no país. Já o FWD passou a ser empregado no Brasil na década de 90, trata-se de um equipamento mais versátil e moderno que a viga Benkelman, proporciona uma melhor precisão, porém, este equipamento requer calibração em centros específicos e ainda possui poucas unidades disponíveis no Brasil, segundo Rodrigues (2018) havia 8 equipamentos em 2015.

Apesar do princípio de funcionamento ser similar, buscando representar os efeitos de uma carga atuando no pavimento, as deflexões obtidas pela viga Benkelman e pelo FWD em um mesmo ponto são distintas, devido as diferentes técnicas de execução e carregamentos aplicados (GOMES, 2012; MAGALHÃES, 2015).

Pesquisas buscando comparar e correlacionar as deflexões obtidas com ambos os equipamentos, bem como os módulos resilientes equivalentes (MReqv) obtidos a partir do processo de retroanálise das bacias deflectométricas, foram desenvolvidas por Borges (2001), Gomes (2012), Magalhães (2015), entre outros autores.

Entretanto, Gomes (2012), ressalta que são crescentes as pesquisas de deformabilidade elástica dos pavimentos, sendo o pavimento analisado pelas tensões e deformações internas, geradas durante a aplicação de uma carga externa.

Diante do exposto, Nery (2020) iniciou os estudos em uma rodovia constituída por materiais tipicamente empregados na pavimentação catarinense, buscando

determinar e correlacionar as deflexões e os módulos obtidos com os ensaios utilizando a viga Benkelman e o FWD.

Logo essa pesquisa visa complementar os estudos iniciados por Nery (2020), propondo uma simulação numérica do pavimento, com o MEF, para avaliar a diferença na resposta estrutural do pavimento, em termos de tensões e deformações, considerando os módulos resilientes equivalentes obtidos por retroanálise das medidas de deflexão aferidas por cada equipamento. Contribuindo, através da análise mecanística-empírica, com estudos que buscam comparar os resultados do FWD e da viga Benkelman.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar a resposta estrutural de um pavimento flexível sob ação do eixo padrão rodoviário, simulado com o MEF, considerando os diferentes módulos resilientes equivalentes obtidos com a retroanálise dos dados de deflexão aferidos com o FWD e com a viga Benkelman.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Propor modelos numéricos estruturais de um pavimento flexível;
- b) Estimar e comparar o afundamento permanente total ($\delta_{P \text{ TOTAL}}$) do pavimento ao final de sua vida útil, considerando os modelos estruturais numéricos simulados;
- c) Estimar e comparar o percentual de área trincada (%AT) do pavimento ao final de sua vida útil, considerando os modelos estruturais numéricos simulados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo destina-se a apresentação de conceitos e definições sobre os assuntos abordados nesta pesquisa.

2.1 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

As estruturas de pavimentos flexíveis, geralmente, rompem pelo acúmulo de danos estruturais e funcionais, com o decorrer de sua utilização pelo tráfego. A parcela estrutural destes danos está diretamente ligada a capacidade de suporte do pavimento, que pode ser estimada através da caracterização dos materiais e das espessuras de suas camadas e de métodos de engenharia que avaliam seu desempenho (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Francisco (2012) argumenta que, a avaliação da capacidade estrutural do pavimento pode ser realizada por métodos empíricos com a observação do comportamento dos pavimentos ou por métodos analíticos através do estudo dos parâmetros relacionados a capacidade de carga. Balbo (2007) também menciona que, através da avaliação estrutural é possível averiguar a integridade das camadas que se encontram abaixo do revestimento, cujos defeitos geralmente não são apontados pela avaliação visual da superfície.

2.1.1 Mecânica dos pavimentos

Os modelos mais recentes de avaliação estrutural de pavimentos estão baseados nos conceitos de mecânica dos pavimentos. Esta baseia-se nas teorias da mecânica do contínuo, da mecânica dos solos e da mecânica da fratura, para compreender o comportamento do sistema de camadas, e estabelecer uma base racional para os projetos de pavimentos (ÁVILA, 2008).

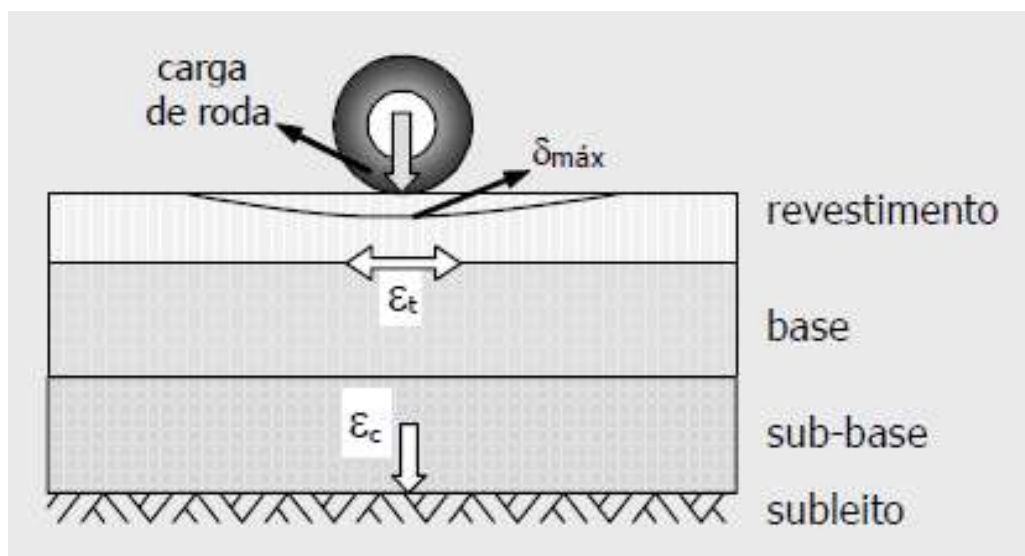
A mecânica dos pavimentos, conforme Medina e Motta (2015), estuda os pavimentos como um sistema de camadas, sujeito às cargas dos veículos. A partir dos parâmetros de deformabilidade obtidos dos materiais, calculam-se as tensões, deformações e deslocamentos. Ávila (2008, p. 39) complementa que: “O objetivo da Mecânica dos Pavimentos é projetar um pavimento considerando o estado de tensões

e deformações atuantes, compatibilizando-os com as admissíveis ou resistentes, para um período de projeto e condição de serventia”.

A mecânica dos pavimentos é empregada nos métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos, o qual utiliza as respostas estruturais (tensões e deformações) para estabelecer critérios de ruptura a partir de formulações obtidas com dados de ensaios de laboratório e desempenho em campo (HUANG, 2004).

Franco (2007) argumenta que o pavimento asfáltico é representado por um meio estratificado, submetido a um carregamento distribuído na área de contato entre o pneu e o pavimento, simplificada, considera-se esta área como uma superfície circular. Determinadas as espessuras das camadas, os módulos resilientes e os coeficientes de *Poisson* dos materiais que compõem a estrutura, e as cargas do tráfego que atuam sobre o pavimento, pode-se estimar a resposta do pavimento através das tensões e deformações apresentadas pela estrutura, utilizando a teoria da elasticidade. A Figura 1 apresenta as principais deformações e deslocamentos atuantes no interior de um pavimento, onde $\delta_{\text{máx}}$, ϵ_t , e ϵ_c são, respectivamente, deslocamento máximo, deformação específica de tração e deformação específica de compressão.

Figura 1 – Representação das deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico



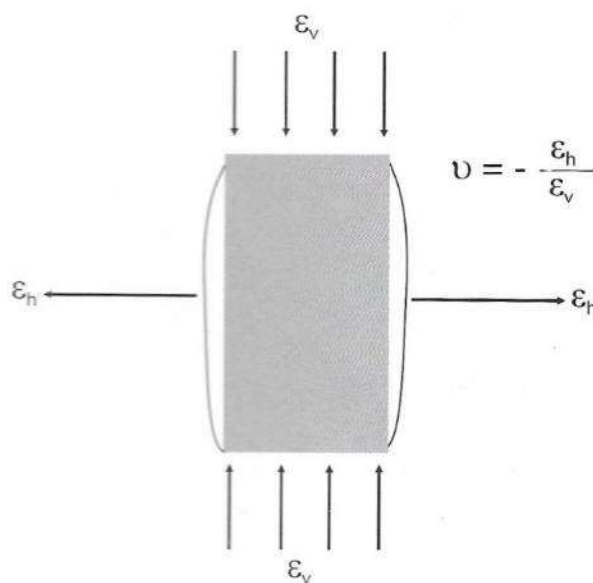
Fonte: Franco, (2007).

A caracterização do comportamento dos materiais é feita através de duas propriedades mecânicas: o coeficiente de *Poisson* (ν) e o módulo de resiliência (M_R), entretanto, este último parâmetro não é constante (YAO *et al.*, 2012). A variedade de fatores que afetam as propriedades dos materiais de pavimentação (condições climáticas, intensidade e duração da aplicação das cargas dos veículos, estado de tensões ao qual o material é submetido, entre outros), tornam sua caracterização uma tarefa complexa (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.1.1.1 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson (ν) é determinado pela relação entre a deformação específica vertical (ϵ_v) imposta ao material e a deformação específica horizontal (ϵ_h) sofrida por este, durante um ensaio de compressão uniaxial, conforme ilustra a Figura 2. Esse valor é considerado constante (DER-SP, 2006; BALBO, 2007).

Figura 2 – Esquema do ensaio do coeficiente de *Poisson*



Fonte: Balbo (2007).

Este valor é, usualmente, adotado para cada material quando se utilizam programas para cálculo de tensões e deformações (NÓBREGA, 2003). A Tabela 1 apresenta valores usuais de ν para os materiais de pavimentação.

Tabela 1 – Valores usuais de coeficiente de *Poisson*

Material	Intervalo de valores de ν	Valor recomendado de ν
Concreto de cimento <i>Portland</i>	0,10 – 0,20	0,15 / 0,20 (NBR 6118)
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: DER/SP (2006) e ABNT (2014).

Nóbrega (2003) ressalta que a influência do ν nos valores de tensões e deformações é pequena, com exceção das deformações radiais (horizontais), as quais lhe são proporcionais.

2.1.1.2 Módulo de resiliência

A deterioração prematura apresentada na malha rodoviária, provocada pela ação dinâmica do tráfego, introduziu no Brasil os estudos da resiliência dos materiais de pavimentação (DNIT, 2006a).

Medina e Motta (2015) relatam que Francis Hveen foi o pioneiro nos estudos sobre a deformabilidade, entendia ele que o trincamento no revestimento asfáltico era decorrente da deformação resiliente (elástica) que ocorriam nas camadas subjacentes. Como as deformações apresentadas pelos pavimentos são maiores do que as verificadas em outros sólidos, Hveen optou pelo termo deformação resiliente ao invés de deformação elástica. Dessa forma, a deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos submetidos a carregamentos repetidos (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O módulo de resiliência é a grandeza física que quantifica a propriedade resiliente de um determinado material (ÁVILLA, 2008). Balbo (2007) complementa que este pode ser obtido através de ensaios em laboratório. O módulo de resiliência é determinado baseando-se no princípio da Equação 1.

$$M_R = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

Onde:

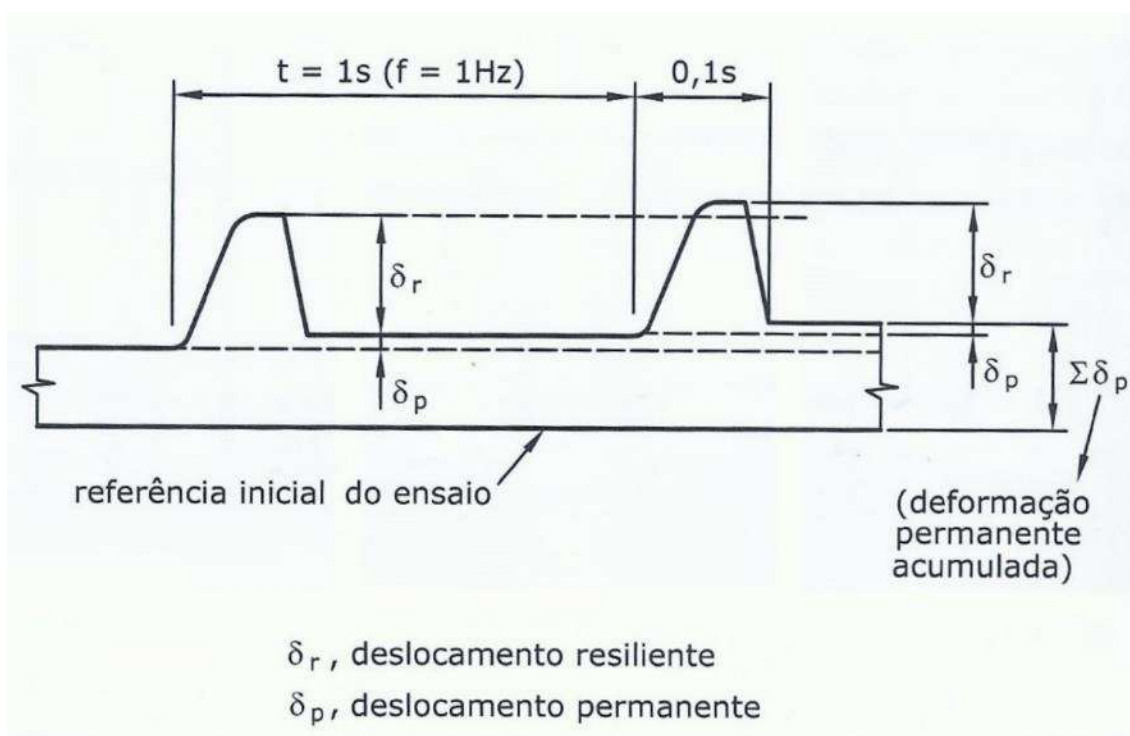
M_R – módulo resiliente do material;

$\Delta\sigma$ – incrementos de tensão aplicada;

$\Delta\varepsilon$ – incrementos de deformação específica sofrida.

DNIT (2006a) e Balbo (2007) ressaltam que as deformações são consideradas resilientes por serem recuperáveis, entretanto, os materiais não apresentam, obrigatoriamente, valores de módulos constantes conforme ilustrado da Figura 3.

Figura 3 – Modelo esquemático de registro das deformações após a aplicação de uma carga



Fonte: Medina e Motta (2015)

Fernandes Jr. (1994), menciona que misturas asfálticas são sensíveis à duração da aplicação da carga e às variações de temperaturas; os materiais granulares e os solos coesivos, por sua vez, têm sua rigidez variada em função do estado de tensões ao qual são submetidos e da presença de água nas camadas compostas por estes materiais.

Portanto, a partir do comportamento dos materiais observado em ensaios de laboratório foram desenvolvidos modelos constitutivos distintos para diferentes

classes de materiais. A Tabela 2 apresenta alguns modelos propostos por pesquisadores, para classes de materiais utilizados no Brasil.

Tabela 2 – Modelos constitutivos do comportamento do módulo resiliente de algumas classes de materiais

Classe	Material	Modelo
0	Asfáltico	$M_R = f(t^\circ C) \text{ e } f(f \text{ e } t \text{ de aplicação da carga})$
1	Granular	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
2	Argiloso	$M_R = \begin{cases} k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d), & \forall k_1 > \sigma_d \\ k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1), & \forall k_1 \leq \sigma_d \end{cases}$
3	Misturas asfálticas, solo cimentado de módulo elevado ou solo siltoso de módulo baixo	$M_R = \text{constante}$
4	Solos arenosos com bastante argila e solos lateríticos finos	$M_R = \begin{cases} [k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d)] \cdot \sigma_3^{k_5}, & \forall k_1 > \sigma_d \\ [k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1)] \cdot \sigma_3^{k_5}, & \forall k_1 < \sigma_d \end{cases}$
5	Granular (dependente da tensão desvio)	$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$
6	Argiloso (dependente da tensão desvio)	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
7	Solos e britas em geral	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$

Fonte: Motta, 1991; Silva, 1995; Aedo 1997; Medina e Motta, 2005 (*apud* Franco, 2007).

Onde:

t – é a temperatura;

k₁, k₂, k₃, k₄ e k₅ – são constantes obtidas em laboratório;

σ₃ – é a tensão confinante;

σ_d – é a tensão desvio (resultante de σ₁ - σ₃);

θ – é a tensão octaédrica (1/3 da soma das tensões principais σ₁ + σ₂ + σ₃).

A partir dos modelos apresentados, os módulos resilientes dos materiais são obtidos em laboratório através dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para os materiais granulares, conforme norma DNIT 134/2018-ME (2018a).

Já para os materiais asfálticos, são utilizados os ensaios de compressão diametral de carregamento repetido, conforme norma DNIT 183/2018-ME (2018b), e buscam determinar o módulo resiliente e o estado de tensões dos materiais a uma temperatura fixa de 25°C.

2.1.1.3 Abordagem elástica linear

O pavimento asfáltico é uma estrutura estratificada composta por materiais diferentes com propriedades distintas, sendo que estes podem apresentar comportamentos: elásticos lineares e não lineares, viscoelásticos, plásticos. Portanto, seu comportamento estrutural é de difícil previsão (YASSEN *et al.*, 2015).

A rigidez do revestimento asfáltico depende da temperatura, mas, admite-se a simplificação do comportamento elástico linear para temperaturas inferiores a 30°C (MEDINA; MOTTA, 2015).

É fato que os materiais granulares e os solos não apresentam comportamentos elásticos lineares, entretanto, sob a repetição da aplicação de cargas de tráfego, a maior parte das deformações são recuperáveis, portanto o modelo elástico linear pode ser considerado dada a sua praticidade (HUANG, 2004).

Balbo (2007) defende a teoria de camadas elásticas, pois, esta permite a determinação de estados de tensões e deformações em vários pontos das camadas, possibilitando a utilização dos modelos de degradação por fadiga ou afundamento permanente dos materiais.

2.1.2 Ensaios utilizados na avaliação estrutural de pavimentos flexíveis

Os ensaios utilizados na avaliação estrutural dos pavimentos podem ser: destrutivos, semidestrutivos e não destrutivos.

Ensaios destrutivos, conforme Balbo (2007), consistem na retirada de amostras do pavimento para a caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas e determinação das espessuras das camadas. Com as amostras coletadas, os ensaios de laboratório podem determinar a composição das camadas, a massa específica, a umidade, a curva granulométrica, a caracterização Miniatura, Compactado, Tropical – MCT dos materiais, e a partir de amostras indeformadas podem ser obtidos, em laboratório, os parâmetros de resistência e deformação.

Nos ensaios semidestrutivos, conforme Bernucci *et al.* (2010), são realizadas aberturas menores no pavimento que permitem a identificação dos materiais empregados e as espessuras das camadas, e com a utilização de equipamentos

portáteis, avalia-se a capacidade de carga da estrutura *in loco*, correlacionando esta com o CBR dos materiais.

Nos ensaios não destrutivos as deflexões são os parâmetros mais analisados, utilizando as técnicas de deflectometria nas quais obtêm-se os valores de deslocamentos verticais (deflexões) da estrutura durante a aplicação de uma carga conhecida, sobre uma área conhecida, simulando o efeito que o eixo de um veículo causa no pavimento (FRANCISCO, 2012).

Com os ensaios não destrutivos, também é possível medir as deflexões em pontos afastados da carga, e obter a linha de influência desta, também denominada de bacia de deflexão. Através da bacia de deflexão obtida em campo, é possível avaliar a qualidade do comportamento estrutural do pavimento e, determinar através de processos de retroanálise, os módulos resiliente de cada camada (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Os equipamentos utilizados nos ensaios não destrutivos podem ser divididos quanto ao tipo de carregamento, sendo eles: carregamento quase-estático, carregamento vibratório e carregamento por impacto. Os mais utilizados no país são: a viga Benkelman que simula um carregamento quase-estático e o FWD que simula um carregamento por impacto (BERNUCCI *et al.*, 2010).

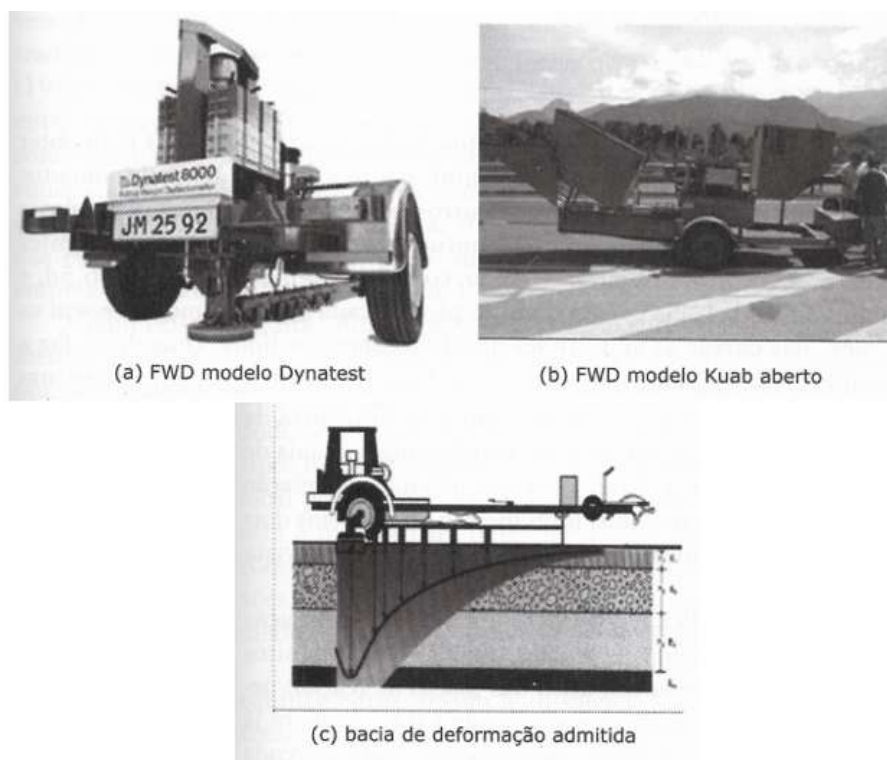
2.1.2.1 *Falling weight deflectometer – FWD*

Os ensaios com o FWD (deflectômetro de queda de peso) têm sido usados nas análises das propriedades dos materiais dos pavimentos há décadas. Amplitudes e frequências de cargas diferentes provêm níveis de deformações no pavimento, similar ao efeito das rodas dos caminhões em rodovias de tráfego intenso (NEGA; NIKRAZ; AL-QADI, 2016).

Segundo Nega, Nikraz, Al-Qadi, (2016, p. 429): “O FWD é um dispositivo que aplica um impulso de carga na superfície do pavimento e a deflexão percebida é registrada em uma série de pontos radiais”.

A Figura 4 apresenta dois modelos do equipamento FWD e os registros obtidos no ensaio, a principal diferença entre os modelos é o tempo de pulso de carga, no Dynatest é aproximadamente 30 milissegundos (ms) e no Kuab é em torno de 34 a 50 ms (MEDINA; MOTTA, 2015).

Figura 4 – Modelos do FWD e representação das deflexões



Fonte: Medina e Motta (2015).

Balbo (2007) complementa que, dependendo do modelo, a placa de aplicação da carga possui 300 milímetros (mm) de diâmetro, a massa do martelo de queda pode ser de 50, 100, 200 ou 300 quilogramas (kg), a altura da queda é regulada entre 20 e 381 mm e a força aplicada varia de 7 a 107 quilonewtons (kN), após a queda do martelo, transdutores de velocidade distribuídos longitudinalmente captam as ondas geradas pelo impacto.

As ondas provocadas pelos deslocamentos da superfície são captadas por até sete geofones distribuídos longitudinalmente, sendo que, o último poderá ser posicionado a até 2,25 metros (m) de distância do ponto de aplicação da carga, após o impacto a aceleração das ondas é integrada fornecendo a deflexão sob cada geofone (BALBO, 2007).

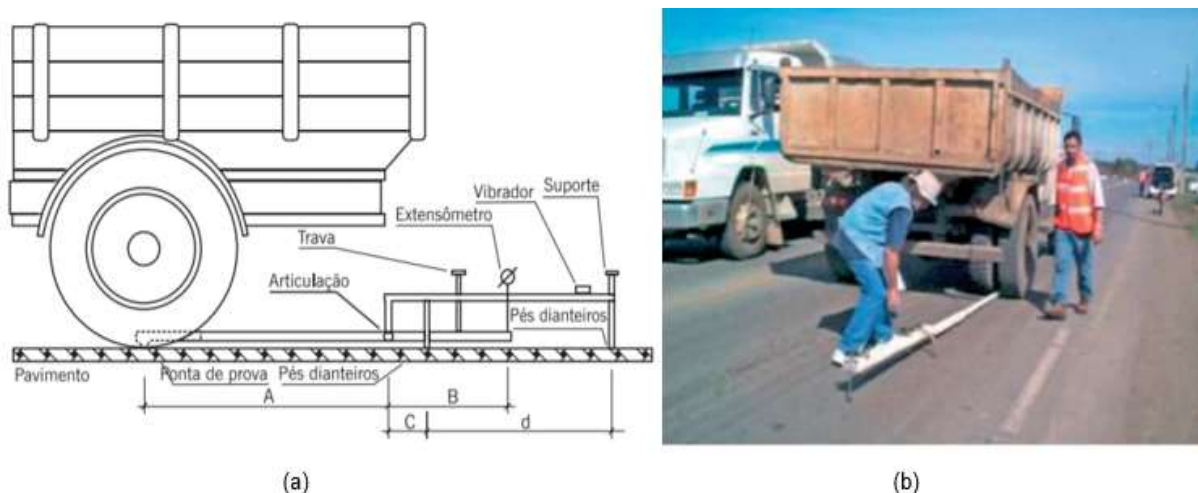
No Brasil, a norma DNIT 132/10-PRO (2010a), estabelece os procedimentos de calibração da célula de carga e dos sensores de deflexão dos equipamentos FWD, que são necessários para a padronização dos resultados obtidos; e a norma DNER-PRO 273/96 (1996) determina o procedimento a ser adotado na determinação das deflexões com a utilização do FWD, para avaliação estrutural da condição do pavimento.

2.1.2.2 Viga Benkelman

De acordo com Balbo (2007), a viga Benkelman é o equipamento mais utilizado no Brasil para medida de deflexões, inclusive as normas de restauração de pavimento que estão em vigência no país têm modelos matemáticos fundamentados nesse ensaio. Segundo Bernucci *et al.* (2010) trata-se de um equipamento simples, que necessita de um caminhão com o eixo traseiro de rodas duplas carregado com 8,2 toneladas-força (tf), para aplicar a carga sobre o ponto no qual será medida a deformação elástica.

Na realização do ensaio, conforme ilustrado na Figura 5, uma haste (viga) articulada tem uma de suas extremidades, a ponta de prova, posicionada entre as rodas do caminhão, e em sua outra extremidade há um extensômetro no qual se faz a leitura inicial (L_i) do deslocamento do pavimento; em seguida desloca-se o caminhão lentamente, afastando-o até 10 m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não registre mais variações de leitura, então realiza-se uma nova leitura do extensômetro para obter a leitura final (L_f) do deslocamento (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNER, 1994; MARKÓ; PRIMUSZ; PÉTERFALVI, 2013).

Figura 5 – Esquema da viga Benkelman (a) e do ensaio em campo (b)



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Balbo (2007) argumenta que o funcionamento do equipamento se assemelha a um braço de alavanca, desse modo as deflexões do ponto podem ser obtidas por semelhança de triângulos, conforme Equação 2:

$$\frac{D_0}{A} = \frac{(L_i - L_f)}{B} \rightarrow D_0 = (L_i - L_f) \cdot \frac{A}{B} \quad (2)$$

Onde:

D_0 – deflexão total ou máxima medida sob a roda (0,01 mm);

A/B – relação entre as dimensões dos braços da viga Benkelman;

L_i – leitura inicial no extensômetro (0,01 mm);

L_f – leitura final no extensômetro (0,01 mm).

A bacia de deflexões pode ser obtida, experimentalmente, registrando-se leituras intermediárias à medida que o caminhão avança lentamente até as distâncias pré-determinadas. Para essas leituras intermediárias, as deflexões também devem ser calculadas em relação a L_f , com a Equação 2, substituindo apenas L_i , pelas leituras registradas nos pontos intermediários (BERNUCCI *et al.*, 2010; BALBO, 2007; DNIT, 2010b).

Versões atualizadas da viga Benkelman foram desenvolvidas em vários países, tais como: o deflectógrafo Lacroix da França e o deflectômetro móvel da Califórnia, que automatizaram o acionamento e o registro da viga Benkelman, ampliando o número de medições diárias e registrando as deflexões nas duas trilhas de rodas simultaneamente (MEDINA E MOTTA, 2015). A Figura 6 apresenta a viga Benkelman automatizada desenvolvida pelo laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Figura 6 – Viga Benkelman automatizada desenvolvida pela COPPE/UFRJ



Fonte: Medina e Motta (2015).

A automação da leitura da viga Benkelman foi feita com a utilização de *Linear Variable Differential Transformer* – LVDT no local do extensômetro, e o registro de deslocamento do caminhão com a adaptação de um hodômetro que é acoplado ao caminhão e está conectado a um transmissor de rádio que envia o sinal a um microcomputador portátil, este também recebe o sinal produzido pelo LVDT (MEDINA E MOTTA, 2015).

A norma DNIT133/10 - ME padroniza o método de ensaio para determinação das deflexões com a Viga Benkelman, e a norma DNER-PRO 175/94 dispõe sobre a calibração e padronização deste equipamento.

2.1.3 Módulos resilientes equivalentes obtidos por retroanálise

A partir da bacia de deflexões de um pavimento, é possível estimar os módulos resilientes equivalentes – M_{Reqv} de suas camadas, possibilitando assim uma avaliação estrutural mais adequada dos segmentos ensaiados. Essa estimativa é obtida a partir de um processo denominado de retroanálise (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A retroanálise é um método de análise inversa do processo de dimensionamento mecânico-empírico, baseado em cálculos de tensões e deformações de sistemas de camadas, no qual são conhecidas as deflexões resultantes da aplicação de uma carga, e deseja-se descobrir os módulos que conduziram aquela deflexão (MEDINA; MOTTA, 2015).

Estabelecidos inicialmente as espessuras e os coeficientes de *Poisson* de cada camada, determinam-se por processos iterativos com auxílio de programas computacionais, os valores de módulos que reproduzem, analiticamente, uma bacia de deflexões semelhante a que foi aferida em campo. Os valores determinados são então assumidos como os módulos resilientes equivalentes para as condições de campo de cada camada (DNIT, 2006b; MAGALHÃES, 2015).

Dentre as vantagens citam-se que a retroanálise se justifica por: inferir os M_{Reqv} nas condições de campo; reduzir e/ou eliminar a coleta de amostras; agilizar a caracterização das camadas do pavimento e a verificação de suas condições estruturais.

Dentre as desvantagens citam-se que: os valores calculados apresentam alta sensibilidade às imprecisões inerentes aos levantamentos em campo; os módulos

obtidos por retroanálise não são necessariamente reais, mas sim equivalentes; o conjunto de valores retroanalizados não é único, e depende do programa utilizado, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajuste obtidos, entre outros fatores (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Nóbrega (2003) também ressalta que as deflexões medidas em campo são altamente influenciadas pelas condições ambientais e pelos modelos de equipamentos utilizados.

Atualmente estão disponíveis inúmeros programas computacionais para retroanálise de bacias deflectométricas, os usualmente utilizados no Brasil são os: ELMOD da Dynatest, KUAB da KUAB, EVERCALC do Departamento de Transporte do Estado de Washington (EUA), BAKFAA da *Federal Aviation Administration – FAA (EUA)*, RETRAN2C e RETRAN5L desenvolvido por Albernaz em 1997, e BackMeDiNa, este último é o *software* mais recente, lançado no país, que integra o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos asfálticos (MEDINA; MOTTA, 2015; SOUZA JR., 2018).

2.2 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE O FWD E A VIGA BENKELMAN

Os estudos realizados para comparação entre o FWD e a viga Benkelman, buscaram encontrar correlações e avaliar as diferenças entre as deflexões aferidas por cada equipamento, os MReqv e as tensões e deformações as quais o pavimento está submetido quando utilizados os dados obtidos da retroanálise. A seguir apresentam-se algumas pesquisas encontradas na bibliografia.

2.2.1 Correlações das deflexões D_0 propostas por Pinto (1991) e Borges (2001)

Pinto (1991) realizou ensaios deflectométricos com o FWD e com a VB nas rodovias federais BR-040 e BR-101, em 05 segmentos experimentais localizados no Rio de Janeiro – RJ. O modelo de regressão proposto pelo autor está apresentado na Equação 3.

$$D_{VB} = -5,73 + 1,396 \times D_{FWD} \quad R^2 = 0,94 \quad (3)$$

Onde:

D_{VB} – deflexão obtida através do ensaio com a VB;

D_{FWD} – deflexão obtida através do ensaio com o FWD.

Borges (2001) realizou levantamentos deflectométricos com o FWD e com a Viga Benkelman simulando a carga do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf, em rodovias catarinenses, abrangendo 56 trechos com 1 quilômetro (km) cada. Os trechos foram escolhidos de modo que englobassem as três regiões geológicas de Santa Catarina, oito estruturas de pavimento distintas e três níveis de condições deflectométricas. Os resultados demonstraram que dependendo da estrutura de pavimento (materiais empregados e espessura das camadas) as comparações entre o FWD e a viga Benkelman apresentavam correlações distintas, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos de regressões entre VB e FWD propostos por Borges 2001

Estudos realizados com valores de:	Modelos de Regressão	
	$Y=a \cdot x+b$	$Y=a \cdot x$
- Deflexões características de cada segmento	$D_{VB} = 1,343 \cdot D_{FWD} - 5,814$ $R^2 = 0,84$	$D_{VB} = 1,248 \cdot D_{FWD}$ $R^2 = 0,83$
- Deflexões de todos os segmentos	$D_{VB} = 1,251 \cdot D_{FWD} - 2,412$ $R^2 = 0,75$	$D_{VB} = 1,205 \cdot D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$
- Deflexões médias de cada segmento	$D_{VB} = 1,339 \cdot D_{FWD} - 6,243$ $R^2 = 0,80$	$D_{VB} = 1,210 \cdot D_{FWD}$ $R^2 = 0,79$
- Deflexões - espessura 5,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,180 \cdot D_{FWD} - 0,710$ $R^2 = 0,73$	$D_{VB} = 1,193 \cdot D_{FWD}$ $R^2 = 0,73$
- Deflexões - espessura 10,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,486 \cdot D_{FWD} - 11,144$ $R^2 = 0,77$	$D_{VB} = 1,237 \cdot D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$

Fonte: Adaptado de Borges (2001).

2.2.2 Comparação das tensões e deformações de tração e de compressão obtidas por Gomes (2012)

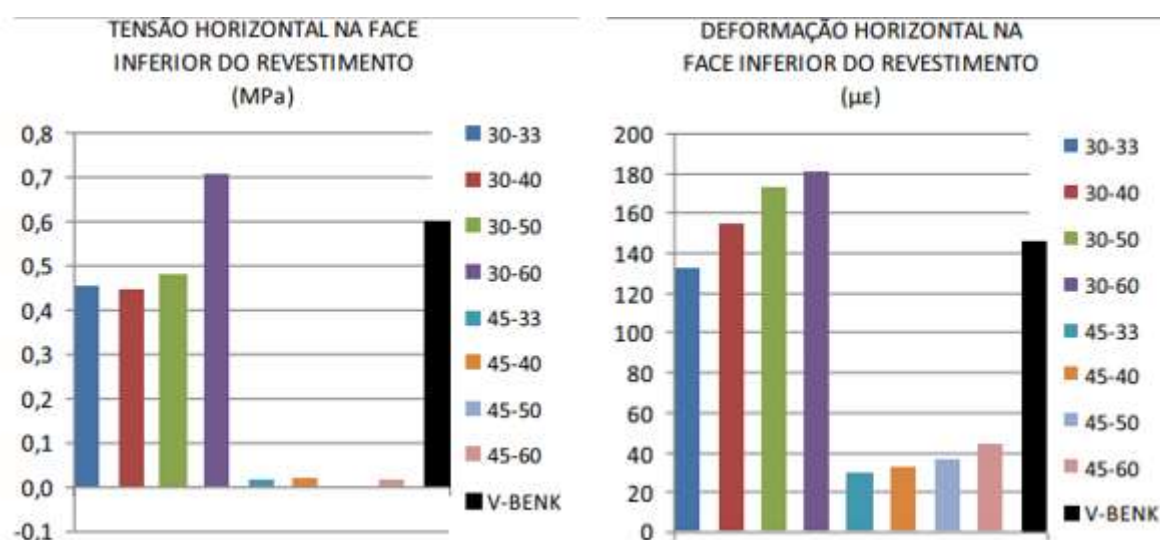
Gomes (2012) comparou deflexões medidas com a viga Benkelman e o FWD, para este último ele utilizou oito condições diferentes de carregamento, alternando as placas do equipamento (diâmetro de 30 e 45 cm) e a carga (33, 40, 50 e 60 kN). Conforme o autor nenhuma das configurações de FWD reproduziu resultados obtidos com a viga Benkelman. No estudo foram analisadas 61 estações em um trecho de 1,2 km, na cidade de Ouro Branco – MG, a estrutura de pavimento era composta por uma

camada asfáltica com espessura de 3 a 4 cm, base e sub-base de 15 cm cada, ambas executadas com canga de minério de ferro.

Diferente dos estudos citados anteriormente, Gomes (2012) não desenvolveu modelos de regressões entre as medidas de deflexão, mas, enfatizou as diferenças percentuais entre as estas, entre os módulos resilientes retroanalizados para cada camada do pavimento e, aprofundando-se no comportamento das tensões e deformações o autor determinou e comparou as σ_t e ϵ_t na superfície inferior da camada de revestimento e σ_c e ϵ_c no topo da camada do subleito conforme ilustrado na Figura 7 e 8.

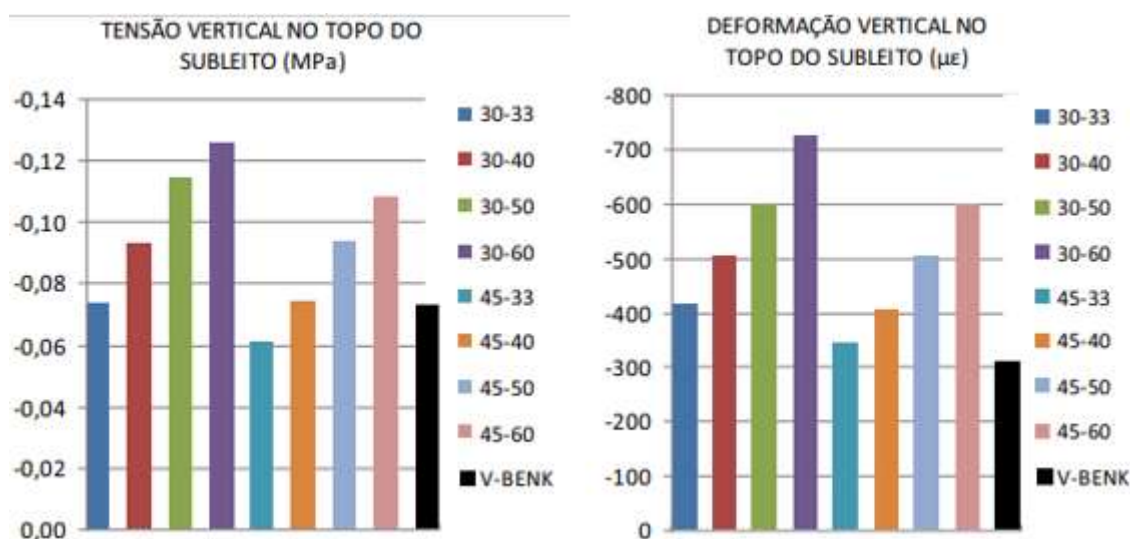
Quanto às σ_t , Gomes (2012) comenta que, os valores provenientes da análise das deflexões com as configurações utilizadas no FWD, apenas a de 30-60 (placa de 30 cm e carga de 60kN) foi superior ao valor obtido com a viga Benkelman, sendo que esta também foi a configuração que mais se aproximou do resultado da viga Benkelman. Já no caso das ϵ_t , as configurações distintas do FWD resultaram em alguns valores maiores e outros menores quando comparados aos resultados provenientes da viga Benkelman, e nesta análise a configuração 30-40 foi a que obteve resultado mais próximos do valor da viga Benkelman.

Figura 7 – Gráfico das tensões e deformações de tração obtidas por Gomes (2012)



Fonte: Gomes (2012).

Figura 8 – Gráfico das tensões e deformações de compressão obtidas por Gomes (2012)



Fonte: Gomes (2012).

Na análise de σ_c , Gomes (2012) observou que, a configuração 30-33 do FWD foi a que mais se assemelhou ao resultado da viga Benkelman, apresentando uma variação de 0,8% e; apenas a configuração 45-33 do FWD apresentou valor inferior ao da viga Benkelman. Para as ϵ_c , observou-se que todas as configurações do FWD apresentaram valores superiores ao da viga Benkelman, sendo que a configuração mais próxima também foi a 45-33 do FWD apresentando uma diferença 12,1% em relação a viga Benkelman.

2.2.3 Comparação e correlações das deflexões e dos módulos resilientes retroanalizados realizadas por Nery (2020)

Nery (2020) realizou ensaios deflectométricos em 110 pontos distribuídos em 6 segmentos, na Rodovia Rio do Morro localizada em Santa Catarina – SC. A configuração do FWD utilizada pela autora foi a placa de 30 cm e o carregamento de 40 kN.

Nos segmentos 01, 02 e 05, Nery e Santos (2021) ressaltam que a camada de revestimento asfáltico já tinha 05 anos quando os ensaios foram realizados, enquanto nos segmentos 03, 04 e 06 tinham 06 meses e 01 ano quando foram realizados os ensaios com o FWD e a VB, respectivamente.

As medidas de deflexão obtidas no ponto D₀, cuja temperatura do pavimento encontrava-se com valor diferente de 25°C, foram corrigidas para a temperatura de 25°C, utilizando a Equação 4 adaptada do ábaco proposto pelo DER-SP (2006) e indicada por Bueno (2016), para padronizar os valores e permitir a comparação entre estes (NERY, 2020).

$$D_{25^{\circ}C} = \frac{D}{\left\{ \left[\left(\frac{h_{CA}}{1000} \right) \cdot (T - 25) \right] + 1 \right\}} \quad (4)$$

Onde:

D_{25°C} – deflexão corrigida para a temperatura de 25°C (0,01 mm);

D – deflexão medida em campo (0,01 mm);

h_{CA} – espessura da camada asfáltica (cm);

T – temperatura na superfície do pavimento durante o ensaio (°C).

Com a estatística descritiva realizada para cada segmento, a interpretação dos dados ocorreu através de diagramas de caixas e diagramas lineares, permitindo a identificação e exclusão de *outliers*, após a análise Nery (2020) removeu os pontos de testes n° 2, 35 e 67 de suas análises e comparações.

No estudo do modelo de regressão entre as deflexões, Nery (2020) obteve valores compreendidos entre 0,6 e 0,8 para o coeficiente de correlação de Pearson (r), indicando que as deflexões do ponto D₀, obtidas com o FWD e com a viga Benkelman apresentaram correlações moderadas, conforme dados da Tabela 4.

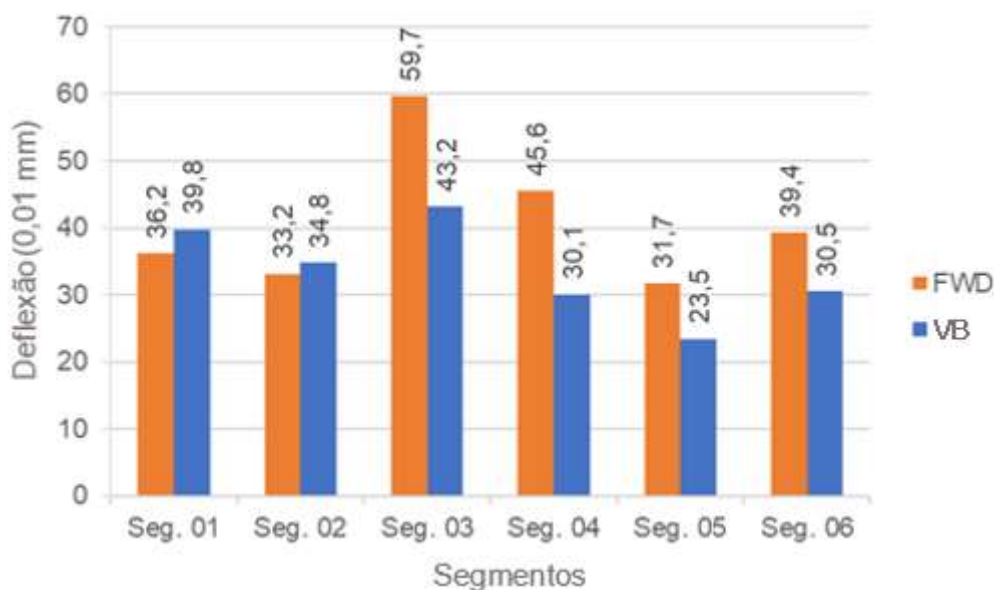
Tabela 4 – Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,38	fraca positiva	04	0,65	moderada positiva
02	0,63	moderada positiva	05	0,65	moderada positiva
03	0,68	moderada positiva	06	0,79	forte positiva

Fonte: Nery (2020).

A Figura 9 apresenta a comparação entre as deflexões médias obtidas no ponto D₀, em cada segmento com o FWD e com a viga Benkelman.

Figura 9 – Comparativo entre as deflexões aferidas com o FWD e com a Viga Benkelman no ponto D₀



Fonte: Adaptado Nery e Santos (2021).

Através de estatística descritiva Nery e Santos (2021), observaram que as deflexões aferidas com o FWD apresentaram menor variação (desvio padrão – Sd entre 2,5 e 6,6 e coeficiente de variação - CV variando de 08 a 17) quando comparada as leituras da Viga Benkelman (Sd entre 3,0 e 10,8 e CV variando de 10 a 27).

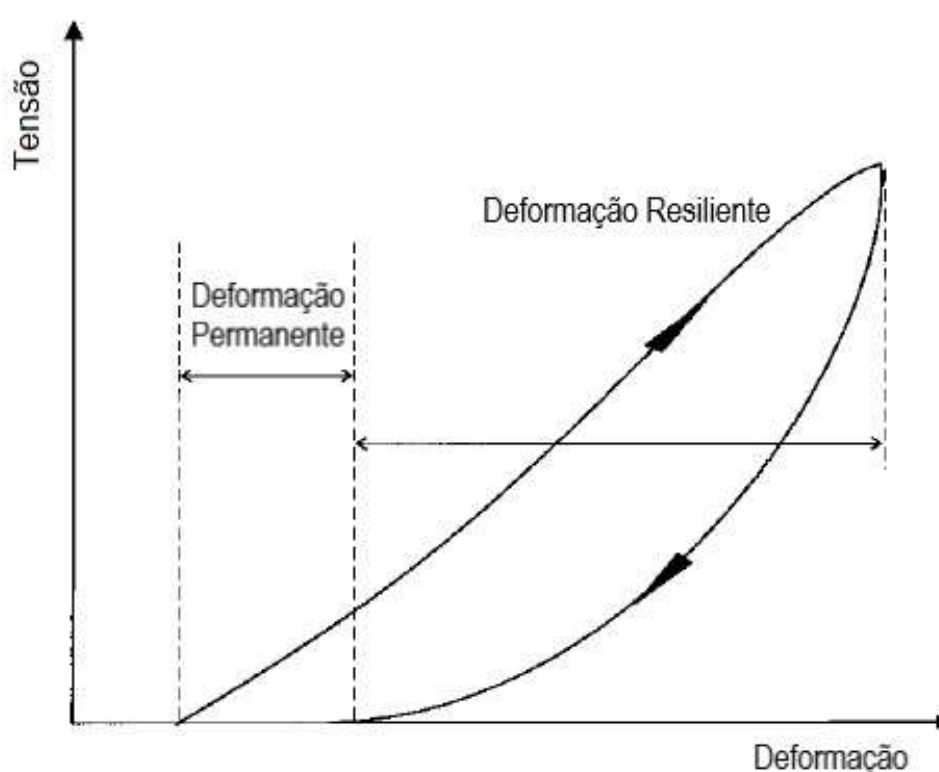
As menores deflexões foram obtidas no segmento 05 (consolidado), e maiores foram apresentadas pelo segmento 03 (em consolidação), ambos executados com o reforço em areia, as leituras mais próximas ocorreram nos segmentos 01 e 02 (ambos consolidados), executados com reforços de pedra pulmão e areia, respectivamente (NERY; SANTOS, 2021).

As deflexões aferidas pela viga Benkelman apresentaram valores inferiores as medidas do FWD, mas, em ambos os casos as deflexões médias ficaram abaixo de 76 (0,01 mm), valor limite da deflexão característica considerada no projeto (NERY; SANTOS, 2021).

2.3 DEFORMAÇÕES E FADIGA DO PAVIMENTO

Lekarp, Isacsson e Dawson (2000) especificam que, a reação deformacional das camadas do pavimento quando submetidas a repetição de cargas, caracteriza-se por uma resposta resiliente e uma resposta permanente, como pode ser observado na Figura 10. Sendo que, grande parte da deformação é resiliente e, uma pequena parte é permanente (RAHMAN; ERLINGSSON, 2014; CERNI *et al.*, 2012).

Figura 10 – Deformação em materiais granulares durante um ciclo de aplicação de carga



Fonte: Adaptado de Lekarp, Isacsson e Dawson (2000).

As deformações resilientes ocasionam as trincas por fadiga, essas geralmente ocorrem na superfície do pavimento, mais especificamente na camada de revestimento asfáltico. E as deformações plásticas ou permanentes representam a cada ciclo uma pequena fração da deformação total produzida pela aplicação da carga, e com decorrer do tempo o acúmulo gradual dessas pequenas frações provocam os afundamentos na estrutura do pavimento (LEKARP; DAWSON, 1998).

A fadiga é um fenômeno que ocorre em materiais submetidos a deformações e tensões, estas últimas com intensidades inferiores a tensão de ruptura do material, decorrentes de ciclos de carregamentos recorrentes que promovem alterações na estrutura interna do material, iniciando um processo de microfissuração que resulta em trincas e/ou na completa ruptura do material após um determinado número de repetições (BALBO, 1997; FRANCO, 2007).

Em camadas asfálticas e cimentadas a fadiga é proveniente dos ciclos de carga/descarga dos eixos dos veículos que trafegam sobre o pavimento, a repetição desta condição inicia o surgimento de trincas na face inferior da camada de revestimento e com o decorrer do processo estas trincas se propagam para a superfície, reduzindo o desempenho e contribuindo para a ruptura estrutural do pavimento (FRANCO, 2007; MEDINA E MOTTA, 2015).

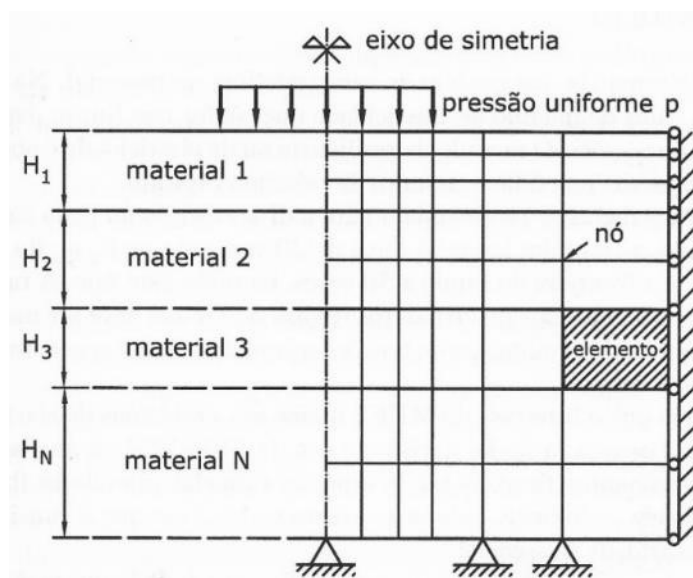
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF

Logan (2016), ressalta que o MEF é um método numérico utilizado na resolução de problemas de engenharia e física matemática, principalmente, em modelos que envolvem geometrias complexas, cargas e propriedades de materiais, nos quais as soluções analíticas por vezes são impossíveis, pois, não são capazes de resolver as equações diferenciais que modelam o problema. Nessas situações, a utilização do MEF busca resolver o sistema de equações diferenciais satisfazendo as condições de contorno com a utilização de um algoritmo de cálculo conhecido (FRANCO, 2007).

Segundo Li *et al.* (2017), modelos analíticos simples têm sido utilizados para prever respostas do pavimento, recentemente, com a finalidade de superar limitações de modelagens analíticas, os modelos baseados no MEF foram desenvolvidos para simular condições mais reais.

A aplicação do MEF consiste, conforme Medina e Motta (2015), na divisão da estrutura em elementos fictícios (malha), que se conectam por pontos nodais de forma semelhante a articulações sem atrito, a configuração dos elementos finitos pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 – Configuração de elementos finitos em uma estrutura estratificada



Fonte: Medina e Motta (2015).

Fundamentalmente na aplicação do MEF obtêm-se a relação entre as forças e os deslocamentos nodais, com a aplicação da teoria da elasticidade. Calcula-se a matriz de rigidez para cada elemento, acoplam-se as rijezas elementares em uma matriz de rigidez global, obtendo-se um sistema de equações simultâneas representado pela Equação 5 (MEDINA; MOTTA, 2015).

$$\{\delta\} = \frac{\{F\}}{[K]} \quad (5)$$

Onde:

$\{\delta\}$ – é o vetor de deslocamentos nodais;

$\{F\}$ – é o vetor de cargas nodais;

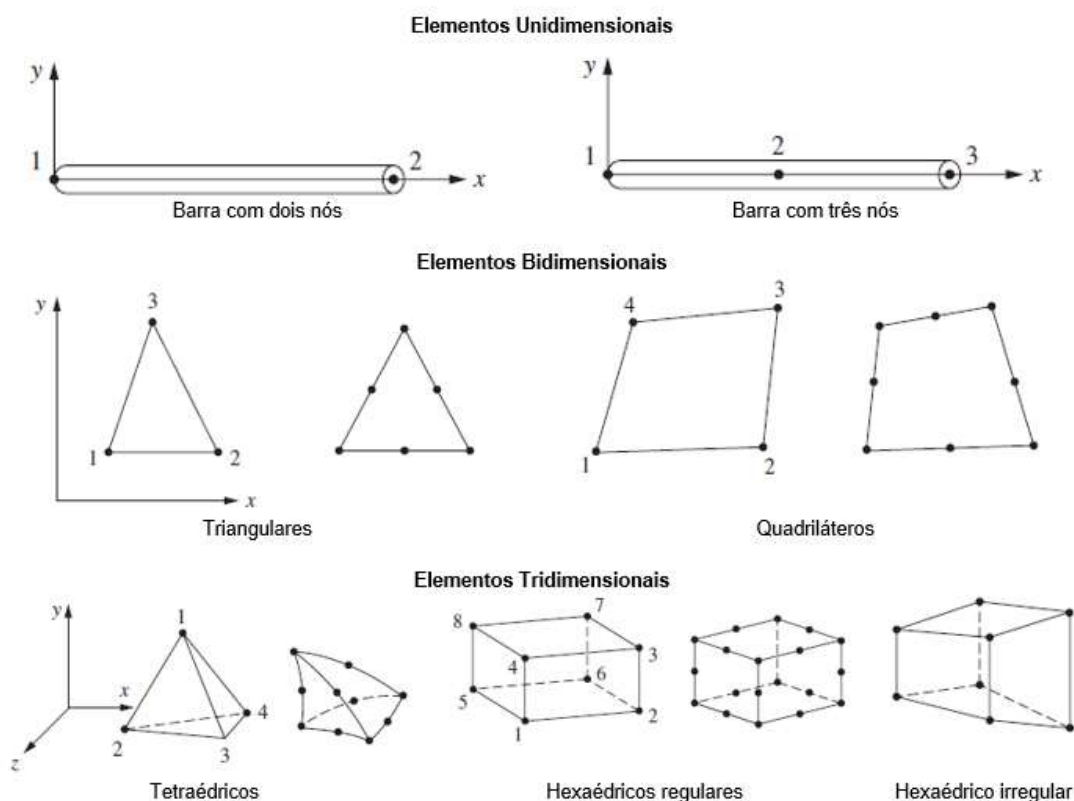
$[K]$ – é a matriz de rigidez global da estrutura.

2.4.1 Tipos de elementos e discretização da malha

Um dos procedimentos iniciais na utilização do MEF é a escolha do elemento mais apropriado, considerando seu tamanho e tipo. Essa escolha leva em consideração a composição física da estrutura que será analisada, as condições de carregamento e contorno às quais ela será submetida, a precisão esperada pelos resultados e, também é necessário avaliar se a estrutura precisa ser analisada em

uma, duas ou três dimensões (LOGAN, 2016). Os principais tipos de elementos estão representados na Figura 12.

Figura 12 – Tipos de Elementos Finitos

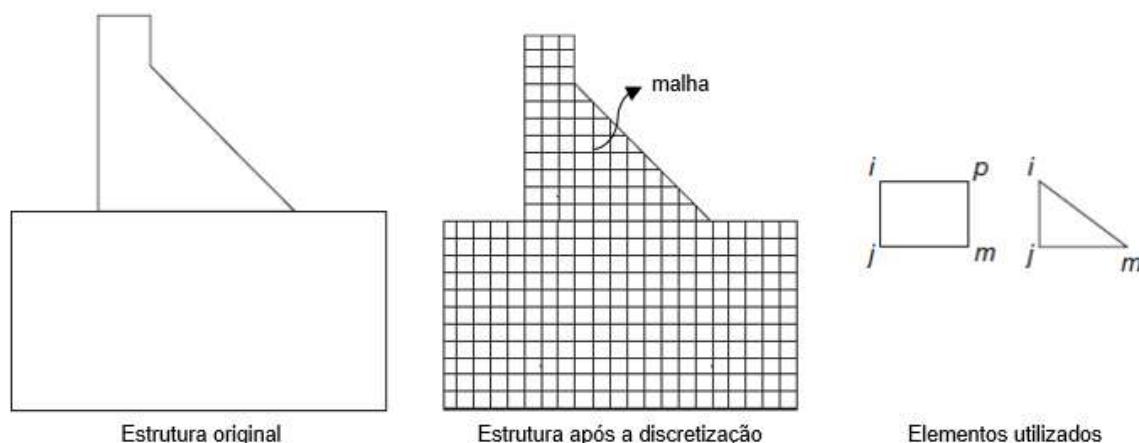


Fonte: Adaptado de Logan (2016).

Além do elemento é preciso definir a função de deslocamento dentro dele, considerando seus valores nodais. Essa função é, normalmente, representada por polinômios lineares, quadráticos ou cúbicos, dada a facilidade de formulação. Dessa forma o deslocamento contínuo da estrutura, é aproximado por um modelo discreto, e este modelo é composto de funções contínuas em partes definidas dentro de cada elemento finito (LOGAN, 2016).

No meio contínuo Zhu (2018), argumenta que a estrutura possui infinitos pontos interconectados com infinitos graus de liberdade, na resolução numérica o meio contínuo é substituído pela combinação de um número finitos de elementos com finitos graus de liberdade (Figura 13). Esse processo de dividir um corpo contínuo em sistemas equivalentes menores e discretos, conectados em pontos nodais com outros elementos dá-se o nome de discretização, e seu resultado é representado pela malha de elementos finitos gerada (LOGAN, 2016).

Figura 13 – Discretização do contínuo em elementos finitos



Fonte: Adaptado de Zhu (2018).

Usualmente, o aumento de números de elementos, e consequentemente, de nós melhora a precisão dos resultados, entretanto, o tempo de processamento computacional para solucionar o problema também cresce, portanto, na discretização os elementos devem ser suficientemente pequenos para prover informações precisas e, suficientemente grandes para reduzir o gasto computacional (FISH; BELYTSCHKO, 2007; LOGAN, 2016).

2.4.2 Modelagem espacial

A modelagem espacial trata do espaço no qual a estrutura está inserida, e não da topologia desta estrutura. Na análise por MEF emprega-se, usualmente, as seguintes configurações espaciais: modelos bidimensionais (2D) que consideram a estrutura como uma peça plana; modelos tridimensionais (3D) que consideram a estrutura como uma peça sólida e; modelos axissimétricos que consideram a estrutura como uma peça plana simétrica, que realiza uma revolução em um dos eixos (DASSAULT SYSTÈMES, 2014).

Almeida (2019) argumenta que os pavimentos apresentam comportamento estrutural complexo, portanto, as análises tridimensionais têm sido cada vez mais utilizadas, pois são capazes de considerar detalhes que análises bidimensionais axissimétricos não contemplam.

Santos (2018) complementa que a condição ideal de aderência do pavimento (bloco monolítico) não é alcançada em campo, e isto altera a distribuição dos esforços

internos da estrutura, por este motivo é importante incorporar os fatores de aderência das camadas na análise mecânica destas. Esta condição pode ser analisada através da abordagem de contato entre camadas, com a modelagem tridimensional.

2.5 ABAQUS

O ABAQUS é um conjunto de programas de simulação de engenharia, baseado no MEF, capaz de resolver problemas que vão desde uma análise linear simples até simulações não lineares complexas. Contendo uma extensa biblioteca de elementos e de modelos de materiais, o ABAQUS consegue modelar virtualmente qualquer geometria, e estudar problemas de comportamento mecânico, transferências de calor e de massa, análises acústicas, dinâmica de fluídos, entre outros (DASSAULT SYSTÈMES, 2014).

De propriedade da empresa Dassault Systèmes Simulia, o ABAQUS foi lançado em 1978. O *software* executa a modelagem em três etapas principais: o pré-processamento desenvolvido no ABAQUS/CAE; o processamento realizado pelos *softwares* de análise ABAQUS/STANDARD ou ABAQUS/EXPLICIT; e o pós-processamento realizado também pelo ABAQUS/CAE através do módulo de visualização, também licenciado como ABAQUS/VIEWER (ALMEIDA, 2019; DASSAULT SYSTÈMES, 2014).

Segundo Rangel (2017) e Almeida (2019), o ABAQUS/CAE, *Computer Aided Engineering* ou em português Engenharia Assistida por Computador (EAC), é um pré-processador com interface gráfica, no qual é possível definir a geometria e a estrutura espacial do problema, atribuir propriedades aos materiais, gerar a malha de elementos finitos, entre outras funções. Dassault Systèmes (2014) complementa que o programa CAE é composto por módulos, que apresentam uma sequência lógica para criação dos modelos. Os módulos e as tarefas desenvolvidas nestes são resumidos a seguir:

- *Part*: definição da geometria das partes que compõem o modelo;
- *Property*: definição das propriedades dos materiais utilizados, e atribuição destes a cada parte ou seção do modelo;
- *Assembly*: montagem da modelo, definindo o agrupamento das partes que constituem o modelo;

- *Step*: definição das etapas de análise e especificação dos respectivos dados de saída;
- *Interaction*: especificação das interações entre as regiões ou partes de um modelo;
- *Load*: especificação do carregamento e das condições de contorno;
- *Mesh*: definição e criação da malha de elementos finitos;
- *Job*: submissão do modelo para análise e acompanhamento do seu progresso;
- *Visualization*: módulo no qual se visualiza os resultados.

Concluída a etapa de pré-processamento, o arquivo de dados de entrada gerados no ABAQUS/CAE é submetido ao programa que realizará o processamento dos dados e a simulação numérica. Esse processamento poderá ser realizado pelo ABAQUS/STANDARD ou pelo ABAQUS/EXPLICIT, o primeiro executa a análise utilizando métodos implícitos na resolução dos sistemas de equações e é indicado para problemas lineares, não lineares simples, com contato e preferencialmente para cargas estáveis e fixas; o segundo utiliza métodos explícitos para resolução das equações e é indicado para problemas altamente não lineares, com contatos complexos e preferencialmente para cargas dinâmicas (RANGEL, 2017; ALMEIDA, 2019).

O ABAQUS/VIEWER, módulo de visualização do ABAQUS/CAE, realiza o pós-processamento dos dados de saída, gerando relatórios da análise de elementos finitos e fornecendo interpretações gráficas e animações do comportamento da estrutura (RANGEL, 2017; ALMEIDA, 2019).

Rangel (2017) relata que a evolução computacional possibilitou correlacionar variáveis e modelos constitutivos de diferentes materiais em uma única estrutura, permitindo a modelagem de pavimentos com milhares de nós e o cálculo das tensões e deformações em cada um destes.

2.6 MODELOS DE RUPTURA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

As rupturas estruturais dos pavimentos flexíveis, normalmente, são decorrentes da fadiga do revestimento e das deformações permanentes desenvolvidas nas camadas de subleito, sub-base e base (YODER; WITCZAK, 1975).

Franco (2007) menciona que muitos modelos foram desenvolvidos por pesquisadores, na busca de estabelecer critérios de ruptura para os métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, os mais consagrados consideram as manifestações de danos gerados a cada repetição de carga.

O uso da deformação de compressão vertical no topo do subleito como critério de ruptura, para reduzir o afundamento permanente, e o uso da deformação de tração horizontal na superfície inferior da camada de revestimento para minimizar as fissuras decorrentes da fadiga, foram sugeridos em 1965, nos Estados Unidos, por Dormon e Metcalf (HUANG, 2004). Esses dois critérios desde então foram adotados em diversos modelos de desempenho que visam estimar a vida útil da estrutura em termos de número de repetições do eixo padrão.

2.6.1 Modelo proposto por Franco

Em sua tese Franco (2007), propôs modelos de vida de fadiga a partir de dados obtidos de ensaios realizados na universidade e publicados em outros trabalhos científicos. Ao todo foram analisados 675 ensaios de carga repetida à tensão controlada, para avaliar a fadiga de misturas asfálticas com ligantes tradicionais, ligantes modificados por polímero e misturas com asfalto borracha. O estudo resultou em três modelos, uma para cada tipo de mistura estudada. A Equação 6 apresenta o modelo proposto para as misturas asfálticas com ligantes tradicionais.

$$N = fcl \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{0,74} \quad R^2 = 0,805 \quad (6)$$

Onde:

N – é a vida de fadiga, expressa em número de acumulado de repetições do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf, calculado pelo método da *United States Army Corps of Engineers* (USACE);

fcl – fator campo laboratório, o autor recomenda o valor 10^4 , advindo de estudos anteriores realizados por Pinto;

ε_t – deformação específica de tração;

M_R – módulo resiliente da mistura asfáltica (MPa).

2.6.2 Modelo proposto por Pinto

Franco (2007) e Santos (2015) apresentaram em seus trabalhos o modelo de previsão de vida de fadiga desenvolvido por Pinto (1991). Baseado em 82 pontos de ensaio de fadiga à tensão controlada realizados em seis misturas asfálticas, à 25°C. A Equação 7 apresenta o modelo que fornece o número de aplicações de carga necessário para romper o corpo-de-prova.

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,65} \cdot \left(\frac{1}{M_R}\right)^{-0,033} \quad (7)$$

Onde:

N_{lab} – é a vida de fadiga em laboratório;

ε_t – deformação específica de tração;

M_R – módulo resiliente da mistura asfáltica (kgf/cm²).

Pinto (1991) calibrou os modelos com observações de trechos da rodovia BR-101, para determinar o fator de campo laboratório (FCL) que apresentou valores entre 10² e 10⁴, para levar o pavimento à uma área trincada de 20%.

2.6.3 Modelo proposto pelo *Asphalt Institute* – AI

Conforme Medina e Motta (2015), Santos (2015), Klamt (2014) e Franco (2007), o modelo de previsão deformação específica vertical proposto pelo AI, atualizado em 1991, considera o limite de ruptura plástica em função da deformação elástica vertical atuante no subleito, e está apresentado na Equação 8.

$$N = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot (\varepsilon_v)^{-4,477} \quad (8)$$

Onde:

N – é o número admissível de aplicações de carga do eixo rodoviário, considerando um afundamento de trilha de roda da ordem de 13 mm, calculado pela metodologia da AASHTO;

ε_v – deformação específica vertical no topo do subleito.

2.6.4 Modelo proposto pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC

Conforme Medina e Motta (2015) e Franco (2007), o modelo de previsão de deformação específica vertical proposto pelo LCPC, foi elaborado na década de 90 e, também considera o limite de ruptura plástica, prevendo um N admissível a partir da deformação vertical encontrada no topo do subleito, conforme expressão apresentada pela Equação 9.

$$N = 2,227 \cdot 10^{-9} \cdot (\varepsilon_v)^{-4,505} \quad (9)$$

Onde:

N – é o número admissível de aplicações de carga do eixo rodoviário;

ε_v – deformação específica vertical no topo do subleito.

2.6.5 Modelo de cálculo de deformação permanente proposto por Guimarães (2009)

Tratando-se das deformações permanentes em materiais granulares Guimarães (2009, p.14) afirma que, “o comportamento do solo quanto à deformação permanente está relacionado à história de tensões a que foi submetido, isto é, para o caso de pavimentos, à sequência de aplicação do carregamento”.

As deformações permanentes são irreversíveis, e acabam gerando os afundamentos de trilhas de rodas. Em sua tese, Guimarães (2009), avaliou o comportamento das deformações permanentes de solos e materiais granulares utilizados na pavimentação, apontando também em seu estudo a importância do conhecimento do *shakedown*.

Conforme Faria (1999) e Guimarães (2009) quando a partir de um determinado número de aplicações de cargas cessam as deformações permanentes de um corpo submetido a estas, entende-se que ele entrou em *shakedown*. Portanto, a partir desse instante a resposta do material às solicitações externas será unicamente elástica, pois, as tensões decorrentes destas solicitações entrarão em equilíbrio com as tensões residuais provenientes do acúmulo das deformações permanentes, justificando o aumento deste tipo de deformação.

Através das análises dos resultados de deformação permanente dos materiais, obtidos por ensaios triaxiais de cargas repetidas, Guimarães (2009) obteve por meio de regressão não-linear múltipla, a função que relaciona a deformação permanente específica com a tensão confinante e a tensão desvio, conforme Equação (10).

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (10)$$

Onde:

ε_p^{esp} – deformação permanente específica (%);

σ_3 – tensão confinante (kgf/cm²);

σ_d – tensão desvio = $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm²);

N – é o número de ciclos de aplicação de carga;

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 – são parâmetros do modelo obtidos através dos ensaios.

Calculadas as deformações específicas para cada camada, o afundamento permanente total da estrutura do pavimento poderá ser obtido pela Equação (11):

$$\delta_{P\ TOTAL} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{p_i} \cdot h_i) \quad (11)$$

Onde:

$\delta_{P\ TOTAL}$ – é o afundamento permanente total acumulada da estrutura (mm, cm, m);

ε_{p_i} – é a deformação permanente específica da camada (%);

h_i – é altura da camada granular (mm, cm, m).

Ao final do seu estudo Guimarães concluiu que, o modelo desenvolvido para estimar as deformações mostrou-se adequado para solos finos e materiais granulares, e recomendou que para obtenção dos parâmetros do modelo, sejam realizados seis ensaios com pares de tensões bem espaçados, e com um número de ciclos de aplicação de cargas superior 100.000.

2.6.6 Modelo de previsão de área trincada desenvolvido por Fritzen e adaptado para o MeDiNa

Devido a facilidade de execução e compreensão, o ensaio de compressão diametral foi adotado no Brasil para análise da fadiga das misturas asfálticas (MEDINA E MOTTA, 2015). Neste ensaio a amostra é submetida à aplicação de cargas verticais repetidas até que ocorra sua ruptura; a curva gerada entre a amplitude da carga aplicada e o número de repetições é denominada de curva de Wöhler (FRANCO, 2007), e pode ser obtida pelas Equações 12 ou 13.

$$N_f = k_1 \cdot \sigma_t^{n_1} \quad (12)$$

$$N_f = k_2 \cdot \varepsilon_t^{n_2} \quad (13)$$

Onde:

N_f – é o número de aplicações de carga até a ruptura por fadiga;

σ_t – tensão de tração repetida atuante;

ε_t – deformação de tração repetida;

n_1 , n_2 , k_1 e k_2 – são constantes experimentais obtidas por regressão.

As equações acima representam o comportamento da fadiga, sendo a Equação (9) formulada para o ensaio realizado a tensão controlada, e a Equação (10) formulada para o ensaio com deformação controlada.

O ensaio a tensão controlada considera a aplicação de uma carga constante e definida sobre o corpo de prova, simulando as condições de campo através de ciclos de repetição, este é o ensaio mais empregado no Brasil. O ensaio a deformação controlada busca manter a deformação recuperável constante do início ao fim do teste, através de aplicações repetidas e decrescentes de tensões no corpo de prova, devido a sua grande dificuldade operacional este último método é pouco utilizado (FRANCO, 2007).

Em campo, Franco (2007) menciona que, ocorrem diversas condições de carregamento na estrutura, com o decorrer de sua utilização. Estes carregamentos,

normalmente, situam-se entre os limites definidos nos ensaios de fadiga, e causam alterações na resistência dos materiais asfálticos.

Deste modo, a estimativa de área trincada pode ser obtida através de função de transferência (FT) ou da aplicação de um fator de campo laboratório (FCL), que são respectivamente, uma correlação ou um fator de ajuste que permitem prever o desempenho do material em campo com base no comportamento apresentado por este durante os ensaios em laboratório.

Avaliando seis misturas asfálticas distintas, empregadas em 45 trechos de pavimentos situados na Cidade Universitária do Rio de Janeiro, com condições estruturais diferentes e diversos níveis de tráfego, em sua tese Fritzen (2016) desenvolveu uma FT para previsão dos danos de fadiga, baseada no estudo da fadiga e do módulo resiliente dos materiais asfálticos, através do ensaio de compressão diametral de carga repetida realizado em laboratório e do monitoramento da porcentagem de área trincada, observada em campo desde 2006.

A FT proposta por Fritzen (2016) também foi validada através de 13 segmentos experimentais construídos em diferentes regiões do país e monitorados por universidades pertencentes à Rede de Tecnologia em Asfaltos.

A partir do modelo de FT proposto por Fritzen em 2016, a calibração dos danos por fadiga foi atualizada para implantação no MeDiNa. A evolução da área trincada foi representada por uma curva sigmoideal em função do número N, definida matematicamente para melhor representar a evolução da área trincada dos segmentos monitorados (FRITZEN *et al.*, 2019; FRANCO E MOTTA, 2020). A expressão da curva sigmoide padronizada é dada pela Equação:

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad ; \quad A = \left(\frac{N' - 1}{Z - 1} \right)^n \quad ; \quad B = \left(\frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (14)$$

Onde:

Z e n – são parâmetros da curva sigmoide, sendo 0,25 e 5,0 respectivamente ($R^2=0,82$);

AT (%) – é a área trincada estimada em percentual; e

N' – é o número equivalente deslocado (ou N ajustado).

Segundo Fritzen *et al.* (2019) e Franco e Motta (2020), o valor N' é obtido através da multiplicação do número N do período por fatores de deslocamentos, para

minimizar o erro entre a evolução da área trincada e da curva sigmoide. A partir das seções avaliadas, chegou-se à Equação 15 para determinação do número N' :

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (15)$$

Onde:

N – é o número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição da área trincada;

fS – é o fator de deslocamento atribuído de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão; e

N' – é o número equivalente deslocado (ou N ajustado).

Seguindo o proposto por Fritzen (2016), os fatores de deslocamentos são correlacionados com o dano médio de fadiga, este era inicialmente calculado em 110 pontos da camada de revestimento. Para simplificar o processo Fritzen *et al.* (2019) e Franco e Motta (2020) explicam que a análise foi reduzida para uma malha distribuída em 20 pontos, sendo 10 na superfície e 10 pontos na base da camada asfáltica; e o dano médio pode ser calculado pela Equação 16:

$$D_{médio} = \frac{1}{20} \cdot \sum \left(\frac{1}{N} \right)_{t,c} \quad (16)$$

Onde:

$D_{médio}$ – é o dano médio dos 20 pontos; e

N – é o número de fadiga (N_f).

Por fim, a FT transforma o dano médio dos 20 pontos analisados em área trincada prevista, através da expressão da função de deslocamento apresentada na Equação 17:

$$fS = C1 \cdot (D_{médio})^{C2} \quad R^2 = 0,8743 \quad (17)$$

Onde:

fS – é o fator de deslocamento;

$D_{\text{médio}}$ – é o dano médio dos 20 pontos; e

$C1$ e $C2$ – são constantes definidas no processo de calibração, cujos valores são 1993,7 e 0,3737 respectivamente.

Segundo Fritzen *et al.* (2019) e Franco e Motta (2020), a diferença entre AT prevista e AT observada em cada segmento analisado deu origem ao erro desta FT. Após o tratamento dos dados esse erro pode ser obtido por meio da regressão representada na Equação 18:

$$\text{Erro padrão} = 0,138 \cdot (AT_{\text{prevista}})^{0,3263} \quad R^2 = 0,9761 \quad (18)$$

Onde:

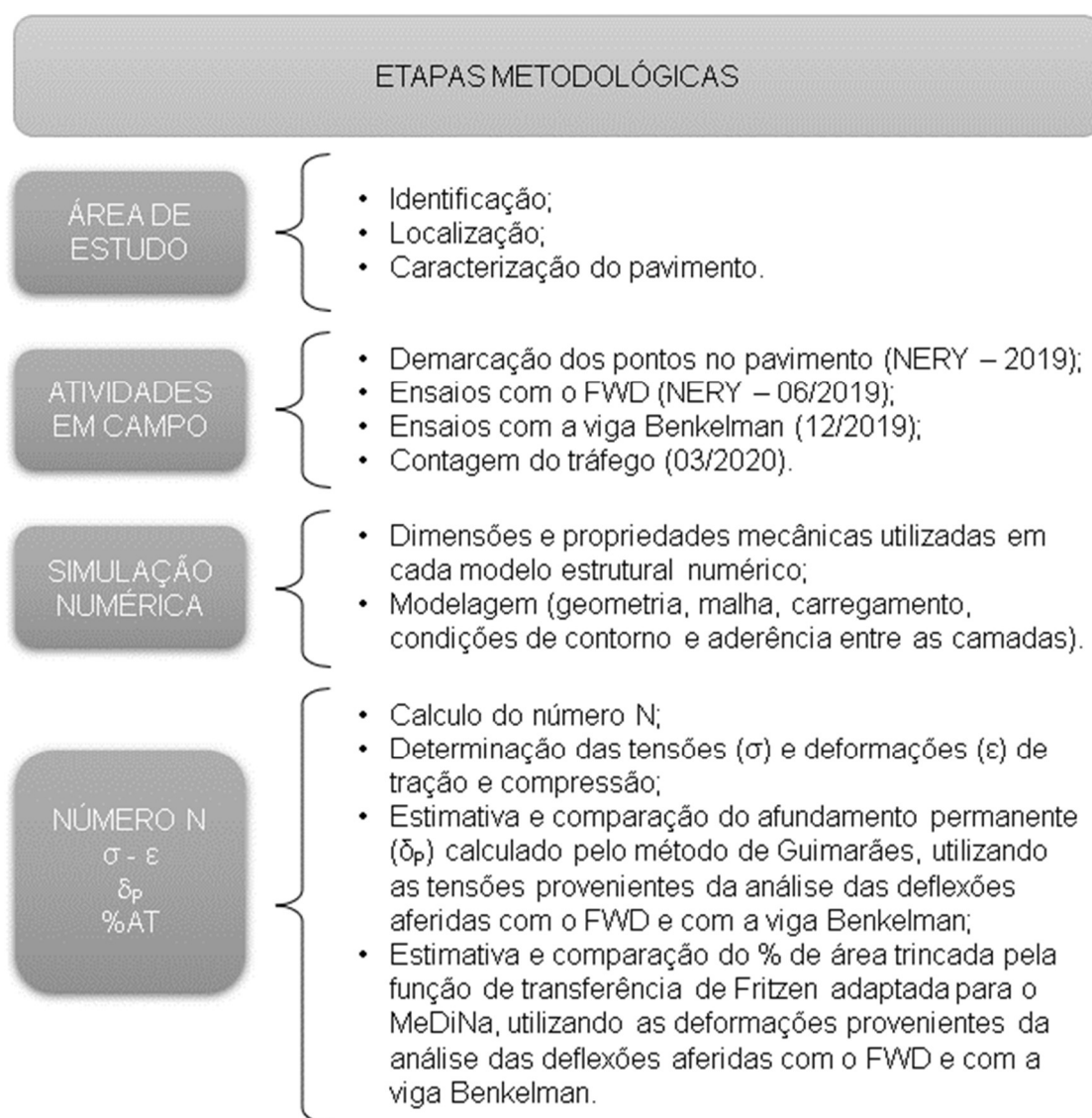
Erro padrão – é o erro da função de transferência;

AT_{prevista} – é a área trincada prevista determinada pela função de transferência.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo destina-se a descrição da área de estudo e das metodologias que foram desenvolvidas durante a pesquisa. A Figura 14, apresenta um fluxograma das etapas metodológicas.

Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Autora (2022).

As etapas sintetizadas no fluxograma acima, são detalhadas nos itens apresentados a seguir.

3.1 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Joinville é um município localizado ao norte do estado de SC, possui uma extensão territorial de aproximadamente 1.128 quilômetros quadrados (km²), e uma população estimada em cerca de 605 mil pessoas segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021a).

Araquari também é um município de SC que faz divisa com a região sudeste de Joinville (Figura 15), possui uma extensão territorial de aproximadamente 384 km² e uma população estimada em 41 mil pessoas (IBGE, 2021b).

Figura 15 – Mapa de localização dos municípios: Araquari e Joinville



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

A rodovia Rio do Morro, assinalada na cor vermelha na Figura 16, com aproximadamente 10 km de extensão, liga o bairro Paranaguamirim de Joinville/SC ao km 30 da BR-280 localizado no município de Araquari/SC. Segundo dados do Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina – DEINFRA-SC (2019), a rodovia teve 8,758 km implantados entre os anos de 2013 e 2015. Após paralizações, sua execução foi retomada no ano de 2019, contemplando uma obra de arte especial e mais 1,94 km de pavimentação, que foram concluídos em dezembro. Situada a

aproximadamente 6 km da BR-101, uma importante rodovia federal que liga o nordeste e o sul do país, após sua conclusão a rodovia Rio do Morro passa a ser uma importante rota para escoamento de cargas das indústrias localizadas em seu entorno.

Figura 16 – Mapa da rodovia Rio do Morro



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

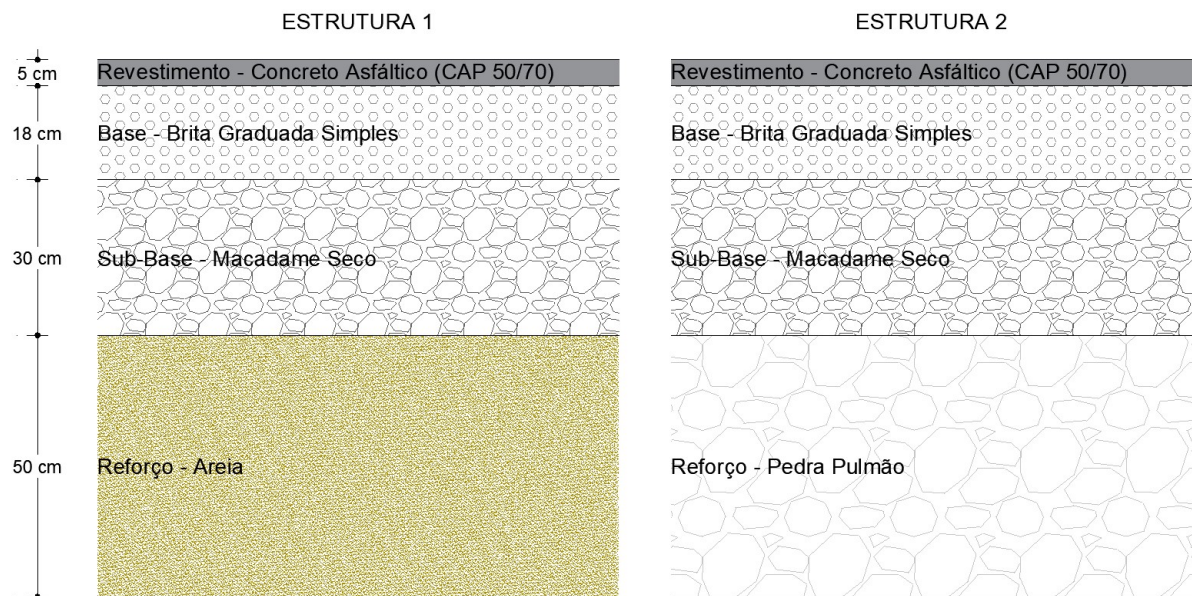
Por ser uma estrutura que não apresenta degradações visíveis, que contém trechos com composição estrutural distinta, e com diferentes idades, a rodovia Rio do Morro foi escolhida pela mestrandia Claudia Celene Zago Nery, para início dos estudos, que foram continuados com este trabalho.

A rodovia Rio do Morro foi projetada pela Azimute Engenharia e Planejamento SC Ltda, para o órgão estadual DEINFRA. No projeto, foram admitidos os seguintes parâmetros: velocidade diretriz entre 60 e 70 quilômetros por hora; rampa máxima com inclinação de 3%; 7,50 m de largura da pista de rolamento, com acostamentos de 1,50 m em ambos os lados, executados sobre uma plataforma com 13 m de largura; superelevação entre 3 e 8%; e tráfego de projeto, estimado em 2003, com o número N (USACE) de $2,3 \times 10^6$ veículos para o período de 15 anos (NERY, 2020).

Quanto à composição do pavimento, a rodovia possuiu camadas de revestimento, base e sub-base compostas pelo mesmo material, sendo,

respectivamente, concreto asfáltico com cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70, brita graduada simples - BGS e macadame seco. A camada de reforço foi executada com dois materiais distintos: pedra pulmão nas extremidades e areia no entremeio da rodovia (NERY, 2020). A Figura 17, apresenta a classificação atribuída à rodovia, segundo sua composição estrutural.

Figura 17 – Composição das camadas da rodovia



Fonte: Adaptado de Nery (2020).

3.2 ATIVIDADES EM CAMPO

Apresenta-se nesse item uma síntese dos ensaios não destrutivos e da contagem de tráfego realizados na rodovia estudada.

3.2.1 Realização dos ensaios com o FWD e com a viga Benkelman

Para realização dos ensaios, Nery (2020) segmentou a rodovia em seis trechos, que levaram em consideração os seguintes dados: ano de execução do pavimento, composição da camada de reforço, e região (urbana ou rural) na qual o trecho está localizado. A partir da classificação selecionaram-se 110 pontos ao longo da rodovia, que foram distribuídos entre os trechos adotados, conforme segmentação realizada.

A Tabela 5, apresenta a organização dos trechos, conforme os dados que ocasionaram sua segmentação.

Tabela 5 – Segmentação da Rodovia

Trecho	Ano de Pavimentação	Estrutura / Reforço	Região	Pontos	
				Quantidade	Numeração
01	2014	2 - Pedra Pulmão	Urbana	21	01 a 21
02	2014	1 - Areia	Rural	19	22 a 40
03	2019	1 - Areia	Rural	8	41 a 48
04	2019	1 - Areia	Rural	22	49 a 70
05	2014	1 - Areia	Rural	30	71 a 100
06	2019	2 - Pedra Pulmão	Rural	10	101 a 110

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Antes de iniciar os ensaios, Nery (2020) descreve que, inicialmente foi elaborada uma planilha com a numeração dos pontos, seu trecho de localização e suas coordenadas geográficas, referenciadas segundo Datum SIRGAS 2000. Em campo, foram necessários dois dias de trabalho em conjunto com um topógrafo e um auxiliar, para demarcar todos os pontos escolhidos. A marcação dos pontos está ilustrada na Figura 18 e os dados da localização dos pontos estão apresentados no anexo A.

Figura 18 – Marcação dos pontos de teste na pista



Fonte: Nery (2020).

Conforme Nery (2020), o ensaio com o FWD foi realizado no dia 06 de junho de 2019, havia boa condição climática, e as temperaturas médias do ambiente e do pavimento, eram 22°C e 25°C, respectivamente. Os dados deste ensaio encontram-se disponível no anexo B.

O modelo do equipamento utilizado foi o KUAB FWD 50 FV112 (Figura 19), da fabricante sueca KUAB, cujo tempo de duração da aplicação da carga é de 40 a 60

ms, a placa de carga possui 300 mm de diâmetro, o sistema possui: 7 geofones, precisão de 1 micrômetro e, dispositivos para medição da temperatura do ar e da superfície do pavimento (CESTINÁ DATABANKA, 2016; NERY, 2020).

Seguindo as orientações da norma 273-PRO (DNER, 1996), em cada um dos pontos foi aplicada uma carga de aproximadamente 40 kN, e registradas as medidas de deflexão sob o centro da placa e à 200, 300, 450, 600, 900 e 1200 mm afastadas deste.

Figura 19 – Equipamento FWD utilizado nos ensaios



Fonte: Nery (2020).

Os ensaios com a viga Benkelman (Figura 20) foram executados nos dias 03 e 06 de dezembro de 2019, devido a conciliação de disponibilidades de equipamento, veículos e equipe, não foi possível realizar estes ensaios logo após o FWD, gerando um intervalo aproximado de seis meses entre os ensaios.

Figura 20 – Realização do ensaio com a viga Benkelman



Fonte: Autora (2019).

O procedimento do teste seguiu as recomendações das normas 024-ME (DNER, 1994) e 133-PRO (DNIT, 2010b). Na execução do ensaio foi utilizado um caminhão com eixo traseiro simples de rodas duplas, carregado com 8,2 tf (80 kN) e pneus calibrados com pressão de 550 quilopascal (kPa), uma viga com proporção entre braços de 2:1 e um extensômetro com sensibilidade mínima de 0,01 mm.

Foram medidas as deflexões obtidas com as rodas posicionada a: 0, 200, 300, 450, 600, 900 e 1200 mm da ponta de carga da viga, seguindo as mesmas distâncias obtidas com o FWD. Durante a realização dos ensaios com a viga Benkelman, aferições manuais das temperaturas, foram registradas com um termômetro infravermelho, e as médias obtidas foram de 27°C para o ambiente e 35°C para o pavimento. Os dados deste ensaio encontram-se disponível no apêndice A.

3.2.2 Contagem do tráfego

Para levantamento do tráfego da rodovia, foi realizada uma contagem volumétrica manual de 16 horas, entre às 06:00 e às 22:00, no dia 18 de março de 2020 (quarta-feira). A contagem teve caráter classificatório e quantitativo, na qual observou-se os tipos de veículos que trafegavam por ambas as faixas.

O posto de contagem foi estabelecido em frente a empresa CISER, como observado na Figura 21, visto que, trata-se de uma indústria de grande porte, na qual há um fluxo significativo de veículos comerciais. Além da CISER, há uma empresa de mineração situada na rodovia, a qual também apresenta uma parcela significativa da composição do tráfego de veículos pesados.

Figura 21 – Realização da contagem de tráfego



Fonte: Autora (2020).

Ressalta-se também que no dia da contagem entrou em vigor o decreto 515/2020 do Estado de Santa Catarina (2020), o qual estabeleceu situação de emergência no estado e iniciou as restrições de atividades por conta da pandemia do vírus COVID-19. Na data em questão, foram suspensas algumas atividades não essenciais, o que pode ter gerado um leve impacto no tráfego de veículos leves, não acarretando variações significativas ao tráfego de veículos pesados.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS DE DEFLEXÃO E DETERMINAÇÃO DO MÓDULO RESILIENTE EQUIVALENTE

O tratamento dos dados de campo, bem como a retroanálise das bacias de deflexão e a determinação dos módulos equivalentes foram objetos de estudo do trabalho desenvolvido por Nery (2020). Este tópico apresenta um breve resumo dos métodos e considerações adotados pela autora.

Nery (2020) explica que os módulos equivalentes foram determinados a partir das bacias de deflexões determinadas em campo com o FWD e com a viga Benkelman, para cada um dos pontos de teste e para cada camada do pavimento. O processo de retroanálise foi realizada no *software* BackMeDiNa, versão 1.1.0 (abril/2018), a autora justifica que já havia realizado todas as retroanálises quando o DNIT apresentou a versão 1.2.0, uma nova atualização do programa disponibilizada em junho de 2020, por este motivo, manteve os resultados obtido com a versão 1.1.0.

Seguindo o procedimento adotado por Bueno (2016), para reduzir o tempo de processamento da retroanálise, consideraram-se as camadas de reforço e de subleito como um “sistema subleito”, constituído pelo solo natural do terreno da região e seu reforço, portanto, atribuiu-se um único valor de módulo para os materiais presentes abaixo da sub-base (NERY, 2020).

O modelo de arquivo CSV disponível no BackMeDiNa foi utilizado para importação das informações necessárias para a retroanálise. Nos dados obtidos pelo FWD o arquivo CSV foi preenchido com: o número da seção, o raio da placa de aplicação de carga do FWD, a data dos ensaios, as temperaturas do ar e da superfície do pavimento, a carga aplicada, o número das estacas (representando os pontos dos ensaios) e os valores de deflexão aferidos em campo (NERY, 2020).

Como o BackMeDiNa foi desenvolvido para utilização de dados obtidos com o FWD, Nery (2020) salienta que sua utilização para a viga Benkelman necessita de algumas adequações nas condições de carregamento antes do preenchimento do arquivo CSV. Portanto, realizou-se a conversão do eixo padrão conforme metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009), considerando o carregamento aplicado por apenas uma das rodas do semieixo, as deflexões foram então divididas por dois para representar o efeito gerado por uma única roda, e as distâncias entre as medidas das deflexões foram recalculadas conforme Equação 19 proposta pelo método e ilustração apresentada na Figura 22.

$$X_i = [(x_i)^2 + (0,5 \cdot dcg)^2]^{1/2} \quad (19)$$

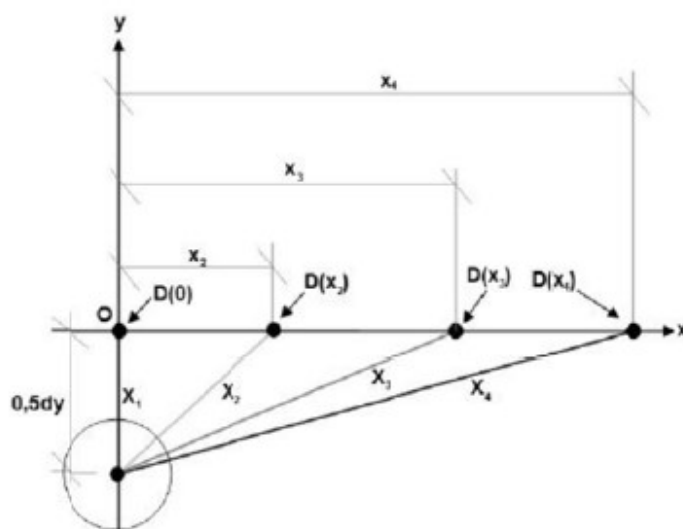
Onde:

X_i – distância recalculada entre os pontos da bacia de deflexão, similar às distâncias do FWD;

x_i – distância entre os pontos da bacia de deflexão aferidas com a VB;

dcg – distância entre o centro geométrico das placas.

Figura 22 – Conversão de carregamento e das deflexões da viga Benkelman



Fonte: Adaptado de Theisen *et al.* (2009).

Para o processo de retroanálise, Nery (2020) ressalta que os dados das deflexões informados no arquivo CSV, levaram em consideração a correção da temperatura para 25°C apenas para o valor de D_0 .

Após o preenchimento dos arquivos CSV, Nery (2020) seguiu com a importação dos dados para o BackMeDiNa, informando no programa as camadas do pavimento e suas respectivas espessuras, os valores arbitrários iniciais dos módulos de cada camada e; os coeficientes de *Poisson* dos materiais que foram adotados conforme sugestão do programa para cada tipo de material. A Tabela 6 apresenta um resumo dos parâmetros informados ao programa.

Tabela 6 – Parâmetros informados no BackMeDiNa para retroanálise

Camada	Espessura	ν	Módulo inicial arbitrado	Condição de Aderência
Asfáltica – revestimento	5 cm	0,30	4.000 MPa	“não aderida”
Granular – base de BGS	18 cm	0,40	300 MPa	
Granular – sub-base em macadame seco	30 cm	0,40	200 MPa	
Subleito	-	0,45	100 MPa	

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Os módulos iniciais arbitrados por Nery (2020) foram fundamentados em estudos de Camarini, Silva Jr. e Fontenele (2018), os quais demonstraram que há pouca influência dos módulos iniciais arbitrados na obtenção dos módulos finais; e na pesquisa de Bueno (2016), que adotou módulos iniciais relativamente baixos buscando evitar a compensação modular entre as camadas. Quanto a condição de aderência, esta seguiu o manual de utilização do método MeDiNa, que estabelece que condição “aderida” ocorre na interface entre camadas asfálticas, situação inexistente no pavimento estudado.

Informados e importados todos os dados necessários, Nery (2020) afirma que acionou o botão de cálculo, denominado de retroanálise no programa, duas vezes buscando uma melhor aproximação entre as bacias de deflexões medidas em campo e as calculadas, essa melhoria é representada pela redução no valor do *Root-mean-square* – RMS expresso em micrometro – μm .

Para os resultados encontrados com as deflexões aferidas com o FWD buscou-se obter um erro inferior a 5 μm , em tal situação o programa destaca o ponto analisado na cor verde e indica que há uma boa correlação entre as deflexões medidas e calculadas. Para os resultados provenientes dos dados levantados com a viga Benkelman, devido a menor precisão do equipamento, o erro admitido variou entre 5

e 10 μm , nestes casos o ponto analisado foi destaca em amarelo, indicando uma correlação razoável entre as deflexões de campo e as calculadas (NERY, 2020).

Assim como para as deflexões, Nery (2020) avaliou os dados dos MReqv com gráficos de caixa, identificando alguns pontos classificados com *outliers*, por este motivo, além dos pontos já mencionados nº 2, 35 e 67 (item 2.6.3), a autora constatou a necessidade de remover também os pontos nº 16, 22, 33, 68, 71, 78, 79, 82, 92, 93, 108 e 110. Portanto, as demais análises realizadas com os valores de módulos foram baseadas nos 95 pontos de ensaio restantes. Os dados obtidos estão disponíveis nos Anexos C, D e.

A partir dos MReqv obtidos para cada um dos 95 pontos considerados, Nery (2020) calculou o MReqv médio para cada um dos 6 segmentos estudados, os valores estão disponíveis na Tabela 7, apresentada adiante.

3.4 CÁLCULO DO NÚMERO N

Para determinação do número N com base na contagem de tráfego, conforme orientações contidas no manual de estudo de tráfego do DNIT (2006c) e com base nas observações realizadas durante a contagem, foram consideradas as seguintes premissas:

- Cálculo do fator equivalente de carga (FEC) conforme os modelos propostos pela AASHTO e pela USACE;
- Crescimento do tráfego em projeção geométrica, adotando a taxa usual de 3% ao ano;
- Quanto ao período, o número N foi calculado individualmente para os anos de 2020 a 2034, sendo também apresentado a cada ano o valor acumulado deste;
- O volume obtido na contagem de 16 horas foi admitido como volume médio diário (VMD) para os dias de semana. Para os finais de semana foi atribuída uma redução de 80% no volume dos veículos comerciais e um acréscimo de 30% no volume de veículos leves;
- Quanto a carga dos veículos comerciais, foi considerado que 100% destes trafegavam com a carga máxima permitida por eixo, conforme legislação vigente no país.

As premissas adotadas para consideração do volume foram definidas pela constatação de que a maior parte dos veículos comerciais pesados tinham como origem ou destino a empresa CISER, e esta não opera aos finais de semana, portanto, presume-se que há uma queda significativa desses veículos na rodovia em questão. Já o acréscimo de veículos leves aos finais de semana, deve-se ao fluxo de carros que vão para o litoral catarinense, neste caso a rodovia Rio do Morro surge como uma rota alternativa de acesso a BR-101, por intermédio da BR-280, para os moradores da região.

3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As tensões e deformações que ocorrem no pavimento, durante a aplicação de uma carga, foram obtidas com o MEF, através de um modelo elástico linear simulado no *software* ABAQUS. A seguir estão descritas as etapas da simulação numérica.

3.5.1 Definição das dimensões e das propriedades mecânicas

Para realização das simulações, foram constituídos para cada um dos seis trechos estudados, dois modelos estruturais, totalizando doze configurações. A diferença entre esses dois modelos está nos módulos equivalentes, no modelo 1 os valores foram determinados com a retroanálise das bacias de deflexões obtidas com o FWD, e no modelo 2 com as deflexões obtidas com a viga Benkelman.

As espessuras utilizadas em cada camada foram adotadas conforme as composições estruturais reais da rodovia já apresentadas na Figura 13, admitindo a mesma consideração adotada por Nery (2020) do conjunto subleito composto pelas camadas de reforço e subleito, sendo esta admitida como uma camada infinita.

Para cada camada foi adotado o valor médio de módulo equivalente obtido para cada trecho, considerando os 95 pontos remanescentes da pesquisa, bem como os coeficientes de *Poisson* utilizados na retroanálise. A Tabela 7 apresenta um resumo das espessuras e das propriedades mecânicas utilizadas em cada um dos modelos estruturais numéricos.

Tabela 7 – Espessuras e propriedades mecânicas do pavimento consideradas nos modelos estruturais numéricos

Modelos FWD – Baseado nos ensaios com o FWD								
Camada	v	Espessura (cm)	MR _{eqv} do Trecho (MPa)					
			01	02	03	04	05	06
Revestimento Asfáltico	0,30	5	11.741	11.710	6.441	7.532	11.759	9.293
Base	0,40	18	906	882	383	561	869	629
Sub-base	0,40	30	589	570	283	383	530	424
Conjunto Subleito	0,45	400	191	221	160	188	262	230
Modelo Estrutural Numérico			FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6

Modelos VB – Baseado nos ensaios com o VB								
Camada	v	Espessura (cm)	MR _{eqv} do Trecho (MPa)					
			01	02	03	04	05	06
Revestimento Asfáltico	0,30	5	8.852	10.734	7.640	10.547	11.555	9.655
Base	0,40	18	673	822	586	792	869	724
Sub-base	0,40	30	432	539	388	512	571	459
Conjunto Subleito	0,45	400	146	150	132	179	281	193
Modelo Estrutural Numérico			VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6

Fonte: Autora (2022).

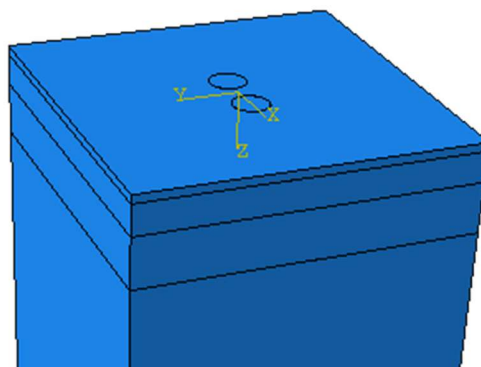
O conjunto subleito, considerado como uma camada semi-infinita, teve sua altura fixada em quatro metros, espessura suficiente para adequar o modelo a condição semi-infinita. Esta escolha seguiu o critério já empregado no programa FEPAVE2 conforme Medina e Motta (2015) e, também foi empregada por Santos (2018) em suas simulações.

As dimensões X e Y (largura e comprimento) do modelo tiveram suas medidas fixadas em dois metros, visto que as tensões provocadas pela carga não são significativas em distâncias maiores que estas, os mesmos valores também foram adotados por Santos (2018).

3.5.2 Modelagem

A modelagem da geometria teve um sistema cartesiano espacial, onde os eixos X, Y e Z correspondiam, respectivamente, à direção transversal da rodovia, à direção longitudinal da rodovia da rodovia, e à profundidade do pavimento (Figura 23).

Figura 23 – Modelo da estrutura e sua disposição espacial



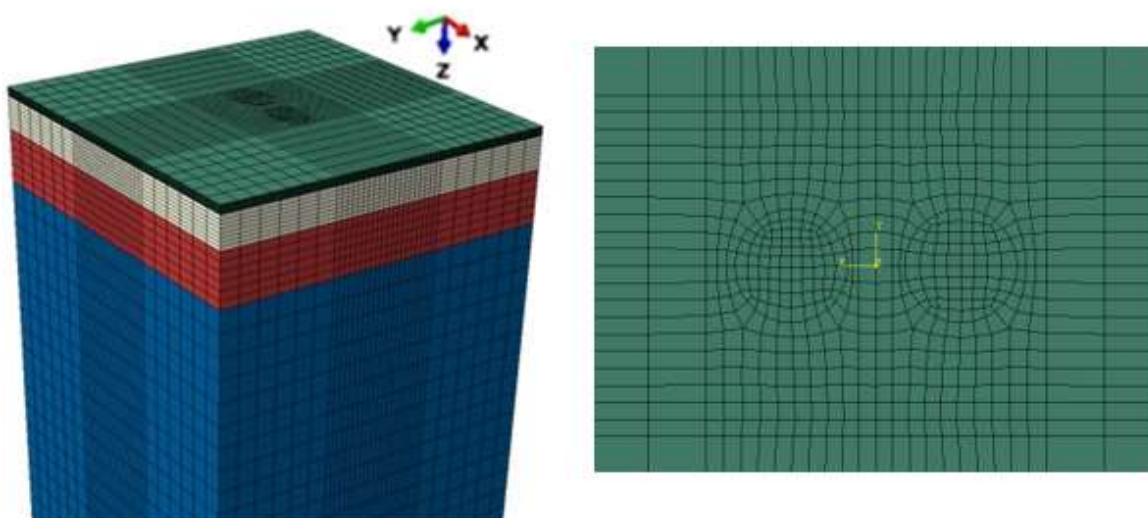
Fonte: Autora (2022).

O modelo espacial escolhido foi o tridimensional, pois, este permite a modelagem de contato da interface das camadas, permitindo a representação da condição de aderência entre estas.

3.5.3 Malha de elementos finitos

A discretização das estruturas simuladas foi realizada com elementos hexaédricos regulares e irregulares (estes últimos utilizados na região de aplicação de carga), lineares e compostos por 8 nós. A malha gerada não foi homogênea, sendo composta por elementos com dimensões menores nas proximidades das cargas e, à medida que se afastavam desse ponto, as dimensões foram aumentando. A Figura 24 ilustra o modelo de malha utilizada nas análises.

Figura 24 – Modelo de malha utilizado nas simulações

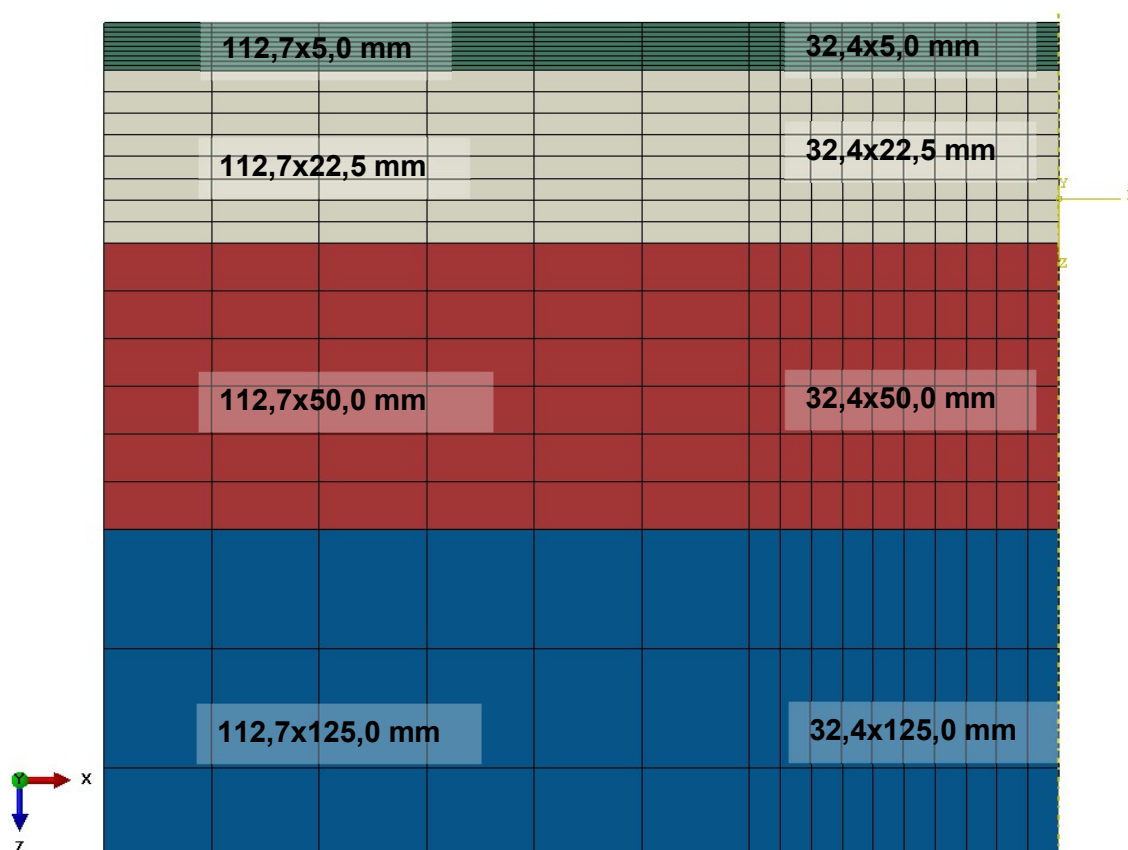


Fonte: Autora (2022).

As malhas foram geradas com 59.884 elementos, dos tipos C3DR8 e C3D8RH, totalizando 68.178 nós. As dimensões dos elementos são apresentadas na Figura 25, e sua configuração se deu da seguinte forma:

- Do eixo central $x=0$ até $x=-324$ mm foram configurados 10 elementos, a mesma condição se deu para o sentido positivo do eixo x e, para o eixo y ;
- Considerando a profundidade (eixo z), a camada de revestimento foi dividida em 10, a camada de base em 8, a camada de sub-base em 6 e a camada do conjunto subleito em 32 partes.

Figura 25 – Dimensões dos elementos da malha



Fonte: Autora (2022).

3.5.4 Carregamento e condições de contorno

A carga do tráfego utilizada na simulação seguiu as definições do eixo padrão rodoviário (Figura 26), admitindo uma pressão de contato uniforme de 0,56 megapascal (MPa) distribuída sobre a área de uma circunferência com raio de 10,79 centímetros (cm).

Figura 26 – Eixo padrão rodoviário

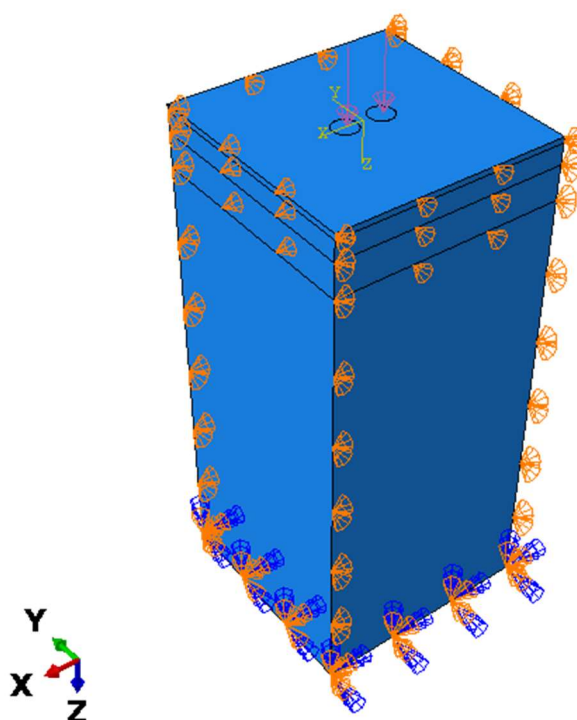


Fonte: Franco e Motta (2020).

O carregamento aplicado foi estático e considerou apenas as cargas verticais do tráfego. Para realização das simulações, considerando a simetria do veículo, um modelo representativo de um semieixo foi posicionado apenas no centro da placa, visto que, os ensaios não destrutivos foram realizados à 90 cm da borda do pavimento e que tanto os estudos de Bordin (2010) e Santos (2018) como as análises realizadas pelo MeDiNa (DNIT, 2020) também demonstram que, tratando-se de pavimentos flexíveis as rupturas por afundamento de trilha de rodas e trincamento, usualmente ocorrem na região interna da estrutura e não em suas bordas.

A Figura 27 ilustra o modelo do carregamento e das condições de contorno empregados na análise.

Figura 27 – Modelo do carregamento e das condições de contorno



Fonte: Autora (2022).

As condições de contorno refletem as possibilidades de deslocamento da estrutura durante a passagem do veículo, na simulação foram aplicadas as seguintes premissas:

- Base do conjunto subleito engastada, impedindo qualquer movimento de translação;
- No plano XZ o deslocamento em Y foi impedido nas extremidades laterais;
- No plano YZ o deslocamento em X foi impedido nas extremidades laterais.

3.5.5 Aderência entre as camadas

Conforme estudo de aderência de camadas dos pavimentos realizado por Santos, Assis e Fernandes Jr. (2019), a interação entre estas foi modelada no ABAQUS através da definição de características de contato entre superfícies. Conforme este mesmo estudo, para simular a não aderência das camadas, o contato entre as superfícies é realizado pelo modo “*Simple Friction*”, que se baseia no modelo de Coulomb (Equação 20) aplicando condição livre de deslizamento entre as superfícies, representada pelo coeficiente de atrito (μ) igual a zero.

$$\tau_{crit} = \mu \cdot p \quad (20)$$

Onde:

τ_{crit} – tensão crítica de cisalhamento;

μ – coeficiente de atrito;

p – pressão de contato entre as superfícies.

Considerando que a estrutura do pavimento não funciona como um bloco, portanto, a condição de aderência total ($\mu=1$) não se aplica e; a situação de não aderência ($\mu=0$) representaria uma condição de livre deslizamento entre as camadas, circunstância esta que também não ocorre. Nas simulações admitiu-se uma aderência parcial entre as camadas representada pelo coeficiente de atrito $\mu=0,50$.

3.6 TENSÕES E DEFORMAÇÕES

A resposta estrutural do pavimento foi comparada conforme valores obtidos de:

- Tensão de tração (σ_t) e deformação de tração (ϵ_t) na base da camada de revestimento;
- Para as camadas intermediárias a tensão de compressão (σ_c) e a deformação de compressão (ϵ_c), no meio de cada camada;
- Tensão de compressão e deformação de compressão, a 25 cm de profundidade do topo do subleito.

Em cada uma das profundidades citadas, foram obtidos três pontos afastados radialmente entre si.

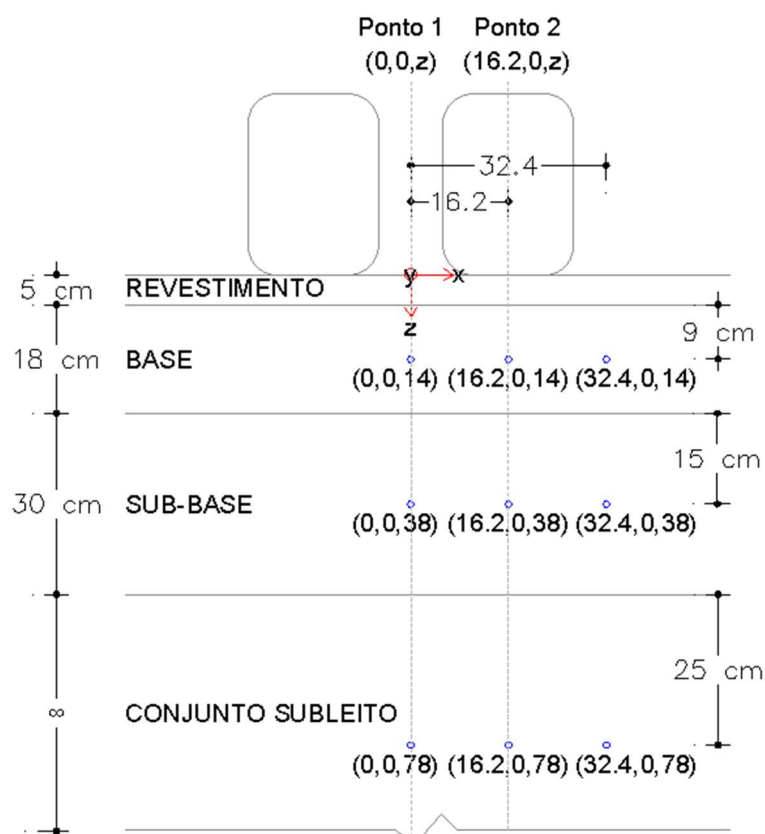
A Tabela 8 apresenta um resumo dos pontos que foram analisados e as deformações e tensões consideradas nas comparações e a Figura 28 ilustra o posicionamento destes pontos.

Tabela 8 – Pontos de análise e tipos de tensões e deformações analisadas

Ponto	Posição	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Def./Ten.
1	Centro de aplicação de carga	0,0	0	5	ϵ_t, σ_t
				14	
				38	ϵ_c, σ_c
				78	
2	Centro da roda	16,2	0	5	ϵ_t, σ_t
				14	
				38	ϵ_c, σ_c
				78	
3	Afastado 5,4 cm da borda externa da roda	32,4	0	5	ϵ_t, σ_t
				14	
				38	ϵ_c, σ_c
				78	

Fonte: Autora (2022).

Figura 28 – Pontos de análise das tensões e deformações



Fonte: Autora (2022).

3.7 ESTIMATIVA DO AFUNDAMENTO PERMANENTE E DA ÁREA TRINCADA AO FIM DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO

O afundamento permanente das camadas granulares e o percentual de trincamento do revestimento ao final da vida útil da estrutura, foi estimada com base nos modelos propostos por Guimarães 2009 e por Fritzen adaptado para o MeDiNa, respectivamente.

3.7.1 Estimativa e comparação do afundamento permanente do pavimento

O afundamento permanente das camadas granulares ao fim da vida útil do pavimento foi estimado conforme modelo desenvolvido por Guimarães (Equação 7), item 2.3.5. O modelo em questão foi escolhido, pois, dentre os apresentados neste trabalho é o único que estima o valor de deformação permanente.

Ressalta-se também que o método formulado por Guimarães, além de estudos desenvolvidos em outros países, levou em consideração as características dos materiais granulares existentes no Brasil; os quais apresentam comportamentos

específicos por causa de sua formação em região com clima tropical. Por este motivo, métodos estrangeiros para o cálculo da deformação permanente não foram abordados neste trabalho.

Para aplicação do método de Guimarães, é necessário: a determinação dos coeficientes ψ dos materiais através do ensaio triaxial de carregamento cíclico, a definição das tensões atuantes (σ_d e σ_3) e a estimativa do número N .

Os ensaios triaxiais dos materiais utilizados na rodovia estudada, ainda são desconhecidos, por este motivo, adotou-se os coeficientes ψ de materiais granulares ensaiados em outras pesquisas.

A fim de estimar o afundamento permanente do pavimento da Rodovia Rio do Morro, fez-se duas combinações de materiais granulares, sendo uma composta por materiais menos deformáveis e outra composta por materiais mais deformáveis. Desta forma obteve-se um intervalo de valores, no qual o δ_P TOTAL da rodovia estudada foi enquadrado.

Como o objetivo também foi comparar os resultados gerados pelos modelos estruturais numéricos FWD e VB, a escolha de duas combinações de estruturas se justifica, pois, pode identificar um padrão durante as comparações.

Na primeira combinação (combinação 1), realizada com materiais menos deformáveis, adotou-se para a camada do conjunto subleito as propriedades da areia fina laterítica estuda por Guimarães, Motta e Castro (2018); na sub-base foram consideradas as propriedades do cascalho de Corumbaíba estudado por Guimarães (2009) e; na base, o material escolhido foi a brita graduada de Chapecó, também estudada por Guimarães (2009). As propriedades dos materiais utilizados na combinação 1 estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos materiais granulares considerados para o cálculo da deformação permanente – combinação 1

Material	Camada	Massa específica (kg/m ³)	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4
			kgf/cm ²			
Areia fina laterítica	Conjunto subleito	1.875	0,021	-0,086	1,370	0,116
Cascalho de Corumbaíba	Sub-base	1.998	0,180	-0,212	0,840	0,044
Brita graduada de Chapecó	Base	2.270	0,079	-0,598	1,243	0,081

Fonte: Adaptado de Guimarães, Motta e Castro (2018) e Guimarães (2009).

Para a segunda combinação (combinação 2), realizada com materiais mais deformáveis, adotou-se para a camada do conjunto subleito as propriedades do solo argilo-siltoso estudado por Norback e Motta (2017); na sub-base foram consideradas as propriedades do da mistura solo brita (30% de solo laterítico argiloso + 30% de brita 1 e 40% de brita 0) estudado por Norback (2018) e; na base, o material escolhido foi a brita graduada C3 (gnaisse) estudada por Lima, Motta e Guimarães (2017). As propriedades dos materiais utilizado na combinação 2 estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades dos materiais granulares considerados para o cálculo da deformação permanente – combinação 2

Material	Camada	Massa específica (kg/m ³)	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4
			kgf/cm ²			
Solo argilo-siltoso	Conjunto subleito	1.683	0,395	0,844	0,540	0,067
Mistura de solo brita	Sub-base	2,380	0,270	-0,148	1,333	0,062
Brita graduada C3	Base	2.211	0,128	-0,409	1,050	0,074

Fonte: Adaptado de Norback e Motta (2017), Norback (2018) e Lima, Motta e Guimarães (2017).

As tensões desvio e confinante utilizadas no cálculo foram extraídas das simulações numéricas realizadas; para cálculo da deformação permanente foram considerados dois pontos de análises, no centro de aplicação da carga do semieixo (ponto 1) e no centro da roda (ponto 2), considerando as tensões atuantes nas posições já indicadas na Tabela 8 e Figura 28.

O número N empregado na formulação foi estimado com base na contagem do tráfego realizada obtido pelo método de cálculo da USACE.

Para fazer a comparação do δ_P TOTAL dos modelos estruturais numéricos formulados a partir das deflexões aferidas com o FWD e com a viga Benkelman, foi realizado o teste t de *Student*, considerando amostras pareadas, pois, o ponto de ensaio foi o mesmo para ambos os equipamentos. O nível de significância (α) adotado foi de 5% e as hipóteses consideradas foram:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

Salienta-se aqui que, como o objetivo do trabalho foi aprofundar a comparação entre os ensaios não destrutivos realizados com o FWD e com a viga Benkelman, a adoção de parâmetros de materiais ensaiados em outras pesquisas se justifica, visto que, para ambos os ensaios são utilizados os mesmos valores de ψ , o que varia em cada caso são as tensões.

3.7.2 Percentual de área trincada

Para estimativa do percentual de área trincada do revestimento ao final da vida útil do pavimento, foi empregado o modelo proposto por Fritzen adaptado para o MeDiNa. Este modelo foi escolhido, pois, considera mais pontos na camada de revestimento (20 pontos) quando comparado com outros modelos apresentados nesta pesquisa.

As características da mistura asfáltica utilizadas na formulação do modelo, para estimar a área trincada do pavimento em estudo, foram obtidas na base de dados do *software* MeDiNa (DNIT, 2020). Segundo manual deste os mais de cem ensaios de fadiga de misturas asfálticas realizadas no laboratório da COPPE foram separados em quatro classes de fadiga, conforme tráfego suportado pela estrutura até atingir 30% de área trincada, conforme critérios a seguir:

- Misturas que não suportaram $4,5 \times 10^6$ repetições do eixo padrão, foram descartadas por trincarem muito rapidamente.
- Misturas Classe 1 suportaram entre $4,5 \times 10^6$ e $6,0 \times 10^6$ repetições do eixo padrão. Cujos parâmetros da curva de fadiga são $k_1 = 5,496 \times 10^{-11}$ e $k_2 = -3,253$;
- As misturas Classe 2 suportaram entre $6,0 \times 10^6$ e $7,5 \times 10^6$ repetições do eixo padrão. Cujos parâmetros da curva de fadiga são $k_1 = 1,11 \times 10^{-13}$ e $k_2 = -3,979$;
- As misturas Classe 3 suportaram entre $7,5 \times 10^6$ e $1,0 \times 10^7$ repetições do eixo padrão. Cujos parâmetros da curva de fadiga são $k_1 = 1 \times 10^{-12}$ e $k_2 = -3,75$;
- As misturas Classe 4 suportaram mais do que $1,0 \times 10^7$ repetições do eixo padrão. Cujos parâmetros da curva de fadiga são $k_1 = 1,91 \times 10^{-5}$ e $k_2 = -1,9$.

Na estimativa da área trincada foram consideradas as 4 classes de misturas asfálticas, a fim de obter uma faixa de valores na qual o pavimento da rodovia Rio do Morro foi enquadrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONTAGEM DE TRÁFEGO E DETERMINAÇÃO DO NÚMERO N

Os dados com a contagem horária do tráfego estão disponíveis no apêndice B, a Tabela 11 apresenta um resumo dos tipos e do volume de veículos observados, indicando o volume considerado para os dias de segunda à sexta-feira e para o final de semana, conforme premissas estipuladas na metodologia.

Tabela 11 – Resumo da contagem de tráfego

Tipo		Volume (Seg. a Sex.)		Volume (Sab. e Dom.)		Volume (VMD)	
Veículos Leves		3.547	89,84%	4.611	98,27%	3.851	92,59%
Caminhões	2C	176	9,73%	35	1,64%	136	7,10%
	3C	172		34		133	
	2S2	8		2		6	
	2S3	8		2		6	
	3S2	3		1		2	
	3S3	13		3		10	
	3T6	2		0		1	
	3Q6	2		0		1	
Ônibus	2C	13	0,33%	3	0,06%	10	0,24%
Retroescavadeira		4	0,10%	1	0,02%	3	0,07%
Total		3.948	100%	4.692	100%	4.159	100%

Fonte: Autora (2020).

O VMD obtido da média ponderada dos volumes foi de 4.159 veículos, a maior parcela destes é classificada como leve (92,59%), portanto, o fator de frota obtido foi de 7,41%. O fator de distribuição é de 50%, visto que se trata de uma pista simples, e a contagem considerou o fluxo dos dois sentidos.

O fator veículo cálculo pelas equações da USACE resultou em 6,90 e o calculado pelas equações da AASHTO resultou em 2,49, a razão entre os dois fatores foi de 2,77, o que corrobora com os estudos realizados por Klamt (2014), cujas relações entre N_{USACE}/N_{AASHTO} variaram entre 1,96 e 4,16, sendo 3,00 o valor recomendado quando se desconhece essa razão.

A Tabela 12 apresenta os valores do número N_{AASHTO} e N_{USACE} , calculados para os anos de 2020 a 2034.

Tabela 12 – NAASHTO e NUSACE determinados para os anos de 2020 a 2034

Ano	NAASHTO		NUSACE	
	Período	Acumulado	Período	Acumulado
2020	1,40E+05	1,40E+05	3,88E+05	3,88E+05
2021	1,44E+05	2,84E+05	3,99E+05	7,87E+05
2022	1,49E+05	4,33E+05	4,11E+05	1,20E+06
2023	1,53E+05	5,86E+05	4,24E+05	1,62E+06
2024	1,58E+05	7,44E+05	4,36E+05	2,06E+06
2025	1,62E+05	9,06E+05	4,49E+05	2,51E+06
2026	1,67E+05	1,07E+06	4,63E+05	2,97E+06
2027	1,72E+05	1,25E+06	4,77E+05	3,45E+06
2028	1,77E+05	1,42E+06	4,91E+05	3,94E+06
2029	1,83E+05	1,61E+06	5,06E+05	4,44E+06
2030	1,88E+05	1,79E+06	5,21E+05	4,97E+06
2031	1,94E+05	1,99E+06	5,37E+05	5,50E+06
2032	2,00E+05	2,19E+06	5,53E+05	6,05E+06
2033	2,06E+05	2,39E+06	5,69E+05	6,62E+06
2034	2,12E+05	2,61E+06	5,86E+05	7,21E+06

Fonte: Autora (2020).

Destaca-se aqui que o tráfego estimado com base na contagem de tráfego realizada em 2020, resultou em um número N três vezes maior que o N de projeto de 2,3 E+06 admitido em 2003 para dimensionamento da estrutura.

A estimativa precisa do tráfego é uma das variáveis significativas para o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil e, essa defasagem de tempo que por vezes ocorre entre a elaboração do projeto e a execução deste, deve ser considerada em um redimensionamento do pavimento antes de sua execução.

Na rodovia em questão, os três trechos do pavimento foram concluídos em 2014 e o outros três foram finalizados em 2019, porém, a estrutura manteve o projeto de 2003 sem atualização do tráfego.

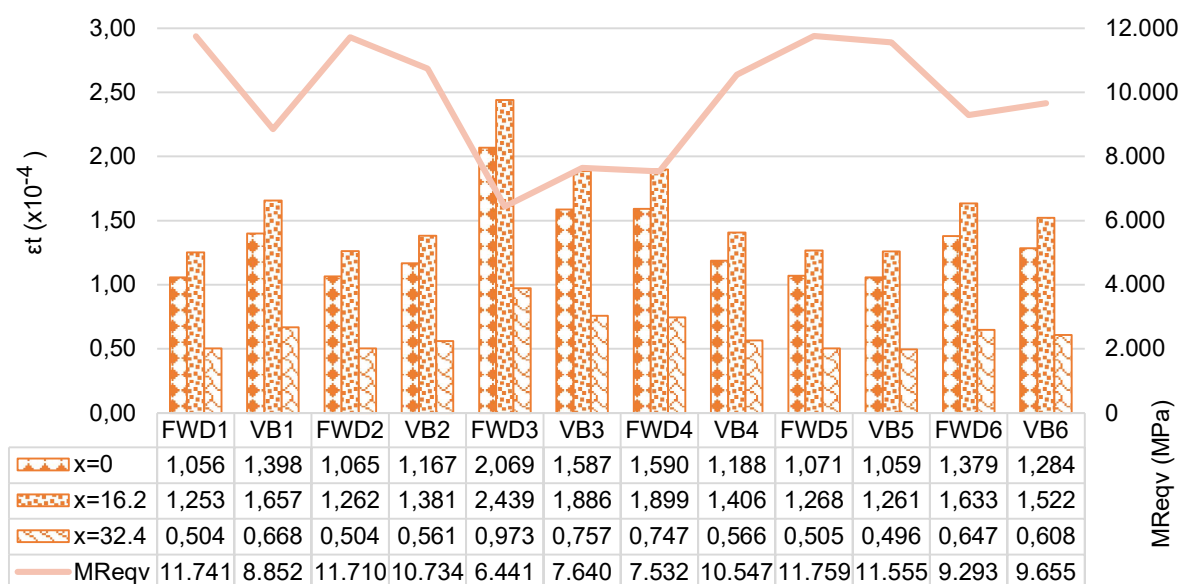
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES E DEFORMAÇÕES OBTIDAS PELOS MODELOS ESTRUTURAIS NUMÉRICOS

4.2.1 Deformações de tração e de compressão

Na Figura 29 é possível comparar os valores de ε_t obtidos na camada de revestimento; no centro de aplicação de carga ($x=0$ cm), no centro da roda ($x=16,2$

cm) e afastado 5,4 cm da borda externa da roda ($x=32,4$ cm), todos considerando a base da camada asfáltica ($z=5$ cm).

Figura 29 – Valores de ϵ_t obtidos na camada de revestimento

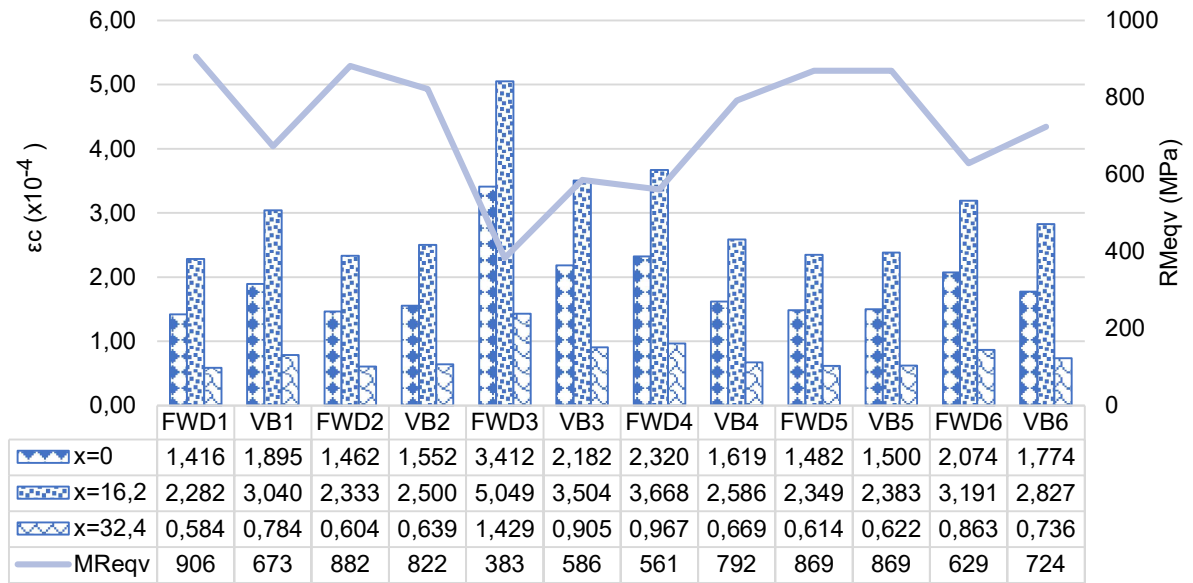


Fonte: Autora (2022).

Assim como constatado por Nery (2020) na análise das deflexões D_0 , também é possível observar nas ϵ_t que as maiores variações são apresentadas nos trechos 03, 04 e 06, cuja pavimentação foi concluída em 2019 e, portanto, ainda estão em consolidação.

A maior variação ocorreu na comparação entre os modelos FWD3 e VB3 chegando a uma diferença de 34% nos valores da deformação, e a menor variação ocorreu na comparação entre os modelos FWD5 e VB5, com uma diferença de 1%. Gomes (2012) obteve uma variação de 5,5% na comparação da configuração 30-40 com a viga Benkelman, constatou-se aqui que essa variação pode variar em função da composição estrutural e da idade do pavimento.

A Figura 30 apresenta os valores de ϵ_c obtidos na camada de base; observou-se um padrão de maiores deformações sob o centro da roda ($x=16,2$ cm), indicando que para a profundidade de 14 cm, é nesse ponto que o pavimento é mais solicitado durante a passagem do eixo padrão rodoviário. Esse comportamento também foi observado em medidas de deslocamentos na camada de base no estudo realizado por Santos (2018).

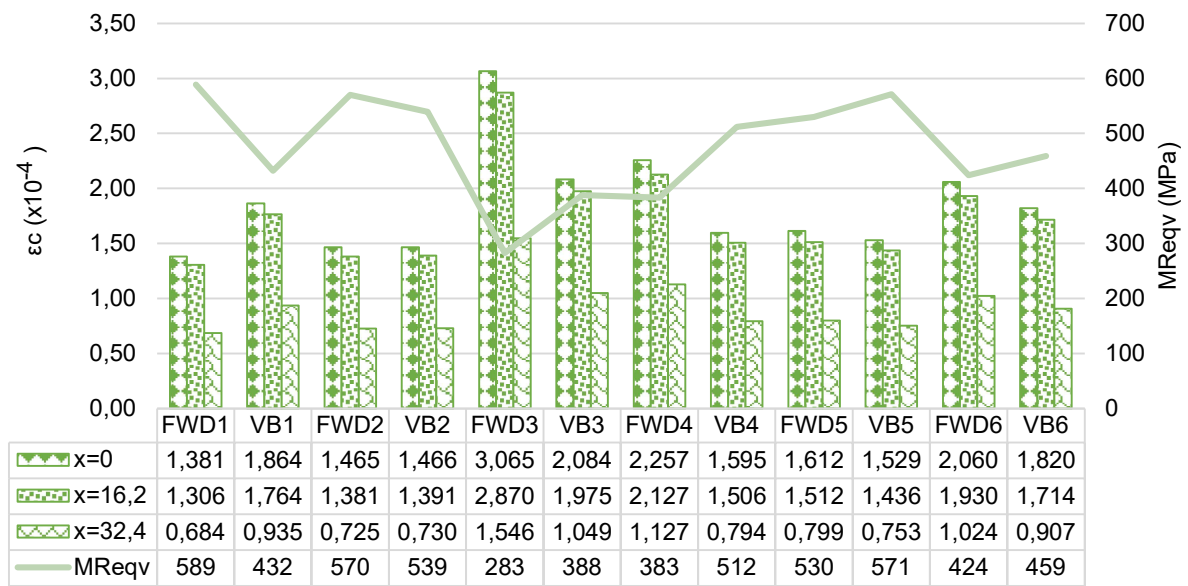
Figura 30 – Valores de ε_c obtidos na camada de base

Fonte: Autora (2022).

Na camada de base as maiores variações de ε_c ocorreram entre os modelos FWD3 e VB3, com uma diferença de $1,230 \times 10^{-4}$, $1,545 \times 10^{-4}$ e $0,523 \times 10^{-4}$ para $x=0$ cm, $x=16,2$ cm e $x=32,4$ cm, respectivamente. Já as menores variações ocorreram entre os modelos FWD5 e VB5, sendo elas $0,019 \times 10^{-4}$, $0,034 \times 10^{-4}$ e $0,008 \times 10^{-4}$ para $x=0$ cm, $x=16,2$ cm e $x=32,4$ cm, respectivamente.

Na camada de sub-base (Figura 31), as maiores deformações ocorrem sob o centro de aplicação de carga, porém, elas são bem próximas das deformações geradas no centro da roda.

Na camada de sub-base as maiores variações de ε_c ocorreram entre os modelos FWD3 e VB3, com uma diferença de $0,982 \times 10^{-4}$, $0,894 \times 10^{-4}$ e $0,497 \times 10^{-4}$ para as $x=0$ cm, $x=16,2$ cm e $x=32,4$ cm, respectivamente. Já as menores variações ocorreram entre os modelos FWD5 e VB5, sendo elas $0,083 \times 10^{-4}$ e $0,075 \times 10^{-4}$ e $0,008 \times 10^{-4}$ para $x=0$ cm e $x=16,2$ cm, respectivamente; já para $x=32,4$ cm a menor variação foi entre FWD2 e VB2 com $0,005 \times 10^{-4}$.

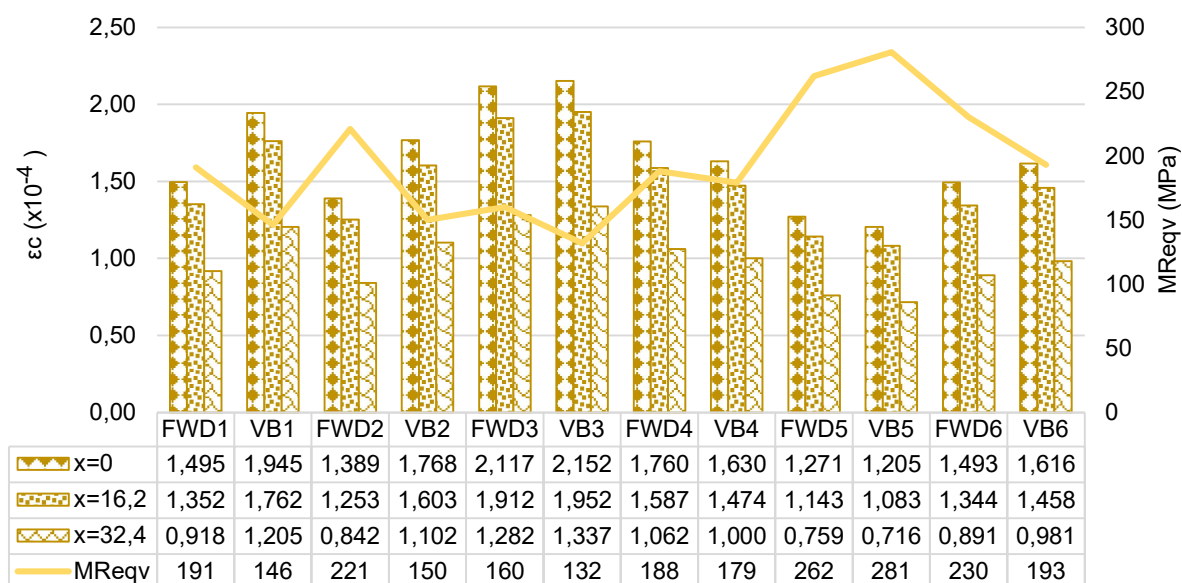
Figura 31 – Valores de ε_c obtidos na camada de sub-base

Fonte: Autora (2022).

A Figuras 30 e 31 também evidenciam que maiores variações ocorreram na comparação entre os modelos FWD1 e VB1 e FWD4 e V4, quando comparados aos trechos 02, 05 e 06.

Já na camada do conjunto subleito (Figura 32) as deformações maiores ocorrem no centro de aplicação da carga, indicando que nesta profundidade este é o ponto mais solicitado, esse comportamento também foi observado no topo do subleito das análises realizadas por Silva (2014).

Diferentemente das camadas anteriores, no conjunto subleito as maiores variações de ε_c ocorreram entre os modelos FWD2 e VB2, com uma diferença de $0,556 \times 10^{-4}$ e $0,363 \times 10^{-4}$ para $x=0$ cm e $x=32,4$ cm, respectivamente; para $x=16,2$ cm a maior variação ocorreu entre os modelos FWD1 e VB1 sendo $0,411 \times 10^{-4}$. Já as menores variações ocorreram entre os modelos FWD3 e VB3, sendo elas $0,036 \times 10^{-4}$ e $0,040 \times 10^{-4}$ para $x=0$ cm e $x=16,2$ cm, respectivamente; já para $x=32,4$ cm a menor variação foi entre FWD5 e VB5 com $0,043 \times 10^{-4}$.

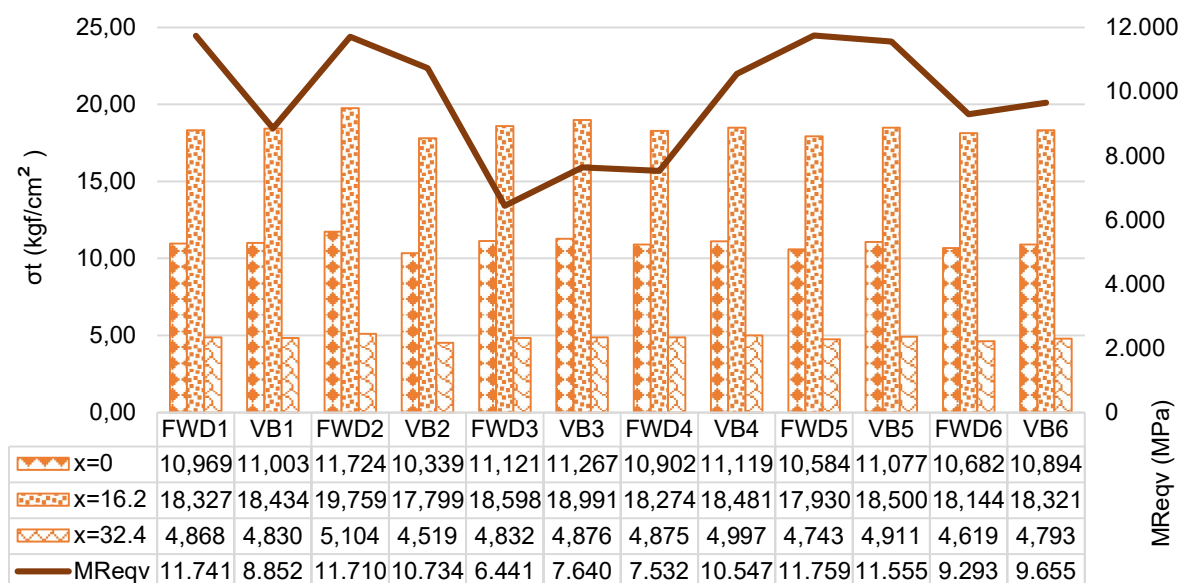
Figura 32 – Valores de ϵ_c obtidos na camada do conjunto subleito

Fonte: Autora (2022).

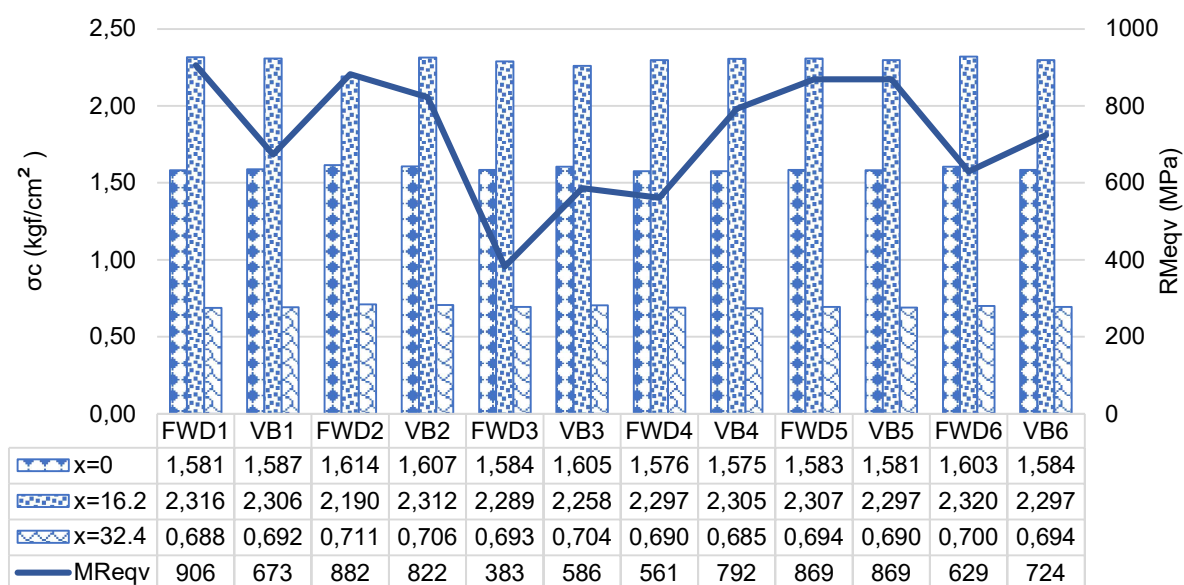
Graficamente também é possível observar que tanto as ϵ_t como as ϵ_c seguem o comportamento dos valores do MReqv, visto que nos modelos em que os valores de MReqv são maiores (FWD1, FWD2, VB2, FWD5 e VB5) as deformações são menores, a situação inversa também ocorre, como no caso dos modelos FWD3, VB3 e FWD4 que registraram maiores deformações e menores valores MReqv.

4.2.2 Tensões de tração e compressão

Analisando as σ_t e σ_c nas camadas de revestimento (Figura 33) e base (Figura 34), respectivamente, observou-se que elas possuem uma tendência de valor constante no mesmo trecho e ponto em todos os modelos, essa situação é condizente com a análise linear, a qual fundamenta-se na Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), visto que, como os módulos e as deformações variam de maneira inversa, a tensão tende a ser constante.

Figura 33 – Valores de σ_t obtidos na camada de revestimento

Fonte: Autora (2022).

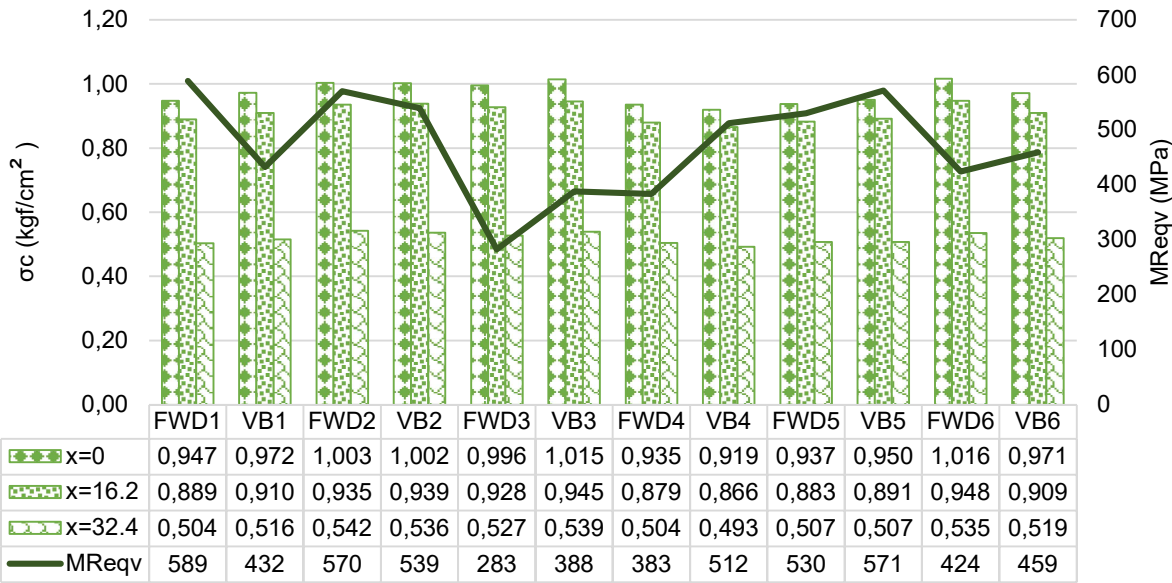
Figura 34 – Valores σ_c obtidos na camada de base

Fonte: Autora (2022).

A comparação de σ_t e σ_c das camadas de revestimento e base, respectivamente, apresentou valores bem similares entre os modelos FWD e VB, considerando todas as posições em x . Gráficamente, é possível constatar que uma maior variação ocorre entre os modelos FWD2 e VB2 em $x=16,2$ cm.

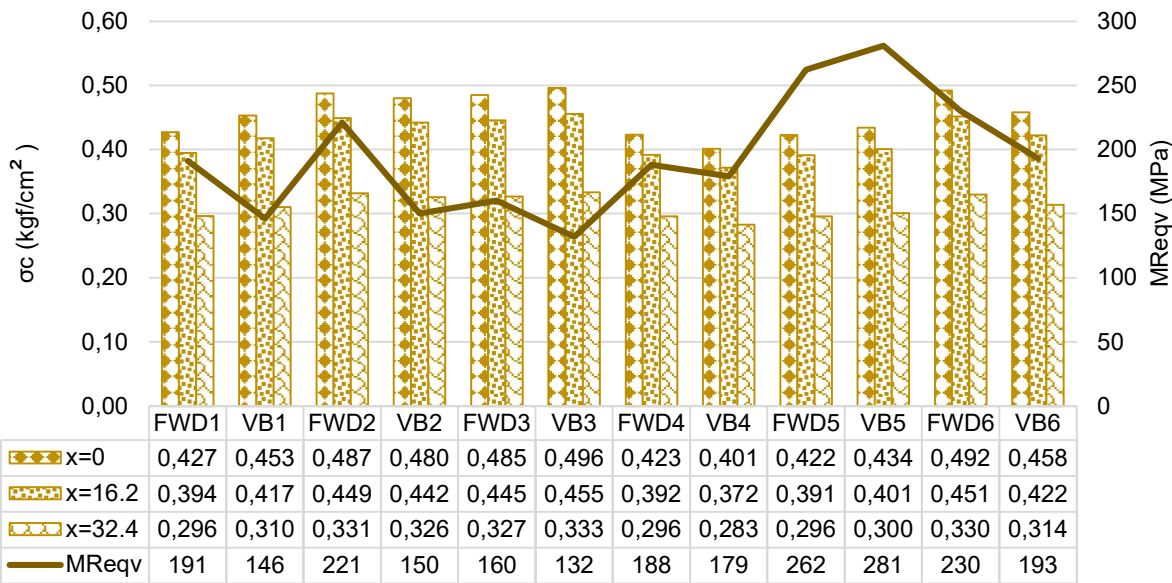
Com o aumento da profundidade, é possível observar nas camadas de sub-base (Figura 35) e principalmente na camada do conjunto subleito (Figura 36) que essa tendência de valores constantes em um mesmo ponto vai deixando de predominar; esta mudança no comportamento das tensões conforme o aumento da profundidade pode ser justificado devido ao espraramento das tensões.

Figura 35 – Valores de σ_c obtidos na camada de sub-base



Fonte: Autora (2022).

Figura 36 – Valores de σ_c obtidos na camada do conjunto subleito



Fonte: Autora (2022).

Quanto a comparação de σ_c das camadas de sub-base e conjunto subleito, observou-se valores bem similares, sendo que maiores variações são visíveis no conjunto subleito na comparação entre FWD1 e VB1 e FWD6 e VB6.

Na comparação das σ_c obtidas na camada do conjunto subleito (Figura 36), obteve-se uma média de variação de $\pm 4\%$ para os 6 trechos analisados, nos resultados encontrados a partir das deflexões aferidas com o FWD e com a viga Benkelman. Gomes (2012), considerando a mesma situação (configuração 30-40 x viga Benkelman), obteve uma diferença de 27,4% nas tensões de compressão no topo do subleito.

4.2.3 Variação percentual entre as deformações e as tensões

A Tabela 13 apresenta uma síntese dos valores de deflexões, MReqv, tensões e deformações obtidas pelo FWD e pela VB, bem como o percentual de variação entre esses valores, considerando o centro de aplicação de carga em cada um dos trechos analisados.

Tabela 13 – % de variação dos valores obtidos com os modelos FWD em relação aos modelos VB considerando o centro de aplicação de carga

(Continua)

Revestimento												
Trecho	D ₀ (0,01 mm)			MReqv (MPa)			σ_t (kgf/cm ²)			ε_t (x10 ⁻⁴)		
	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$
01	36,2	39,8	-9,0	11.741	8.852	32,6	10,97	10,90	0,6	1,06	1,40	-24,3
02	33,2	34,8	-4,6	11.710	10.734	9,1	11,00	11,12	-1,1	1,06	1,17	-9,4
03	59,7	43,2	38,2	6.441	7.640	-15,7	11,72	10,58	10,8	2,07	1,59	30,2
04	45,6	30,1	51,5	7.532	10.547	-28,6	10,34	11,08	-6,7	1,59	1,19	33,6
05	31,7	23,5	34,9	11.759	11.555	1,8	11,12	10,68	4,1	1,07	1,06	0,9
06	39,4	30,5	29,2	9.293	9.655	-3,7	11,27	10,89	3,5	1,38	1,28	7,8
Base												
Trecho	D ₀ (0,01 mm)			MReqv (MPa)			σ_c (kgf/cm ²)			ε_c (x10 ⁻⁴)		
	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$
01	36,2	39,8	-9,0	906	673	34,6	1,58	1,59	-0,6	1,42	1,89	-24,9
02	33,2	34,8	-4,6	882	822	7,3	1,61	1,61	0,0	1,46	1,55	-5,8
03	59,7	43,2	38,2	383	586	-34,6	1,58	1,61	-1,9	3,41	2,18	56,4
04	45,6	30,1	51,5	561	792	-29,2	1,58	1,57	0,6	2,32	1,62	43,2
05	31,7	23,5	34,9	869	869	0,0	1,58	1,58	0,0	1,48	1,50	-1,3
06	39,4	30,5	29,2	629	724	-13,1	1,60	1,58	1,3	2,07	1,77	16,9

Tabela 13 – % de variação dos valores obtidos com o FWD em relação aos valores obtidos com a viga Benkelman

(Conclusão)

Sub-base												
Trecho	D ₀ (0,01 mm)			MReqv (MPa)			σ _c (kgf/cm ²)			ε _c (x10 ⁻⁴)		
	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%
01	36,2	39,8	-9,0	589	432	36,3	0,95	0,97	-2,1	1,38	1,86	-25,8
02	33,2	34,8	-4,6	570	539	5,8	1,00	1,00	0,0	1,47	1,47	0,0
03	59,7	43,2	38,2	283	388	-27,1	1,00	1,01	-1,0	3,07	2,08	47,6
04	45,6	30,1	51,5	383	512	-25,2	0,93	0,92	1,1	2,26	1,59	42,1
05	31,7	23,5	34,9	530	571	-7,2	0,94	0,95	-1,1	1,61	1,53	5,2
06	39,4	30,5	29,2	424	459	-7,6	1,02	0,97	5,2	2,06	1,82	13,2
Conjunto subleito												
Trecho	D ₀ (0,01 mm)			MReqv (MPa)			σ _c (kgf/cm ²)			ε _c (x10 ⁻⁴)		
	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%	FWD	VB	Δ%
01	36,2	39,8	-9,0	191	146	30,8	0,43	0,45	-4,4	1,50	1,94	-22,7
02	33,2	34,8	-4,6	221	150	47,3	0,49	0,48	2,1	1,39	1,77	-21,5
03	59,7	43,2	38,2	160	132	21,2	0,48	0,50	-4,0	2,12	2,15	-1,4
04	45,6	30,1	51,5	188	179	5,0	0,42	0,40	5,0	1,76	1,63	8,0
05	31,7	23,5	34,9	262	281	-6,8	0,42	0,43	-2,3	1,27	1,20	5,8
06	39,4	30,5	29,2	230	193	19,2	0,49	0,46	6,5	1,49	1,62	-8,0

Fonte: Autora (2022).

Fazendo uma análise horizontal isolada de cada camada da Tabela 13, considerando os resultados de tensão e deformação no centro de aplicação de carga observou-se o seguinte:

- Na camada de revestimento a maior variação obtida nas σ_t , foi no trecho 03 (10,8%), e a menor foi no trecho 01 (0,6%); no caso das ε_t a maior variação ocorreu no trecho 04 (33,6%) e a menor no trecho 05 (0,9%).
- Na camada de base a maior variação obtida nas σ_c , foi no trecho 03 (-1,9%), e a menor foi de 0,0 % nos trechos 02 e 05; no caso das ε_c a maior variação ocorreu no trecho 03 (56,4%) e a menor no trecho 05 (-1,3%).
- Na camada de sub-base a maior variação obtida nas σ_c , foi no trecho 06 (5,2%), e a menor foi de 0,0 % no trecho 02; no caso das ε_c a maior variação ocorreu no trecho 03 (47,6%) e a menor no trecho 02 (0,0%).

- No conjunto subleito a maior variação obtida nas σ_c , foi no trecho 06 (6,5%), e a menor foi de 2,1 % no trecho 02; no caso das ε_c a maior variação ocorreu no trecho 01 (-22,7%) e a menor no trecho 05 (5,8%).

Analisando-se verticalmente a Tabela 13, com relação as tensões e deformações observou-se que:

- O trecho 02 apresentou a menor variação nas σ_c em todas as camadas granulares; as maiores variações foram apresentadas pelos trechos 03 (na base) e 06 (na sub-base e no conjunto subleito);
- Quanto as variações de ε_c os menores valores foram apresentados pelos: trecho 05 (base), trecho 02 (sub-base) e trecho 03 (conjunto subleito); já as maiores variações ocorreram no trecho 03 (camadas de base e sub-base) e trecho 01 (conjunto subleito).
- Com relação ao trecho 03 que apresentou maiores variações ε_c nas camadas de base e sub-base e menor variação no conjunto subleito, cabe a seguinte observação, as ε_c do modelo FWD vão decrescendo com o aumento da profundidade, já ε_c do modelo VB tem uma tendência mais constante, por este motivo, no conjunto subleito ocorre uma inversão no sinal da variação, e o trecho em questão apresenta menor variação numérica.

Não foi possível estabelecer um comportamento padrão nos modelos avaliados, visto que, um maior valor de D_0 aferido pelo FWD (ou pela viga Benkelman) não implica diretamente em maiores valores de tensões e deformações dos modelos FWD em relação aos modelos VB e vice-versa.

A mesma observação cabe aos valores de M_{Reqv} , ou seja, maiores valores obtidos com a retroanálise das deflexões aferidas pelo FWD (ou pela Viga Benkelman), não implicam diretamente em menores tensões e deformações dos modelos FWD em relação aos modelos VB e vice-versa.

Tais condições deixam evidente que a resposta do sistema depende de todas as camadas, portanto, a análise isolada de D_0 e ou do M_{Reqv} não é capaz de expressar o estado de tensões ao qual o pavimento é submetido.

4.3 ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES DAS CAMADAS GRANULARES OBTIDAS PELOS MODELOS ESTRUTURAIS NUMÉRICOS

4.3.1 No centro de aplicação da carga

Os valores de δ_P das camadas ficaram bem similares, tanto na comparação entre os modelos estruturais numéricos (análise vertical da tabela) quanto na comparação entre os diferentes trechos das rodovias (análise horizontal da tabela), considerando o centro de aplicação de carga e a combinação 1 de materiais (conforme Tabela 9).

A Tabela 14 apresenta os valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P dos modelos FWD e VB, para cada camada granular, considerando os pontos situados sobre o centro de aplicação da carga (0,0, z) e a combinação 1 de materiais.

Tabela 14 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro de aplicação de carga – combinação 1

(Continua)

Camada	Dados	Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,373	0,372	0,384	0,382	0,370	0,376
	σ_d (kgf/cm ²)	1,209	1,215	1,230	1,225	1,214	1,229
	ε^{esp}	0,648%	0,653%	0,651%	0,650%	0,654%	0,659%
	δ_P (mm)	1,167	1,175	1,172	1,169	1,178	1,186
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,167	0,172	0,169	0,172	0,176	0,176
	σ_d (kgf/cm ²)	0,780	0,801	0,834	0,830	0,819	0,838
	ε^{esp}	0,428%	0,435%	0,451%	0,448%	0,441%	0,449%
	δ_P (mm)	1,283	1,304	1,353	1,343	1,322	1,347
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,157	0,162	0,165	0,165	0,169	0,169
	σ_d (kgf/cm ²)	0,270	0,291	0,322	0,314	0,316	0,326
	ε^{esp}	0,026%	0,028%	0,032%	0,031%	0,032%	0,033%
	δ_P (mm)	0,128	0,141	0,162	0,157	0,158	0,165

Tabela 14 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro de aplicação de carga – combinação 1

(Conclusão)

Camada	Dados	Modelos VB					
		VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,376	0,374	0,380	0,373	0,374	0,374
	σ_d (kgf/cm ²)	1,200	1,201	1,203	1,207	1,229	1,210
	ε^{esp}	0,639%	0,642%	0,637%	0,647%	0,660%	0,647%
	δ_P (mm)	1,151	1,156	1,146	1,164	1,188	1,165
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,162	0,161	0,161	0,167	0,179	0,170
	σ_d (kgf/cm ²)	0,773	0,758	0,776	0,783	0,837	0,801
	ε^{esp}	0,427%	0,421%	0,429%	0,429%	0,448%	0,436%
	δ_P (mm)	1,280	1,262	1,288	1,288	1,343	1,307
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,154	0,151	0,154	0,158	0,170	0,162
	σ_d (kgf/cm ²)	0,269	0,279	0,269	0,276	0,322	0,296
	ε^{esp} (%)	0,025%	0,027%	0,025%	0,026%	0,032%	0,029%
	δ_P (mm)	0,127	0,134	0,127	0,132	0,161	0,144

Fonte: Autora (2022).

Na análise horizontal da Tabela 14, considerando os δ_P dos trechos em uma mesma camada constatou-se que:

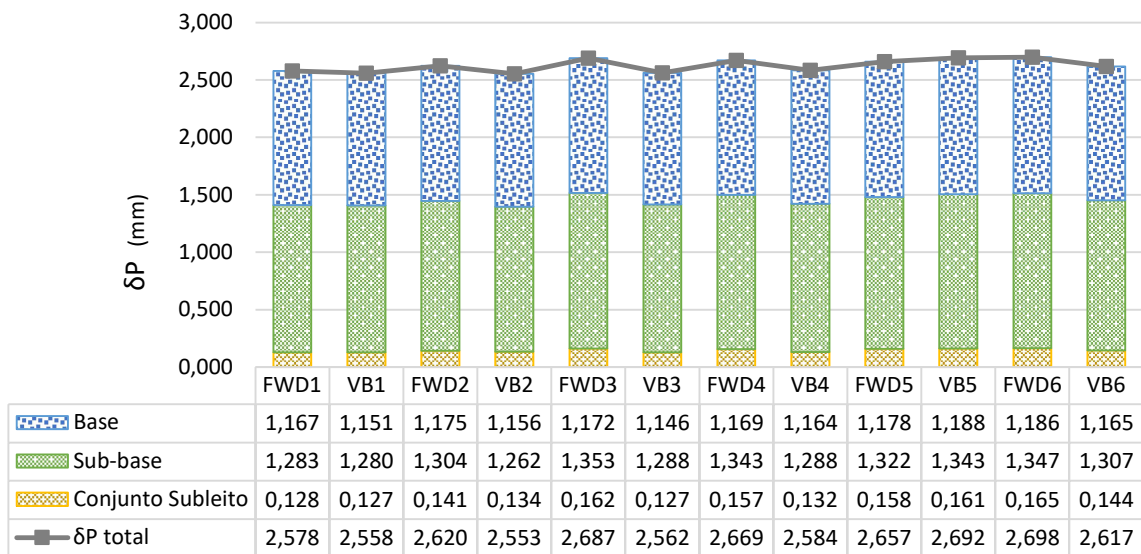
- As maiores variações entre δ_P , considerando os modelos FWD, foram de 0,019 mm, 0,070 mm, 0,037 mm para as camadas de base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente.
- Para os modelos VB, as maiores variações entre δ_P nas camadas de conjunto base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente, foram de 0,042 mm, 0,080 mm, 0,034 mm.
- Na camada de base os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (1,186 mm) e VB5 (1,188 mm); e os menores foram 1,167 mm (FWD1) e 1,146 mm (VB2).
- Na camada de sub-base os maiores δ_P foram nos modelos FWD3 (1,353 mm) e VB5 (1,343 mm); e os menores foram 1,283 mm (FWD1) e 1,262 mm (VB2).
- No conjunto subleito os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (0,165 mm) e VB5 (0,161 mm); e os menores foram 0,128 mm (FWD1) e 0,127 mm (VB1).

Na análise vertical da Tabela 14, considerando os δ_P das camadas e dos modelos em um mesmo trecho observou-se que:

- Com exceção do trecho 05, os δ_P obtidos pelos modelos FWD foram maiores do que os obtidas com os modelos VB.
- Tanto nos modelos FWD como nos modelos VB, a camada de sub-base foi a que apresentou maior δ_P , seguida pela camada de base e conjunto subleito.

A Figura 37 ilustra os valores de δ_P TOTAL do pavimento e δ_P das camadas granulares, considerando a combinação 1 e a posição do centro de aplicação da carga, com materiais menos deformáveis (combinação 1).

Figura 37 – Valores de δ_P TOTAL do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro de aplicação de carga – combinação 1



Fonte: Autora (2022).

Os modelos que apresentaram maiores δ_P TOTAL foram o FWD6 (2,698 mm) e o VB5 (2,692 mm) e, os que apresentaram menores δ_P TOTAL foram o FWD1 (2,578 mm) e o VB2 (2,553 mm). O valor médio de δ_P TOTAL foi de 2,623 mm e a variação entre o valor máximo e mínimo foi de 0,145 mm.

Considerando os p-valores obtidos: 0,06 para a base, 0,07 para a sub-base, 0,07 para o conjunto subleito e 0,06 para o δ_P total, constatou-se com a realização do teste t que os afundamentos obtidos pelos modelos FWD são estatisticamente iguais aquelas obtidos pelos modelos VB.

Na combinação 2 de materiais (conforme Tabela 10) os valores de δ_P das camadas apresentaram maiores diferenças tanto na comparação entre modelos (FWD x VB), quanto na comparação entre trechos, quando confrontados com a combinação 1 de materiais.

A Tabela 15 apresenta os valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P dos modelos FWD e VB, para cada camada granular, considerando os pontos situados sobre o centro de aplicação da carga (0,0, z) e a combinação 2 de materiais.

Tabela 15 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro de aplicação de carga – combinação 2

Camada	Dados	Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,373	0,372	0,384	0,382	0,370	0,376
	σ_d (kgf/cm ²)	1,209	1,215	1,230	1,225	1,214	1,229
	ε^{esp}	0,752%	0,757%	0,757%	0,755%	0,758%	0,763%
	δ_P (mm)	1,354	1,362	1,363	1,360	1,364	1,374
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,167	0,172	0,169	0,172	0,176	0,176
	σ_d (kgf/cm ²)	0,780	0,801	0,834	0,830	0,819	0,838
	ε^{esp}	0,673%	0,694%	0,733%	0,727%	0,712%	0,734%
	δ_P (mm)	2,018	2,082	2,200	2,182	2,137	2,203
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,157	0,162	0,165	0,165	0,169	0,169
	σ_d (kgf/cm ²)	0,270	0,291	0,322	0,314	0,316	0,326
	ε^{esp}	0,117%	0,126%	0,135%	0,133%	0,136%	0,139%
	δ_P (mm)	0,587	0,629	0,675	0,667	0,680	0,695
Camada	Dados	Modelos VB					
		VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,376	0,374	0,380	0,373	0,374	0,374
	σ_d (kgf/cm ²)	1,200	1,201	1,203	1,207	1,229	1,210
	ε^{esp}	0,744%	0,747%	0,742%	0,751%	0,764%	0,752%
	δ_P (mm)	1,339	1,344	1,336	1,352	1,376	1,353
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,162	0,161	0,161	0,167	0,179	0,170
	σ_d (kgf/cm ²)	0,773	0,758	0,776	0,783	0,837	0,801
	ε^{esp}	0,667%	0,651%	0,672%	0,676%	0,732%	0,695%
	δ_P (mm)	2,001	1,953	2,016	2,029	2,196	2,086
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,154	0,151	0,154	0,158	0,170	0,162
	σ_d (kgf/cm ²)	0,269	0,279	0,269	0,276	0,322	0,296
	ε^{esp} (%)	0,116%	0,116%	0,115%	0,119%	0,138%	0,127%
	δ_P (mm)	0,578	0,578	0,576	0,597	0,691	0,635

Fonte: Autora (2022).

Na análise horizontal da Tabela 15, considerando os δ_P dos trechos em uma mesma camada observou-se que:

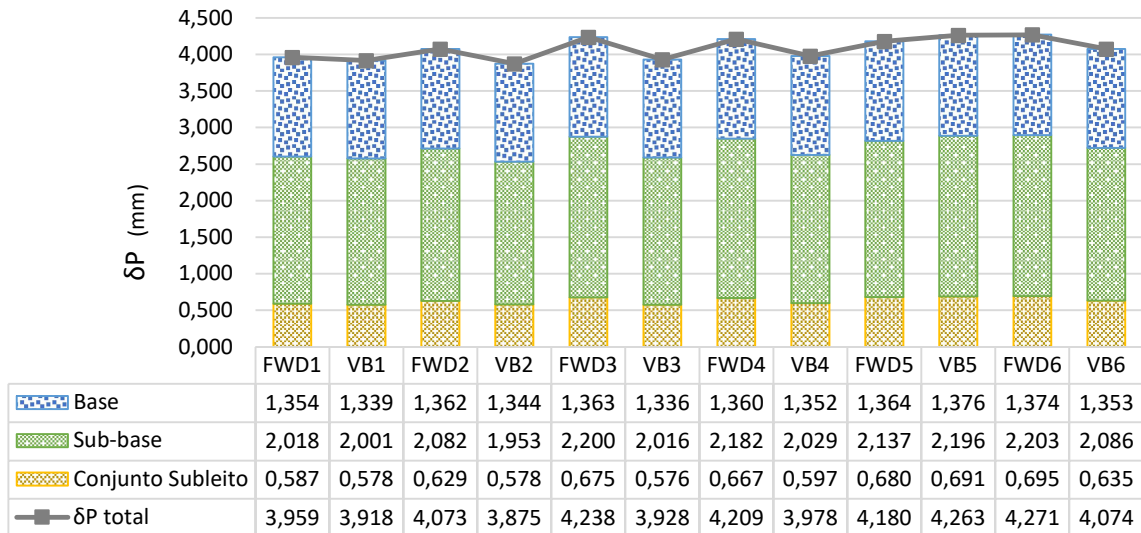
- As maiores variações entre δ_P , considerando os modelos FWD, foram de 0,019 mm, 0,185 mm, 0,108 mm para as camadas de base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente.
- Para os modelos VB, as maiores variações entre δ_P nas camadas de conjunto base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente, foram de 0,040 mm, 0,243 mm, 0,115 mm.
- Na camada de base os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (1,374 mm) e VB5 (1,376 mm); e os menores foram 1,354 mm (FWD1) e 1,336 mm (VB3).
- Na camada de sub-base os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (2,203 mm) e VB5 (2,196 mm); e os menores foram 2,018 mm (FWD1) e 1,953 mm (VB2).
- No conjunto subleito os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (0,695 mm) e VB5 (0,691 mm); e os menores foram 0,587 mm (FWD1) e 0,576 mm (VB3).

Na análise vertical da Tabela 15, considerando os δ_P das camadas e dos modelos em um mesmo trecho observou-se que:

- Com exceção do trecho 05, os δ_P obtidos pelos modelos FWD foram maiores do que os obtidos com os modelos VB.
- Tanto nos modelos FWD como nos modelos VB, a camada de sub-base foi a que apresentou maior δ_P , seguida pela camada de base e conjunto subleito.

A Figura 38 ilustra os valores de $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares, considerando a combinação 2 e a posição do centro de aplicação da carga, com materiais mais deformáveis (combinação 2).

Figura 38 – Valores de δ_P TOTAL do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro de aplicação de carga – combinação 2



Fonte: Autora (2022).

Os modelos que apresentaram maiores δ_P TOTAL foram o FWD6 (4,271 mm) e o VB5 (4,263 mm), os que apresentaram menores δ_P TOTAL foram o FWD1 (3,959 mm) e o VB2 (3,875 mm). O valor médio de δ_P TOTAL foi de 4,081 mm e a variação entre o valor máximo e mínimo foi de 0,396 mm.

Considerando os p-valores obtidos: 0,07 para a base, 0,06 para a sub-base, 0,04 para o conjunto subleito e 0,05 para o δ_P total, constatou-se com a realização do teste t que os afundamentos obtidos pelos modelos FWD são estatisticamente iguais aqueles obtidos pelos modelos VB; exceto no conjunto subleito, para o qual o resultado estatístico é a hipótese H_1 , ou seja, os valores não são iguais.

4.3.2 No centro da roda

Para esta posição os valores de δ_P das camadas também ficaram bem similares, tanto na comparação entre os modelos estruturais numéricos (análise vertical da tabela) quanto na comparação entre os diferentes trechos das rodovias (análise horizontal da tabela).

A Tabela 16 apresenta os valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P dos modelos FWD e VB, para cada camada granular, considerando os pontos situados sobre o centro da roda (16.2,0, z) e a combinação 1 de materiais.

Tabela 16 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro da roda – combinação 1

Camada	Dados	Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,311	0,311	0,321	0,318	0,309	0,314
	σ_d (kgf/cm ²)	2,005	1,995	1,870	1,994	1,979	1,944
	ε^{esp}	1,355%	1,347%	1,220%	1,328%	1,338%	1,296%
	δ_P (mm)	2,439	2,425	2,195	2,390	2,409	2,333
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,150	0,154	0,154	0,155	0,158	0,159
	σ_d (kgf/cm ²)	0,739	0,756	0,781	0,784	0,770	0,786
	ε^{esp}	0,418%	0,424%	0,436%	0,436%	0,428%	0,435%
	δ_P (mm)	1,255	1,273	1,307	1,308	1,284	1,306
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,151	0,156	0,159	0,159	0,162	0,163
	σ_d (kgf/cm ²)	0,243	0,261	0,290	0,283	0,283	0,293
	ε^{esp}	0,022%	0,024%	0,028%	0,027%	0,027%	0,028%
	δ_P (mm)	0,111	0,122	0,141	0,136	0,136	0,142
Camada	Dados	Modelos VB					
		VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,314	0,312	0,317	0,312	0,312	0,312
	σ_d (kgf/cm ²)	1,983	1,993	1,990	1,985	2,008	1,984
	ε^{esp}	1,330%	1,343%	1,327%	1,337%	1,354%	1,334%
	δ_P (mm)	2,393	2,417	2,389	2,406	2,437	2,401
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,147	0,145	0,146	0,150	0,160	0,153
	σ_d (kgf/cm ²)	0,733	0,721	0,737	0,741	0,788	0,756
	ε^{esp}	0,417%	0,412%	0,420%	0,419%	0,436%	0,425%
	δ_P (mm)	1,251	1,237	1,260	1,258	1,307	1,274
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,149	0,146	0,148	0,152	0,163	0,156
	σ_d (kgf/cm ²)	0,242	0,226	0,243	0,249	0,288	0,266
	ε^{esp} (%)	0,022%	0,020%	0,022%	0,023%	0,028%	0,025%
	δ_P (mm)	0,111	0,101	0,111	0,115	0,139	0,125

Fonte: Autora (2022).

Na análise horizontal da Tabela 16, considerando os δ_P dos trechos em uma mesma camada observou-se que:

- As maiores variações entre δ_P , considerando os modelos FWD, foram de 0,244 mm, 0,053 mm, 0,031 mm para as camadas de base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente.

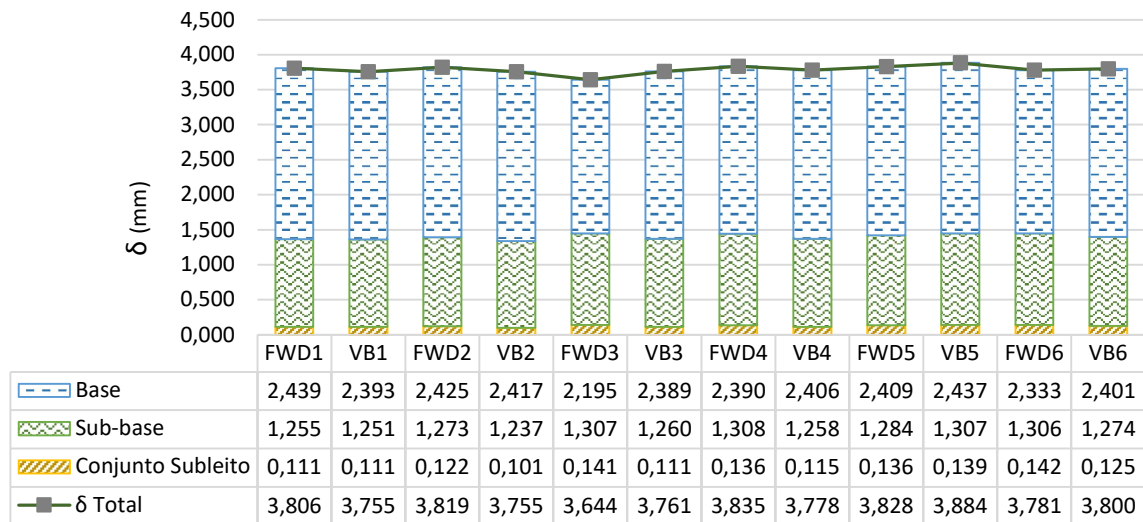
- Para os modelos VB, as maiores variações entre δ_P nas camadas de conjunto base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente, foram de 0,048 mm, 0,070 mm, 0,038 mm.
- Na camada de base os maiores δ_P foram nos modelos FWD1 (2,439 mm) e VB5 (2,437 mm); e os menores foram 2,195 mm (FWD3) e 2,389 mm (VB3).
- Na camada de sub-base os maiores δ_P foram nos modelos FWD4 (1,308 mm) e VB5 (1,307 mm); e os menores foram 1,255 mm (FWD1) e 1,237 mm (VB2).
- No conjunto subleito os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (0,142 mm) e VB5 (0,139 mm); e os menores foram 0,111 mm (FWD1) e 0,101 mm (VB2).

Na análise vertical da Tabela 16, considerando os δ_P das camadas e dos modelos em um mesmo trecho observou-se que:

- No trecho 5 todas os δ_P obtidos pelos modelos VB foram maiores que os obtidos com os modelos FWD; nos trechos 3, 4 e 6 os afundamentos obtidos nas camadas de base com modelo VB foram superiores aos obtidos com o FWD; nos demais casos os modelos FWD apresentaram afundamentos superiores aos modelos VB.
- Tanto nos modelos FWD como nos modelos VB, a camada de base foi a que apresentou maior δ_P , seguida pela camada de sub-base e conjunto subleito.

A Figura 39 ilustra os valores de $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares, considerando os pontos situados sob o centro da roda e os materiais menos deformáveis (combinação 1).

Figura 39 – Valores de $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro da roda – combinação 1



Fonte: Autora (2022).

Os modelos que apresentaram maiores $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foram o FWD4 (3,835 mm) e o VB5 (3,884 mm) e, os que apresentaram menores $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foram o FWD3 (3,644 mm) e o VB2 (3,755 mm). O valor médio de $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foi de 3,787 mm e a variação entre o valor máximo e mínimo foi de 0,240 mm.

Considerando os p-valores obtidos: 0,27 para a base, 0,09 para a sub-base, 0,04 para o conjunto subleito e 0,39 para o $\delta_{P\text{ TOTAL}}$, constatou-se com a realização do teste t que os afundamentos obtidos pelos modelos FWD são estatisticamente iguais aqueles obtidos pelos modelos VB; exceto no conjunto subleito, para o qual o resultado estatístico é a hipótese H_1 , ou seja, os valores não são iguais.

A Tabela 17 apresenta os valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P dos modelos FWD e VB, para cada camada granular, considerando os pontos situados sobre o centro da roda (16.2,0, z) e a combinação 2 de materiais.

Tabela 17 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro da roda – combinação 2

(Continua)

Camada	Dados	Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,311	0,311	0,321	0,318	0,309	0,314
	σ_d (kgf/cm ²)	2,005	1,995	1,870	1,994	1,979	1,944
	ε^{esp}	1,378%	1,371%	1,265%	1,358%	1,363%	1,329%
	δ_P (mm)	2,481	2,469	2,277	2,444	2,453	2,392

Tabela 17 – Valores de σ_d , σ_3 , ε^{esp} e δ_P para os modelos FWD e VB no centro da roda – combinação 2

(Conclusão)

Camada	Dados	Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,150	0,154	0,154	0,155	0,158	0,159
	σ_d (kgf/cm ²)	0,739	0,756	0,781	0,784	0,770	0,786
	ε^{esp}	0,636%	0,653%	0,682%	0,684%	0,666%	0,685%
	δ_P (mm)	1,909	1,960	2,047	2,052	1,998	2,056
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,151	0,156	0,159	0,159	0,162	0,163
	σ_d (kgf/cm ²)	0,243	0,261	0,290	0,283	0,283	0,293
	ε^{esp}	0,108%	0,115%	0,123%	0,122%	0,124%	0,127%
	δ_P (mm)	0,538	0,575	0,617	0,610	0,619	0,633
Camada	Dados	Modelos VB					
		VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6
Base (z = 14) h=18cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,314	0,312	0,317	0,312	0,312	0,312
	σ_d (kgf/cm ²)	1,983	1,993	1,990	1,985	2,008	1,984
	ε^{esp}	1,358%	1,368%	1,357%	1,363%	1,378%	1,361%
	δ_P (mm)	2,444	2,462	2,443	2,453	2,481	2,449
Sub-base (z = 38) h=30cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,147	0,145	0,146	0,150	0,160	0,153
	σ_d (kgf/cm ²)	0,733	0,721	0,737	0,741	0,788	0,756
	ε^{esp}	0,631%	0,618%	0,637%	0,639%	0,687%	0,654%
	δ_P (mm)	1,892	1,854	1,911	1,916	2,060	1,961
Conjunto Subleito (z = 78) h=50cm	σ_3 (kgf/cm ²)	0,149	0,146	0,148	0,152	0,163	0,156
	σ_d (kgf/cm ²)	0,242	0,226	0,243	0,249	0,288	0,266
	ε^{esp} (%)	0,106%	0,100%	0,106%	0,109%	0,126%	0,116%
	δ_P (mm)	0,531	0,501	0,529	0,547	0,629	0,581

Fonte: Autora (2022).

Na análise horizontal da Tabela 17, considerando os δ_P dos trechos em uma mesma camada observou-se que:

- As maiores variações entre δ_P , considerando os modelos FWD, foram de 0,204 mm, 0,146 mm, 0,095 mm para as camadas de base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente.
- Para os modelos VB, as maiores variações entre δ_P nas camadas de conjunto base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente, foram de 0,038 mm, 0,206 mm, 0,128 mm.
- Na camada de base os maiores δ_P foram nos modelos FWD1 (2,481 mm) e VB5 (2,481 mm); e os menores foram 2,277 mm (FWD3) e 2,443 mm (VB3).

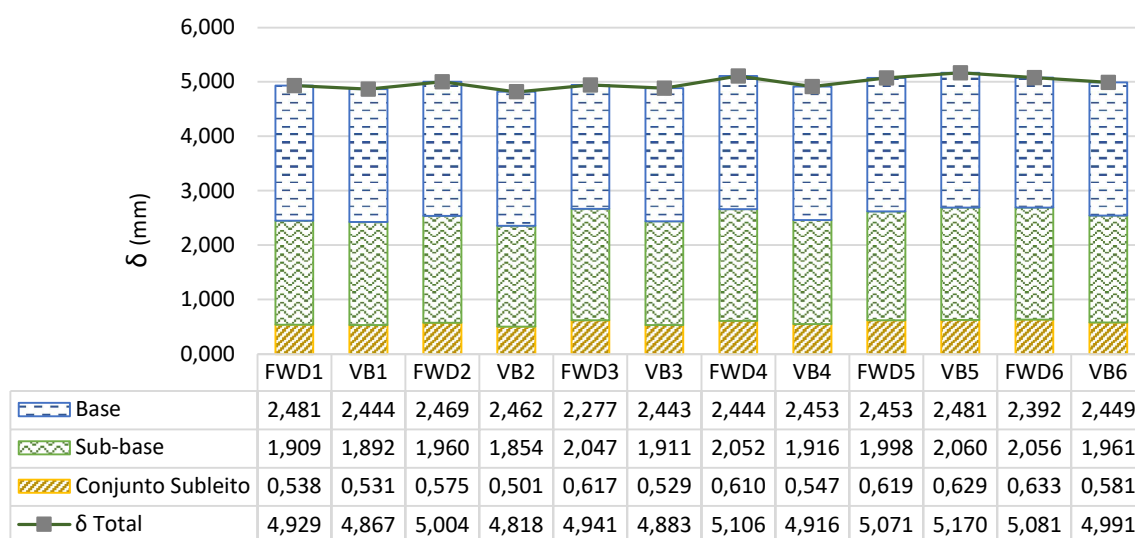
- Na camada de sub-base os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (2,056 mm) e VB5 (2,060 mm); e os menores foram 1,909 mm (FWD1) e 1,854 mm (VB2).
- No conjunto subleito os maiores δ_P foram nos modelos FWD6 (0,633 mm) e VB5 (0,629 mm); e os menores foram 0,538 mm (FWD1) e 0,501 mm (VB2).

Na análise vertical da Tabela 17, considerando os δ_P das camadas e dos modelos em um mesmo trecho observou-se que:

- No trecho 5 todas os δ_P obtidos pelos modelos VB foram maiores que os obtidos com os modelos FWD; nos trechos 3, 4 e 6 os afundamentos obtidos nas camadas de base com modelo VB foram superiores aos obtidos com o FWD; nos demais casos os modelos FWD apresentaram afundamentos superiores aos modelos VB.
- Tanto nos modelos FWD como nos modelos VB, a camada de base foi a que apresentou maior δ_P , seguida pela camada de sub-base e conjunto subleito.

A Figura 40 ilustra os valores de δ_P TOTAL do pavimento e δ_P das camadas granulares, considerando os pontos situados sob o centro da roda e os materiais mais deformáveis (combinação 2).

Figura 40 – Valores de δ_P TOTAL do pavimento e δ_P das camadas granulares no centro da roda - combinação 2



Fonte: Autora (2022).

Os modelos que apresentaram maiores $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foram o FWD4 (5,106 mm) e o VB5 (5,170 mm) e, os que apresentaram menores $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foram o FWD1 (4,929 mm) e o VB2 (4,818 mm). O valor médio de $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ foi de 4,981 mm e a variação entre o valor máximo e mínimo foi de 0,352 mm.

Considerando os p-valores obtidos: 0,27 para a base, 0,08 para a sub-base, 0,03 para o conjunto subleito e 0,12 para o $\delta_{P\text{ TOTAL}}$, constatou-se com a realização do teste t que os afundamentos obtidos pelos modelos FWD são estatisticamente iguais aqueles obtidos pelos modelos VB; exceto no conjunto subleito, para o qual o resultado estatístico é a hipótese H_1 , ou seja, os valores não são iguais.

4.3.3 Síntese dos resultados de afundamento permanente

Apesar de os afundamentos apresentarem maiores ou menores variações, conforme alteravam-se as combinações de materiais e posição dos pontos analisados, constatou-se que os valores de δ_P das camadas ficaram bem similares.

Também se observou que a variação entre os afundamentos obtidos com a combinação 2 foram maiores, isso pode ter sido em decorrência dos parâmetros de deformabilidade dos materiais, como são mais deformáveis apresentam maior suscetibilidade a variação das tensões.

A aplicação do teste t indicou que os valores de $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ obtidos pelos modelos FWD e VB são estatisticamente iguais; a mesma condição se aplica na análise isolada das camadas do pavimento, exceto para o conjunto subleito camada na qual o teste t rejeitou H_0 indicando que os valores δ_P obtidos foram estatisticamente diferentes nas análises realizadas nos pontos sob o centro de aplicação de carga e combinação 2 de materiais, e nas observações dos pontos sob o centro da roda nas combinações 1 e 2 de materiais.

Os modelos FWD indicaram que sob o centro de aplicação de carga o trecho 06 apresentará maior $\delta_{P\text{ TOTAL}}$ ao fim de sua vida útil, e sob o centro da roda o trecho 04 é o que terá maior $\delta_{P\text{ TOTAL}}$; os modelos VB já indicaram que o trecho mais degradado será o 05 nas duas posições analisadas. Observou-se aqui que um equipamento aponta para trechos 04 e 06 que ainda estão em consolidação enquanto o outro indica o segmento 05 já consolidado.

Com exceção do trecho 05, os $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ dos modelos FWD foram maiores do que os obtidos com os modelos VB, indicando que os valores de δ_P não são proporcionais ao comportamento aos valores de D_0 aferidas em campo. Conforme Nery (2020) o segmento 05 apresentou os menores valores de D_0 de todos os trechos analisados e as leituras do FWD foram superiores as da viga Benkelman; salienta-se aqui também que a análise do $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ não indicou em nenhuma das configurações apresentadas (itens 4.3.1 e 4.3.2) o trecho 05 como o que apresentou o menor valor.

Os valores mínimos de máximos de $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ foram 2,553 mm e 5,170mm, correspondendo, respectivamente, aos modelos VB2 considerando os pontos sob o centro de aplicação da carga e combinação 1 e VB 5 considerando os pontos sob o centro da roda e a combinação 2 de materiais, e a média geral de afundamento foi de 3,868 mm.

Franco e Motta (2020), comentam que o limite tolerável de afundamento de trilha de roda – ATR é da ordem de 13 a 20 mm para uma via coletora, sendo que os δ_P calculadas no subleito não devem ser superiores a 5 mm.

Considerando o disposto acima pode-se afirmar que, caso o pavimento estudado fosse composto pelos materiais granulares com deformabilidade similar aos adotados nos cálculos deste trabalho, o pavimento estaria bem dimensionado em termos de ATR, não sendo este o motivo de ruptura da estrutura do pavimento ao fim de sua vida útil.

Entretanto, é importante esclarecer que os materiais utilizados na rodovia não foram ensaiados, e seus parâmetros ainda são desconhecidos. Porém, como foram considerados solos finos e granulares menos deformáveis (combinação 1) e mais deformáveis (combinação 2) no cálculo do ATR, é bem possível que o $\delta_{P \text{ TOTAL}}$ do pavimento situe-se na faixa de valores citada anteriormente, ao fim de sua vida útil. Outro fator que embasa esta ideia, é que durante a realização dos ensaios em campo, não foram observados defeitos na superfície do revestimento do pavimento, inclusive nos trechos que já possuíam 5 anos de idade.

4.4 ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DO PERCENTUAL DE ÁREA TRINCADA

Conforme método proposto por Fritzen adaptado para o MeDiNa para prever a área trincada do pavimento ao fim de sua vida útil (apresentado no item 2.6.6), a

Tabela 18 apresenta os valores de dano médio ($D_{\text{médio}}$), fator de deslocamento (fS), número N ajustado (N') e percentual de área trincada (%AT) para cada um dos modelos estruturais numéricos FWD, e para cada uma das 4 classes de fadiga (apresentadas no item 3.7.2.).

Tabela 18 – Valores de $D_{\text{médio}}$, fS, N' e %AT para os modelos FWD

Dados		Modelos FWD					
		FWD1	FWD2	FWD3	FWD4	FWD5	FWD6
Classe 1	$D_{\text{médio}}$	0,00202	0,00207	0,01830	0,00779	0,00211	0,00484
	fS	196,184	198,068	446,996	324,954	199,267	271,989
	N'	0,141	0,143	0,322	0,234	0,144	0,196
	%AT	10,09	10,25	39,44	23,76	10,35	17,50
Classe 2	$D_{\text{médio}}$	0,00134	0,00138	0,01975	0,00697	0,00141	0,00389
	fS	168,088	170,072	459,922	311,670	171,329	250,621
	N'	0,121	0,123	0,332	0,225	0,124	0,181
	%AT	7,91	8,06	41,06	22,13	8,15	15,20
Classe 3	$D_{\text{médio}}$	0,00119	0,00123	0,01513	0,00567	0,00125	0,00327
	fS	161,225	163,017	416,405	288,493	164,153	234,939
	N'	0,116	0,118	0,300	0,208	0,118	0,169
	%AT	7,43	7,55	35,52	19,38	7,63	13,62
Classe 4	$D_{\text{médio}}$	0,00136	0,00138	0,00493	0,00299	0,00139	0,00227
	fS	169,205	170,136	273,872	227,131	170,734	204,786
	N'	0,122	0,123	0,197	0,164	0,123	0,148
	%AT	7,99	8,06	17,71	12,86	8,10	10,82

Fonte: Autora (2022).

Com base nos dados apresentados pelos modelos FWD, observou-se que o trecho 03 foi o que apresentou maiores valores de %AT, variando de 17,71% até 41,06% (classes 4 e 2 respectivamente). O trecho 01 foi o que apresentou menores %AT, variando de 7,43% (classe 3) até 10,09% (classe 1).

Os trechos em consolidação (03, 04 e 06) apresentaram maiores %AT quando comparados com os trechos 01, 02 e 05 que já encontram-se consolidados, essa análise condiz com os a constatação realizada por Nery (2020) nos valores de D_0 . Ressalta-se também que as estimativas do %AT dos trechos consolidados ficaram similares quando comparados dentro de uma mesma classe de mistura asfáltica.

Na Tabela 19 são apresentados os valores de $D_{\text{médio}}$, fS, N' e %AT para cada um dos modelos estruturais numéricos VB, e para cada uma das 4 classes de fadiga.

Tabela 19 – Valores de $D_{\text{médio}}$, fS , N' e $\%AT$ para os modelos VB

Dados		Modelos FWD					
		VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	VB6
Classe 1	$D_{\text{médio}}$	0,00505	0,00279	0,00768	0,00296	0,00204	0,00382
	fS	276,387	221,376	323,222	226,274	197,077	249,017
	N'	0,199	0,160	0,233	0,163	0,142	0,180
	$\%AT$	18,00	12,32	23,55	12,78	10,16	15,04
Classe 2	$D_{\text{médio}}$	0,00410	0,00198	0,00684	0,00213	0,00136	0,00292
	fS	255,575	194,809	309,535	200,114	169,084	225,009
	N'	0,184	0,140	0,223	0,144	0,122	0,162
	$\%AT$	15,72	9,98	21,87	10,42	7,98	12,66
Classe 3	$D_{\text{médio}}$	0,00344	0,00173	0,00557	0,00185	0,00121	0,00249
	fS	239,315	185,288	286,657	190,035	162,110	212,233
	N'	0,173	0,134	0,207	0,137	0,117	0,153
	$\%AT$	14,05	9,21	19,17	9,59	7,49	11,48
Classe 4	$D_{\text{médio}}$	0,00232	0,00164	0,00297	0,00170	0,00137	0,00197
	fS	206,753	181,629	226,525	183,935	169,573	194,489
	N'	0,149	0,131	0,163	0,133	0,122	0,140
	$\%AT$	10,99	8,92	12,80	9,10	8,02	9,95

Fonte: Autora (2022).

Conforme os dados apresentados pelos modelos VB, observou-se que o trecho 03 também foi o que apresentou maiores valores de $\%AT$, variando de 12,80% até 23,55% (classes 4 e 1 respectivamente). O trecho 05 foi o que apresentou menores $\%AT$, variando de 7,49% (classe 3) até 10,16% (classe 1).

Diferentemente dos $\%AT$ obtidos com os modelos FWD, os modelos VB não apresentaram maiores valores para os trechos em consolidação, inclusive o segundo trecho com maior $\%AT$ é o 02 (10,99% - classe 04 a 18,00% - classe 01), que já encontra-se consolidado conforme estudos de Nery (2021).

A variação obtida entre os modelos FWD e VB está apresentada na Tabela 20, constatou-se que a maior diferença, para todas as classes de mistura asfáltica, ocorreu na comparação entre FWD1 x VB1, trecho este que já está consolidado. Sendo que nas classes 2 e 3 o $\%AT$ obtido pelo FWD foi praticamente metade do obtido pela VB, -99% e -89%, respectivamente; a classe 1 também apresentou uma variação alta (-78%), já a classe 4 apresentou uma variação inferior às demais (-38%).

As menores diferenças ocorreram na comparação entre FWD5 x VB5, que também encontra-se consolidado, para todas as classes, neste trecho o FWD

apresentou %AT um pouco superiores à VB, sendo os valores bem similares com variações entre 1% e 2%.

Tabela 20 – Variação entre os %AT obtidos pelos modelos FWD em relação aos modelos VB considerando as 4 classes de misturas asfálticas

Classe da Mistura	Trecho 01			Trecho 02			Trecho 03		
	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$
1	10,09	18,00	-78%	10,25	12,32	-20%	39,44	23,55	40%
2	7,91	15,72	-99%	8,06	9,98	-24%	41,06	21,87	47%
3	7,43	14,05	-89%	7,55	9,21	-22%	35,52	19,17	46%
4	7,99	10,99	-38%	8,06	8,92	-11%	17,71	12,80	28%
Classe da Mistura	Trecho 04			Trecho 05			Trecho 06		
	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$	FWD	VB	$\Delta\%$
1	23,76	12,78	46%	10,35	10,16	2%	17,50	15,04	14%
2	22,13	10,42	53%	8,15	7,98	2%	15,20	12,66	17%
3	19,38	9,59	51%	7,63	7,49	2%	13,62	11,48	16%
4	12,86	9,10	29%	8,10	8,02	1%	10,82	9,95	8%

Fonte: Autora (2022).

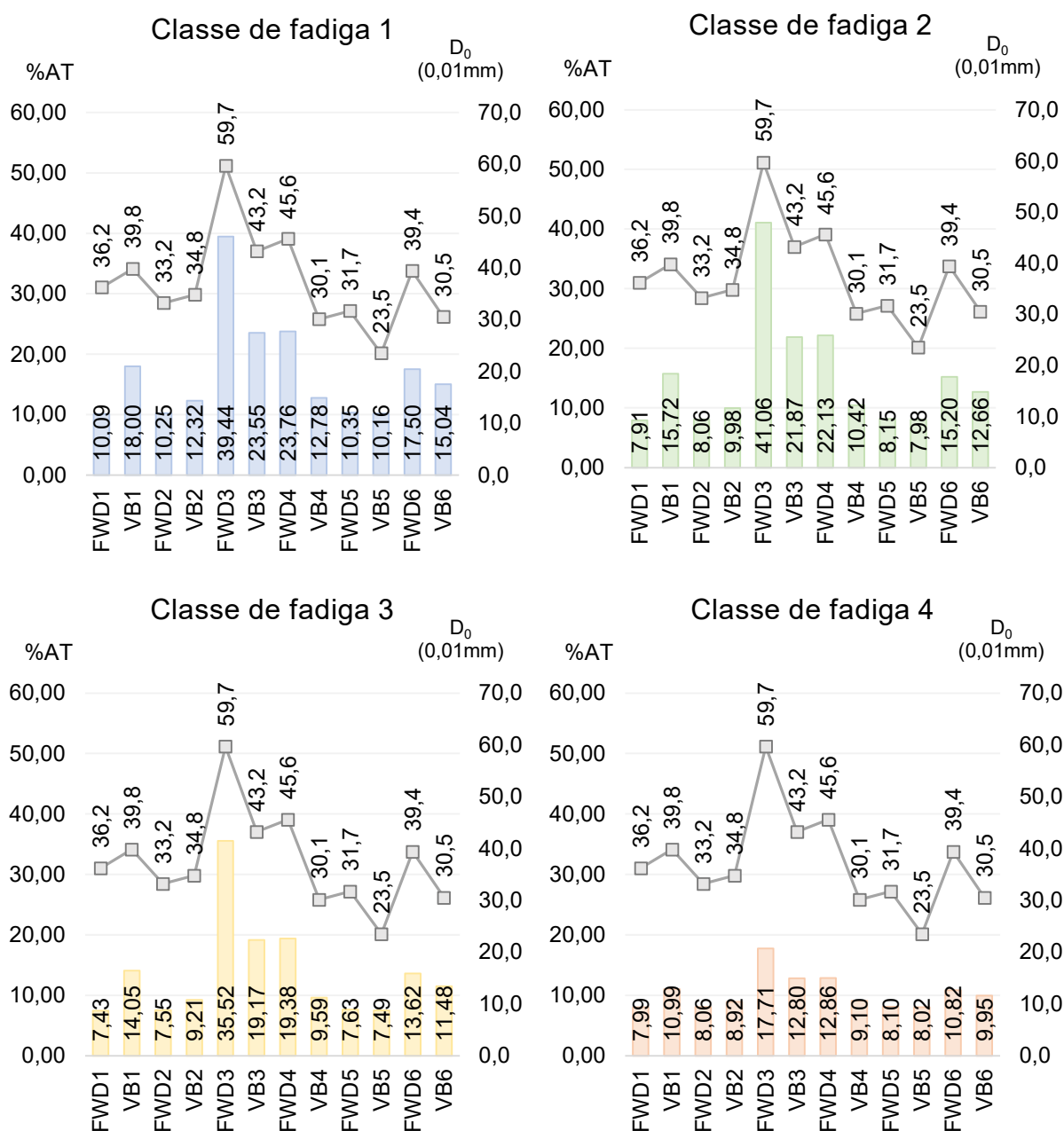
Com a análise dos percentuais de variação da comparação entre os modelos observou-se também, que as análises FWD3 x VB3 e FWD4 x VB4 também apresentaram maiores variações. Esta situação evidencia a suscetibilidade do %AT em relação ao MReqv das camadas, visto que, conforme dados apresentados na Tabela 13, os seguimentos 01, 03 e 04 foram os que apresentaram maior variação entre os MReqv.

As comparações FWD2 x VB2 e FWD6 x VB6, apresentaram variações máximas de -24% e 17%, respectivamente, para a mistura classe 2 e, variações mínimas de -11% e 8% para a mistura classe 4.

A Figura 41 ilustra a comparação do %AT entre os modelos FWD e VB para as 4 classes de fadiga consideradas.

Com base nesta figura, constatou-se que o %AT (gráfico de barras) também é bem suscetível aos valores de D0 (gráfico de linhas) aferidos em campo, comparando os gráficos fica evidente que o %AT segue a variação dos valores de D0.

Figura 41 – Valores de %AT para os modelos FWD e VB



Fonte: Autora (2022).

Nos trechos 01 e 02 os %AT obtidos pelos modelos FWD foram inferiores aos dos modelos VB, nos demais trechos a situação foi inversa. A mesma situação foi apontada por Nery e Santos (2021) na análise das deflexões (D_0).

Os trechos 02 e 05 foram os que apresentaram maior proximidade entre os %AT obtidos pelos modelos FWD e VB; já o trecho 03 foi o que apresentou maior diferença de valores entre estes modelos.

As classes apresentam, em teoria, uma ordem crescente de resistência a fadiga da mistura asfáltica. Considerando os resultados desta pesquisa constatou-se que o %AT não seguiu essa ordem crescente nos modelos FWD1, FWD2, FWD3, FWD5.

Os trechos apresentaram maior proximidade nos %AT nos cálculos que utilizaram os parâmetros da classe 4 de fadiga, foi nesta classe também que a maior parte dos modelos apresentou o menor %AT.

O maior %AT foi obtido pelo modelo FWD3 (41,06%), considerando a classe 2 de fadiga, e o menor valor foi obtido pelo modelo FWD1 (7,43%), considerando a classe 3 de fadiga.

Um dos critérios de ruptura por fadiga, considera que quando o pavimento romperá quando o %AT ultrapassar 30% (FRANCO; MOTA, 2020). Com base neste critério, considerando as classes de fadiga 1,2 e 3, e os modelos FWD, o trecho 03 sofrerá ruptura por fadiga do revestimento, antes do fim de sua vida útil, por volta do 12º ou 13º ano da estrutura.

Com relação aos %AT calculados, é importante ressaltar que o trecho 03, o qual apresentou maiores valores, ainda está em consolidação e tinha 06 meses de idade quando foi realizado o ensaio com o FWD e 01 ano quando foi realizado o ensaio com a viga Benkelman. Geralmente, estruturas em consolidação tendem a apresentar maiores deflexões durante os ensaios de campo, tal situação pode causar uma falsa impressão de que o pavimento sofrerá ruptura por fadiga.

Quanto a faixa de %AT, com base nos valores mínimos e máximos, ela ficou entre 7,43% e 41,06%, porém, considerando a constatação anterior, analisando-se os trechos 01, 02, 04, 05 e 06 a faixa de %AT será de 7,43% a 23,76% (FWD1 – classe 3 e FWD 4 – classe1, respectivamente). Portanto, com exceção do trecho 03, os resultados apontam que o pavimento não sofrerá ruptura por fadiga durante sua vida útil.

O trecho 03 precisa ser monitorado para avaliar se de fato apresenta menor capacidade de suporte, ou se os resultados obtidos neste trabalho são provenientes da pouca idade do pavimento, e consequentemente, sua ausência de consolidação. Outro fator que pode ter afetado os resultados no trecho 03 é o fato de que os pontos ensaiados ficavam próximos da linha férrea que cruza a rodovia.

Devido à alta suscetibilidade do %AT com os valores de deflexão, seria necessário a avaliação de outras estruturas antes de afirmar ou não, que os valores

de %AT obtidos pelos modelos FWD são iguais aos da VB, o que constatou-se aqui é que trechos consolidados apresentam valores semelhantes, já trechos em consolidação podem apresentar diferenças significativas, que inclusive interferem na análise da ruptura da estrutura, visto que pelos modelos FWD o trecho 03 apresenta condição de ruptura, e pelo modelo VB ele encontra-se abaixo do percentual estipulado no critério de ruptura considerado neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo comparar as tensões e deformações do pavimento flexível da Rodovia Rio do Morro, a partir de simulações estruturais numéricas realizadas com o método dos elementos finitos, com base no módulo resiliente equivalente obtido pelo processo de retroanálise das bacias de deflexão obtidas em campo com os equipamentos FWD e viga Benkelman. Com base nos resultados das simulações realizadas no programa computacional ABAQUS, as principais conclusões deste trabalho foram:

- Antes da execução do pavimento é importante verificar o ano de conclusão do projeto, pois, em alguns casos a defasagem da contagem do tráfego pode requerer um redimensionamento da estrutura.
- Os trechos 03, 04 e 06, que ainda encontram-se em consolidação apresentaram maiores valores de deformação de tração, quando confrontados com os trechos 01, 02 e 05, já consolidados.
- Na camada de base a análise das ϵ_c demonstrou que estas apresentam uma tendência de comportamento inverso ao do M_{Reqv} , enquanto as σ_c apresentam tendência de um valor constante, analisando o mesmo ponto, nos 12 modelos estruturais numéricos simulados.
- Devido ao espraçamento das tensões esse comportamento constante das σ_c foi variando com o aumento da profundidade, e na camada de subleito os valores destas já não apresentavam essa característica, quando comparados os 12 modelos entre si.
- Ficou evidenciado que nas camadas de revestimento e de base o ponto mais solicitado do pavimento está situado sob o centro da roda (16.2,0, z), já na sub-base e no conjunto subleito encontra-se sob o centro de aplicação de carga (0,0, z). Este comportamento também é justificado pelo espraçamento das tensões.
- Analisando as variações encontradas nos modelos FWD em relação a VB não foi possível identificar um padrão relacionado a um maior ou menor valor obtido na aferição de D_0 e/ou no M_{Reqv} obtido. Isso indica que para uma melhor avaliação do pavimento é necessário analisar o

comportamento das tensões e deformações em pontos críticos, como os situados sob o ponto de aplicação de carga e o sob o centro da roda.

- Ressalva-se que os parâmetros utilizados no cálculo do afundamento permanente foram extraídos da literatura e não correspondem aos parâmetros dos materiais granulares empregados na rodovia Rio do Morro, estes últimos ainda são desconhecidos. Mas, considerando que o cálculo do afundamento permanente utilizou duas combinações de materiais granulares, estima-se que o pavimento está bem dimensionado em termos de ATR, podendo variar entre 2,553 e 5,170 mm até o fim de sua vida útil.
- O teste t de *student* demonstrou que os valores de afundamentos permanentes das camadas granulares obtidos como os modelos FWD e com os modelos VB são estatisticamente iguais, considerando o nível de significância de 5%. Portanto, para avaliação do afundamento permanente de rodovias existentes, através dos métodos empregados neste trabalho, o levantamento das deflexões pode ser realizado tanto pelo FWD quanto pela VB, visto que, o resultado é equivalente.
- Quanto a estimativa de %AT, os modelos numéricos mostraram alta suscetibilidade aos valores D_0 aferidos em campo, quanto maiores eram as deflexões, maiores eram os %AT. Sobre este aspecto, observou-se que tal situação pode não condizer com a real situação do pavimento, uma vez que, estruturas que ainda estão em fase de consolidação tendem a apresentar maiores valores de deflexões durante ensaios não destrutivos, causando uma falsa impressão de que o pavimento está sujeito a ruptura por fadiga, antes do fim de sua vida útil.
- Os trechos consolidados apresentaram %AT bem próximos quando comparados os modelos FWD e VB, já os trechos em consolidação apresentaram diferenças significativas; dentre essas diferenças destaca-se o trecho 03, que conforme resultado do modelo FWD sofreria ruptura por fadiga e, e de acordo com resultado do modelo VB não haveria ruptura por fadiga durante a vida útil da estrutura.
- A faixa de valores do %AT estimada, com base nas diferentes classes de fadiga das misturas asfálticas ficou entre 7,43% e 23,76%

(desconsiderando o trecho 03), portanto, o pavimento não sofrerá ruptura por fadiga durante o período de projeto.

- O ABAQUS demonstrou ser um bom programa computacional para análise das tensões e deformações de pavimentos flexíveis, utilizando como base o MEF, pois possibilitou a obtenção de valores de σ e ϵ nos pontos de interesse para análise, bem como a simulação da aderência parcial das camadas, através da modelagem de contato entre estas, utilizando o modelo de Coulomb.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como recomendação para pesquisas futuras que possam contribuir com estudo apresentado por essa dissertação, apresentam-se os seguintes itens:

- Realização dos ensaios dos materiais granulares e do revestimento, para recalcular o afundamento permanente e a estimativa do percentual de área trincada do pavimento ao fim de sua vida útil;
- Monitoramento contínuo da rodovia Rio do Morro, a fim de criar um histórico do comportamento estrutural do pavimento e assim poder melhorar a simulação através de dados observados em campo;
- Realização de análise não linear da estrutura do pavimento, quando for possível realizar os ensaios laboratoriais dos materiais empregados na rodovia Rio do Morro.
- Realização do mesmo estudo, em rodovias com diferentes espessuras de camadas e intensidade de tráfego, para avaliar o impacto destas variáveis nas tensões e deformações do pavimento.
- Realização da retroanálise sem a simplificação do conjunto subleito, mantendo o reforço e o subleito como camada isolada, para avaliar os efeitos das duas abordagens.
- Utilização de elementos infinitos na camada de subleito, e comparação dos resultados e do tempo de processamento com a camada de 4 metros simulada com elementos finitos.

5.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No decorrer da pesquisa, os itens que tornaram-se os principais fatores limitantes para este estudo foram:

- Falta de caracterização em laboratório dos materiais empregados na rodovia analisada;
- Defasagem de tempo e variação do clima entre a realização dos ensaios com o FWD e com a viga Benkelman, podem ter gerados efeitos nos resultados, os quais não foram possíveis mensurar;
- Ausência de estudos mais aprofundados sobre tensões e deformações atuantes no pavimento, para comparar os resultados dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. V. de. **Modelagem numérica tridimensional de pavimentos de concreto submetidos às cargas do tráfego e ao empenamento térmico**. 2019. 145p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/617-msc-pt-2019/9264-jordana-vieira-de-almeida>. Acesso em: 10 jul. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 238 p.
- ÁVILA, F. G. de. **Modelagem numérica para pavimentação flexível pelo método dos elementos finitos**. 2008. 196p., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://transportes.ime.eb.br/DISSERTA%C3%87%C3%95ES.htm>. Acesso em: 23 ago. 2019.
- BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção**. São Paulo: Plêiade, 1997, 103p
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 558p.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010. 501p.
- BORDIM, C. **Utilização do método de elemento finitos na avaliação das respostas estruturais de pavimentos flexíveis**. 2010, 103p., Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010. Disponível em: <http://bibliodigital.u-nijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/222>. Acesso em: 24 out. 2019.
- BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 2001. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79447/188421.pdf?sequence>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- BOURAHILI, A.; JACQUES, M. A. P. Práticas de avaliação de pavimentos nos estados e municípios brasileiros. **Transportes**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 64-78, 2010. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/279/242>. Acesso em: 05 set. 2019.

BUENO, L. D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria**. 2016. 460 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7926/BUENO,%20LUCAS%20DOTTO.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jan. 2021.

CAMARINI, G. C.; SILVA JR., C. A. P. da; FONTENELE, H. B. Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa (2018). In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Disponível em:

<<http://www.anpet.org.br/anais/?=Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20I>>. Acesso em: 10 dez. 2020

CERNI, G.; CARDONE, F.; VIRGILI, A.; CAMILLI, S. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading. **Construction and building materials**, [s. l.], v. 28, p. 79-87, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811004569>. Acesso em: 06 nov. 2020.

CESTNÁ DATABANKA. **About us**: data collection: Kuab FWD 50. Bratislava: Cestná Databanka, 2016. Disponível em: <https://www.cdb.sk/en/road-databank/data-collection/kuab-fwd-50.alej>. Acesso em: 09 set. 2019.

CNT. **Transporte rodoviário**: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: CNT, 2017, 158p. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 23 de ago. de 2019.

CNT; SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021**: relatório gerencial. Brasília: CNT; SEST SENAT, 2021, 231p. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/Pesquisa_CNT_Rodovias_2021_Web.pdf. Acesso em: 15 dez. 2021.

DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus 6.14 Online Documentation**. [s. l.], Dassault Systèmes, 2014. Disponível em: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/taxis/search/?query=wetting&submit.x=0&submit.y=0&group=bk&CDB=v6.14>. Acesso em: 01 ago. 2020.

DEINFRA. **Obras: mapa vivo de obras rodoviárias**. Joinville: DEINFRA, 2019. Disponível em: <http://deinfra.sc.gov.br/main/constructionmap>. Acesso em: 04 set. 2019.

DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. **IP-DE-P00/001**: Projeto de pavimentação. São Paulo, 2006. Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf. Acesso em: 12 ago. 2020.

DNER. **Norma DNER-ME 024/94**: Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994, 7p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me024-94.pdf/view>. Acesso em: 18 out. 2019.

DNER. **Norma DNER-PRO 273/96**: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”: procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1996, 4p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro273-96.pdf>. Acesso em: 18 out. 2019.

DNIT. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR - 719. Rio de Janeiro, 2006a, 274p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 13 out. 2019.

DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR - 720. Rio de Janeiro, 2006b, 310p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf. Acesso em: 13 jan. 2020.

DNIT. **Manual de estudos de tráfego**. Publicação IPR - 723. Rio de Janeiro, 2006c, 384p. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 07 set. 2020.

DNIT. **Norma DNIT 132/2010 – PRO**: Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2010a, 21p. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit132_2010_pro.pdf. Acesso em: 31 out. 2019.

DNIT. **Norma DNIT 133/2010 – ME**: Pavimentação asfáltica – delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010b, 8p. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit133_2010_me.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

DNIT. **Norma DNIT 134/2018 – ME**: Pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018a, 18p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit134_2018_me.pdf. Acesso em: 03 mar. 2021.

DNIT. **Norma DNIT 183/2018 – ME**: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018b, 15p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit183_2018_me.pdf. Acesso em: 03 mar. 2021.

DNIT. **Manual de ajuda programa MeDiNa**. v. 1.1.5, [s. l.], 2020. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_medina_1_1_5.pdf http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit133_2010_me.pdf. Acesso em: 19 ago. 2021.

FARIA, P. de D. **Shakedown Analysis in Structural and Geotechnical Engineering**. 1999, 216p., Ph.D Thesis. University of Wales, Swansea, 1999. Disponível em: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?did=1&uin=uk.bl.ethos.636956>. Acesso em: 24 nov. 2021

FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994, 313p., Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-09042018-102257/publico/Tese_FernandesJr_JoseL.pdf. Acesso em: 12 fev. 2021.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007, 319p.

FRANCISCO, A. P. S. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2012, 100p., Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2012. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/8011/1/Ana%20Francisco_MEC_2012.pdf. Acesso em: 06 set. 2019.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294p., Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/151-2007/1107-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco>. Acesso em: 19 set. 2019.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. da. **Manual de Utilização do programa MeDiNa: apresentação dos programas**. Convênio UFRJ/DNIT. Projeto DNIT TED n. 682/2014. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2020.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. 262 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen>. Acesso em: 12 jan. 2021.

FRITZEN, M. A.; FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. da; UBALDO, M. de O. Atualização da função de transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa medina. In: 9º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 2019, Lisboa, Portugal. Disponível em: <https://crp.pt/index.php/eventos/9o-congresso-rodoviario-portugues-importancia-de-boas-praticas/>. Acesso em: 23 jan. 2022.

FUENTES, L.; CAMARGO R.; ARELLANA, J.; VELOSA C.; MARTINEZ G. Modelling pavement serviceability of urban roads using deterministic and probabilistic approaches. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], 10p., 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2019.1577422>. Acesso em: 13 ago. 2019.

GOEL, A.; DAS, A. Nondestructive testing of asphalt pavements for structural condition evaluation: a state of the art. **Nondestructive Testing and Evaluation**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 121-140, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.ez74.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/10589750701848697>. Acesso em: 27 ago. 2019.

GOMES, L. H. C. **Equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos – estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco – MG**. 2012. 86p., Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/teses-e-dissertacoes/51/equivalencia-operacional-entre-equipamentos-defletometricos-estudo-de-caso-em-rodovia-localizada-em-ouro-branco-mg>. Acesso em: 07 set. 2020.

GOOGLE EARTH. **Imagens de satélite**. Joinville: Google, 2019. Brasil, escala aproximada 1:150.000.000. Santa Catarina, escala aproximada 1:4.545.500.

GOOGLE EARTH. **Imagens de satélite**. Joinville: Google, 2022. Joinville, sem escala.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 352p., Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes>. Acesso em: 22 fev. 2021.

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. da; CASTRO, C. D. Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], 18p., 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2018.1473283?journalCode=trmp20>. Acesso em: 12 jul. 2021.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004, 775p.

IBGE. **Portal das cidades**: Joinville: IBGE, 2021a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/panorama>. Acesso em: 04 mar. 2022.

IBGE. **Portal das cidades**: Araquari: IBGE, 2021b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/araquari>. Acesso em: 04 mar. 2022.

KLAMT, A. R. **Influência da ação do tráfego no custo de construção e restauração de pavimentos asfálticos**. 2014, 172p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7867>. Acesso em: 04 out. 2020.

LEKARP, F.; DAWSON, A. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 9-18, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061897000780>. Acesso em: 03 set. 2019.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON A. State of art. II: Permanent strain response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, [s. l.], v. 126, n. 1, p. 76-83, 2000. Disponível em: <https://ascelibrary.org.ez74.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282000%29126%3A1%2876%29>. Acesso em: 31 ago. 2019.

LI, M.; WANG, H.; GUANGJI, X.; PENGYU, X. Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 141, p. 23-35, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061817303021>. Acesso em: 14 set. 2019.

LIAO, J.; LIN, H.; LI, Q.; ZHANG, D. A Correction Model for the Continuous Deflection Measurement of Pavements Under Dynamic Loads. **IEEE Access**, [s. l.], v. 7, p. 154770-154785, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8867887>. Acesso em: 16 ago. 2020.

LIMA, C. D. A. de; MOTTA, L. M. G. da; GUIMARÃES, A. C. R. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. **Transportes**, [s. l.], v.25, n. 2, p. 41-52, 2017. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1262>. Acesso em 15 mar. 2022.

LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2015, 955p.

MACHADO, T. F. de O. **Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF**: Baseado no Novo Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico Nacional. 2019, 132p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pec/files/2019/01/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Thiago-F%C3%A1vero.pdf>. Acesso em: 01 set. 2020.

MAGALHÃES, B. A. da C. **Comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários**. 2015. 74p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2015. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40470>. Acesso em: 08 fev. 2020.

MARECOS, V.; SOLLA, M.; FONTUL, S.; ANTUNES, V. Assessing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 135, p. 76-85, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061817300028>. Acesso em: 27 out. 2019.

MARKÓ, G.; PRIMUSZ, P.; PÉTERFALVI, J. Measuring the bearing capacity of forest roads with an improved Benkelman beam apparatus. **Acta Silvatica Et Lignaria Hungarica**, [s. l.], v. 9 (1), p. 97-109, 2013. Disponível em: [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002faslh\\$002f9\\$002f1\\$002farticle-p97.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002faslh$002f9$002f1$002farticle-p97.xml). Acesso em: 10 set. 2019.

MEDINA, J. D; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015, 638p.

NEGA, A., NIKRAZ, H., AL-QADI, I. L. Dynamic analysis of falling weight deflectometer. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 427-437, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756416302148?via%3Dihub>. Acesso em: 22 ago. 2019.

NERY, C. C. Z. **Comparativo entre deflexões com viga Benkelman, FWD e LWD na avaliação estrutural e dimensionamento de reforço de pavimentos**. 2020. 238p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

NERY, C.C.Z; SANTOS, A. G. Structural evaluation of pavements applying the MeDiNa Method and FWD and Benkelman beam deflection measurements. **Transportes**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 1-14. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2502>. Acesso em: 10 mar. 2021.

NOBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003, 365p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/103-msc-pt-2003/1835-eduardo-suassuna-nobrega>. Acesso em: 11. ago. 2020.

NORBACK, C.; MOTTA, L. M. G. da. Deformabilidade permanente e módulo de resiliência de dois solos e uma brita usados em um segmento de rodovia. IN: XXXI CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 2017, Recife – PE.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e deformabilidade permanente de três solos e misturas de solo-brita**. 2018, 161p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13425/1/CarineNorback.pdf>. Acesso em: 11. fev. 2022.

PINTO, S. **Estudo de comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991, 477p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/756-salomao-pinto>. Acesso em: 17. set. 2020.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiadora e Artes Gráficas Ltda, 2002. 269p.

RAHMAN, M.S.; ERLINGSSON, S. Influence of moisture on resilient deformation behaviour of unbound granular materials. In: KIM, R. Y. **Asphalt Pavements**. v. I. London: CRC Press, 2014, p. 571-580.

RANGEL, G. W. A. **Um método para estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado**. 2017, 368p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/en/doctoral-thesis/595-2017/8644-george-wilton-albuquerque-rangel-2>. Acesso em: 19 set. 2020.

RODRIGUES, P. R. **Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve**. 2018. 133p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SALEH, M. A mechanistic empirical approach for the evaluation of the structural capacity and remaining service life of flexible pavements at the network level.

Canadian Journal of Civil Engineering, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 749-758, 2016.

Disponível em: [http://web-a-](http://web-a-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=1fc05390-f547-476c-b74c-4ddc936378f5%40sdc-v-sessmgr02)

[ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=1fc05390-f547-476c-b74c-4ddc936378f5%40sdc-v-sessmgr02](http://web-a-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=1fc05390-f547-476c-b74c-4ddc936378f5%40sdc-v-sessmgr02). Acesso em: 01 nov. 2019.

SALVIANO, W. R. de A; MOTTA, L. M. G. da. **Análise do controle construtivo de um trecho de pavimento semirrígido por deflexão**. In: 44ª Reunião de

Pavimentação, Foz do Iguaçu: ABPv, 2015. Disponível em:

http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_66.pdf. Acesso em: 28 mar. 2020.

SANTA CATARINA. Decreto nº 515, de 17 de março de 2020. Declara situação de emergência em todo o território catarinense, nos termos do COBRADE nº 1.5.1.1.0 – doenças infecciosas virais, para fins de prevenção e enfrentamento à COVID-19, e estabelece outras providências. **Diário oficial do Estado de Santa Catarina**, Florianópolis, n. 21.223-B, 2020.

SANTOS, M. S. dos. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS**.

2015, 202p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7886>. Acesso em: 05 set. 2020.

SANTOS, A. G. dos. **Estudo teórico do efeito da interação entre camadas no comportamento estrutural de pavimentos asfálticos**. 2018, 78p., Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-23052020-153122/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SANTOS, A. G. dos; ASSIS, R. K. M. de; FERNANDES JR J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **Revista Transportes**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 89-101, 2019p. Disponível em:

<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/1597/754/9792#:~:text=Quanto%20mais%20r%C4%B1%CC%81g%20ido%20o,melhor%20desem%2D%20penho%20dos%20pavimentos>. Acesso em: 28 jul. 2021.

SCHWARTZ, C. W. Effect of Stress-Dependent Base Layer on the Superposition of Flexible Pavement Solutions. **The International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 331–352, 2002. Disponível em: [http://web-a-](http://web-a-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=bdb6ea71-58c9-48b8-a895-d00988da43c3%40sdc-v-sessmgr02)

[ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=bdb6](http://web-a-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=bdb6ea71-58c9-48b8-a895-d00988da43c3%40sdc-v-sessmgr02)

[ea71-58c9-48b8-a895-d00988da43c3%40sdc-v-sessmgr02](http://web-a-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=bdb6ea71-58c9-48b8-a895-d00988da43c3%40sdc-v-sessmgr02). Acesso em: 28 out. 2019.

SILVA, C.F.S.C. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/es/documents2/mestrado/2014/2561-carlos-filipe-santos-correia-e-silva-mestrado>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SOUZA JR., J. G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 218p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2018/3240-junior-jgs-tm-18-1>. Acesso em: 31 ago. 2019.

THEISEN, K. M.; MATTOS, J. R. G.; TREICHEL, D. S., CERATTI, J. A. P. Metodologia de emprego de softwares de retroanálise de bacias obtidas via Falling Weight Delectometer (FWD) considerando casos de carregamento com eixo padrão. In: GEORS – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 5., 2009, Pelotas, RS.

YAO, H.; LIU, Y; YOU, Z; LI, L.; GOH, S. W. Discrete element simulation of bending beam rheometer tests for asphalt binder. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 161-168, 2012. Disponível em: <http://www.ijprt.org.tw/index.php?page=issue&volume=5&issue=3>. Acesso em: 18 abr. 2020.

YASSENN, O. M.; ROHANI, I.; ENDUT, D.; ISHAK, S. Z.; YASEEN, H. M. Finite element modelling of flexible pavement. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 115-120, 2015. Disponível em: <https://www.jmest.org/vol-2-issue-1-january-2015/>. Acesso em: 22 ago. 2020.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. New York: John Wiley & Sons, 1975, 711p

YSHIBA, J. K.; FERNANDES JR., J. L. Modelos estatísticos para previsão de desempenho de pavimentos. **Acta Scientiarum: Technology**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 175-181, 2005. Disponível em: <https://doaj.org/article/a6417b9f42344607bb03fdc1990ae140?frbrVersion=2>. Acesso em: 02 set. 2019.

ZHU, B. **The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering**. Singapura: JohnWiley & Sons Singapore Pte, 2018, 843p.

APÊNDICE A – DADOS DO ENSAIO COM A VIGA BENKELMAN

Data do ensaio	Temperatura		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)						
	Ar (°C)	Pav. (°C)		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
				(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
SEGMENTO 01										
06/12/19	31	44	01	47,3	43,2	37,0	26,7	20,6	14,4	8,2
06/12/19	31	44	02	84,3	82,2	74,0	53,5	39,1	32,9	30,8
06/12/19	32	44,5	03	26,7	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
06/12/19	32	45	04	39,1	35,0	26,7	18,5	14,4	10,3	8,2
06/12/19	32	45	05	41,1	26,7	20,6	14,4	8,2	4,1	2,1
06/12/19	31	44	06	41,1	37,0	28,8	20,6	16,4	8,2	6,2
06/12/19	30	43	07	32,9	26,7	18,5	10,3	6,2	4,1	2,1
06/12/19	30	41	08	43,2	39,1	32,9	22,6	20,6	14,4	12,3
06/12/19	30	42	09	30,8	26,7	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2
06/12/19	29	41	10	28,8	26,7	18,5	16,4	12,3	8,2	6,2
06/12/19	29	39,5	11	32,9	24,7	20,6	12,3	10,3	6,2	4,1
06/12/19	29	38,5	12	53,5	43,2	37,0	28,8	24,7	20,6	14,4
06/12/19	29	39,5	13	53,5	43,2	32,9	28,8	20,6	16,4	10,3
06/12/19	29	40	14	51,4	41,1	30,8	22,6	14,4	8,2	4,1
06/12/19	29	42	15	51,4	41,1	37,0	32,9	28,8	20,6	16,4
06/12/19	30	43	16	30,8	26,7	24,7	22,6	18,5	10,3	8,2
06/12/19	30	43	17	59,6	55,5	49,3	45,2	39,1	28,8	20,6
06/12/19	30	43,5	18	65,8	51,4	41,1	35,0	24,7	14,4	8,2
06/12/19	30	43,5	19	43,2	32,9	24,7	18,5	12,3	8,2	6,2
06/12/19	31	44	20	51,4	39,1	28,8	22,6	14,4	10,3	8,2
06/12/19	31	43,5	21	26,7	22,6	16,4	14,4	12,3	6,2	4,1
SEGMENTO 02										
06/12/19	26	31	22	30,8	20,6	16,4	12,3	10,3	6,2	4,1
06/12/19	25	29,5	23	41,1	30,8	26,7	22,6	18,5	14,4	10,3
06/12/19	25	29,5	24	41,1	30,8	24,7	20,6	16,4	10,3	8,2
06/12/19	24,5	28	25	32,9	26,7	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2
06/12/19	24,5	28	26	43,2	35,0	24,7	16,4	14,4	10,3	8,2
06/12/19	27,5	34,5	27	43,2	35,0	28,8	16,4	14,4	6,2	4,1
06/12/19	27,5	33	28	55,5	49,3	43,2	32,9	28,8	18,5	14,4
06/12/19	27	32	29	37,0	26,7	20,6	16,4	14,4	10,3	8,2
06/12/19	26,5	31,5	30	55,5	45,2	37,0	26,7	16,4	10,3	8,2
06/12/19	26	31	31	41,1	37,0	30,8	22,6	16,4	12,3	8,2
06/12/19	24	26	32	28,8	22,6	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2
06/12/19	24	26,5	33	20,6	18,5	16,4	14,4	10,3	8,2	6,2

Data do ensaio	Temperatura		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)						
	Ar (°C)	Pav. (°C)		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
				(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
06/12/19	24	27	34	26,7	24,7	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2
06/12/19	24	27	35	26,7	24,7	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2
06/12/19	24	28	36	30,8	22,6	18,5	16,4	14,4	10,3	8,2
06/12/19	23,5	28	37	26,7	20,6	18,5	16,4	14,4	6,2	4,1
06/12/19	23,5	27	38	30,8	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2
06/12/19	23	26	39	26,7	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2	6,2
06/12/19	23	26	40	24,7	22,6	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2

SEGMENTO 03

06/12/19	28	38	41	41,1	37,0	28,8	24,7	20,6	16,4	12,3
06/12/19	28	38	42	39,1	32,9	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2
06/12/19	27	36	43	39,1	28,8	20,6	16,4	10,3	4,1	4,1
06/12/19	27	36	44	28,8	24,7	16,4	14,4	12,3	8,2	4,1
06/12/19	29	39	45	53,5	45,2	32,9	26,7	22,6	14,4	12,3
06/12/19	28	40	46	59,6	51,4	39,1	32,9	26,7	18,5	10,3
06/12/19	28	37	47	51,4	43,2	32,9	24,7	16,4	12,3	6,2
06/12/19	28	38	48	49,3	35,0	28,8	20,6	18,5	10,3	8,2

SEGMENTO 04

06/12/19	27	37	49	20,6	18,5	14,4	12,3	8,2	4,1	4,1
06/12/19	27	37	50	37,0	32,9	28,8	20,6	12,3	8,2	6,2
06/12/19	27	37,5	51	28,8	26,7	24,7	18,5	14,4	8,2	6,2
06/12/19	27	38	52	32,9	26,7	20,6	16,4	12,3	10,3	6,2
06/12/19	27	38	53	26,7	24,7	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2
06/12/19	27	38	54	28,8	26,7	20,6	16,4	10,3	6,2	4,1
06/12/19	28	38,5	55	32,9	28,8	20,6	14,4	12,3	10,3	6,2
06/12/19	28	37	56	24,7	22,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1
06/12/19	29	38	57	28,8	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2	6,2
06/12/19	29	38	58	39,1	30,8	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2
06/12/19	29	38	59	30,8	26,7	22,6	16,4	12,3	8,2	8,2
06/12/19	26	36	60	35,0	22,6	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1
06/12/19	26	36	61	28,8	26,7	18,5	14,4	12,3	8,2	4,1
06/12/19	26	35,5	62	39,1	35,0	26,7	22,6	18,5	12,3	8,2
06/12/19	26	36	63	39,1	35,0	28,8	18,5	12,3	8,2	6,2
06/12/19	26	36	64	28,8	24,7	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1
06/12/19	27	37	65	41,1	35,0	30,8	24,7	20,6	14,4	10,3
06/12/19	27	37,5	66	32,9	30,8	24,7	18,5	16,4	8,2	4,1
06/12/19	27	37,5	67	57,6	49,3	39,1	30,8	26,7	20,6	16,4
06/12/19	27	37	68	22,6	20,6	18,5	14,4	10,3	6,2	4,1
06/12/19	27	37,5	69	39,1	32,9	26,7	18,5	16,4	10,3	8,2
06/12/19	27	37,5	70	20,6	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2	4,1

Data do ensaio	Temperatura		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)						
	Ar (°C)	Pav. (°C)		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
				(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
06/12/19	27	37,5	69	39,1	32,9	26,7	18,5	16,4	10,3	8,2
06/12/19	27	37,5	70	20,6	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2	4,1

SEGMENTO 05

03/12/19	26	33	71	32,9	24,7	14,4	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26	33	72	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26	32,5	73	26,7	20,6	16,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	26	33,5	74	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	26,5	34	75	22,6	20,6	16,4	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26	33	76	18,5	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26,5	33	77	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	27	33	78	20,6	18,5	10,3	6,2	5,1	4,1	2,1
03/12/19	26	32,5	79	30,8	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	26	32	80	22,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26	31,5	81	24,7	20,6	16,4	10,3	8,2	4,1	4,1
03/12/19	26	32	82	30,8	28,8	22,6	16,4	14,4	10,3	6,2
03/12/19	26	33	83	26,7	22,6	14,4	10,3	8,2	4,1	2,1
03/12/19	26	33	84	26,7	22,6	16,4	10,3	6,2	4,1	2,1
03/12/19	26	32,5	85	26,7	18,5	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2
03/12/19	24	33	86	24,7	16,4	14,4	10,3	6,2	4,1	2,1
03/12/19	24	32,5	87	20,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1	4,1
03/12/19	24	32	88	20,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	24	32	89	26,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	24,5	32,5	90	22,6	18,5	12,3	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	24,5	31,5	91	24,7	16,4	14,4	8,2	6,2	4,1	4,1
03/12/19	24,5	32	92	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	24,5	31	93	20,6	18,5	12,3	10,3	6,2	4,1	2,1
03/12/19	25	32	94	22,6	18,5	14,4	10,3	6,2	4,1	2,1
03/12/19	25	33,5	95	24,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	25	32,5	96	20,6	16,4	14,4	10,3	8,2	4,1	2,1
03/12/19	25	32	97	20,6	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2	4,1
03/12/19	25	31,5	98	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	25	33	99	26,7	20,6	14,4	8,2	6,2	4,1	2,1
03/12/19	25,5	32,5	100	24,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1

SEGMENTO 06

03/12/19	27	34	101	32,9	30,8	22,6	18,5	14,4	10,3	6,2
03/12/19	27	32,5	102	35,0	30,8	24,7	18,5	14,4	10,3	6,2
03/12/19	27	30	103	30,8	24,7	18,5	14,4	10,3	4,1	2,1
03/12/19	27	31	104	28,8	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1

Data do ensaio	Temperatura		Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)						
	Ar (°C)	Pav. (°C)		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
				(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
03/12/19	27	30	105	30,8	26,7	16,4	12,3	8,2	6,2	2,1
03/12/19	27	31	106	28,8	24,7	18,5	12,3	10,3	8,2	6,2
03/12/19	27	30	107	32,9	26,7	20,6	14,4	10,3	6,2	4,1
03/12/19	27	31	108	24,7	20,6	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2
03/12/19	27	32	109	30,8	24,7	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2
03/12/19	27	32,5	110	35,0	24,7	18,5	12,3	8,2	4,1	4,1

APÊNDICE B – DADOS DA CONTAGEM DE TRÁFEGO

Contagem Volumétrica														
Realizada entre em 18/03/2020 das 06:00 às 22:00														
Horário	Veículos Leves			Caminhões								Ônibus	Outros	Total
	Motos	Carros	Camionetas	2C	3C	2S2	2S3	3S2	3S3	3Q6	3T6	2C	Retro	
06:00 às 07:00	110	215	27	8	6		2		4			2	1	375
07:00 às 08:00	100	337	23	8	11				1	1		1		482
08:00 às 09:00	36	215	17	13	13	1	1		3			5		304
09:00 às 10:00	28	148	16	16	17		2		1		1	1		230
10:00 às 11:00	30	174	13	17	20	2			1	1				258
11:00 às 12:00	33	166	16	20	14	2					1	1		253
12:00 às 13:00	47	156	18	6	6	1								234
13:00 às 14:00	45	168	21	14	13		2	1						264
14:00 às 15:00	44	198	26	18	23	1								310
15:00 às 16:00	35	208	20	22	20		1	1				2	2	311
16:00 às 17:00	40	265	19	16	15	1		1	2					359
17:00 às 18:00	111	343	34	7	5							1	1	502
18:00 às 19:00	64	276	21	6	7									374
19:00 às 20:00	34	196	11	1	1									243
20:00 às 21:00	15	116	5	3	1				1					141
21:00 às 22:00	21	76	3	1										101
Total	793	3.257	290	176	172	8	8	3	13	2	2	13	4	4.741

APÊNDICE C – TESTE DE NORMALIDADE E TESTE T DE *STUDENT*

R-studio.R

```
library(readxl)
Dados <- read_excel("C:/Users/cah_b/OneDrive/Dissertação Oficial/Dados/Teste
T/Dados.xlsx")
## New names:
## * `` -> ...9
## * `` -> ...18
## * `` -> ...27
library(nortest)
attach(Dados)

#Legenda da variáveis:
# C1 - Combinação 1 de materiais granulares.
# C2 - Combinação 2 de materiais granulares.
# CC - Centro de aplicação de carga.
# CR - Centro da roda.
# Pav, Bas, Sub, Conj - Referência as deformações permanentes totais do #
# pavimento, base, sub-base e conjunto subleito, respectivamente.
# FWD, VB - Modelo estrutural

#Testes de normalidade das variáveis:
# Teste de normalidade Shapiro-Wilk
shapiro.test(C1CCPavFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCPavFWD
## W = 0.92539, p-value = 0.545
shapiro.test(C1CCPavVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCPavVB
## W = 0.81664, p-value = 0.08252
shapiro.test(C1CCBasFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCBasFWD
## W = 0.9533, p-value = 0.7669
shapiro.test(C1CCBasVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCBasVB
## W = 0.91445, p-value = 0.4663
shapiro.test(C1CCSubFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCSubFWD
## W = 0.9126, p-value = 0.4537
```

```

shapiro.test(C1CCSubVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCSubVB
## W = 0.92406, p-value = 0.5351
shapiro.test(C1CCConjFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCConjFWD
## W = 0.86447, p-value = 0.2051
shapiro.test(C1CCConjVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CCConjVB
## W = 0.839, p-value = 0.1279
shapiro.test(C2CCPavFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCPavFWD
## W = 0.90194, p-value = 0.3855
shapiro.test(C2CCPavVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCPavVB
## W = 0.86472, p-value = 0.206
shapiro.test(C2CCBasFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCBasFWD
## W = 0.93865, p-value = 0.6484
shapiro.test(C2CCBasVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCBasVB
## W = 0.88915, p-value = 0.3138
shapiro.test(C2CCSubFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCSubFWD
## W = 0.88367, p-value = 0.2863
shapiro.test(C2CCSubVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCSubVB
## W = 0.9144, p-value = 0.466
shapiro.test(C2CCConjFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCConjFWD
## W = 0.88285, p-value = 0.2824

```

```

shapiro.test(C2CCConjVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CCConjVB
## W = 0.79844, p-value = 0.0569
shapiro.test(C1CRPavFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRPavFWD
## W = 0.85628, p-value = 0.1768
shapiro.test(C1CRPavVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRPavVB
## W = 0.86273, p-value = 0.1987
shapiro.test(C1CRBasFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRBasFWD
## W = 0.81896, p-value = 0.08644
shapiro.test(C1CRBasVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRBasVB
## W = 0.92503, p-value = 0.5423
shapiro.test(C1CRSubFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRSubFWD
## W = 0.85978, p-value = 0.1884
shapiro.test(C1CRSubVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRSubVB
## W = 0.9186, p-value = 0.4953
shapiro.test(C1CRConjFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRConjFWD
## W = 0.85931, p-value = 0.1868
shapiro.test(C1CRConjVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C1CRConjVB
## W = 0.93468, p-value = 0.6167
shapiro.test(C2CRPavFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRPavFWD
## W = 0.88987, p-value = 0.3175

```

```

shapiro.test(C2CRPavVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRPavVB
## W = 0.87726, p-value = 0.2567
shapiro.test(C2CRBasFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRBasFWD
## W = 0.81167, p-value = 0.07464
shapiro.test(C2CRBasVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRBasVB
## W = 0.87799, p-value = 0.2599
shapiro.test(C2CRSubFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRSubFWD
## W = 0.87035, p-value = 0.2276
shapiro.test(C2CRSubVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRSubVB
## W = 0.90472, p-value = 0.4026
shapiro.test(C2CRConjFWD)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRConjFWD
## W = 0.87266, p-value = 0.237
shapiro.test(C2CRConjVB)
## Shapiro-Wilk normality test
## data: C2CRConjVB
## W = 0.93252, p-value = 0.5997

#Teste T
# C1CCPavFWD x C1CCPavVB"
t.test(C1CCPavFWD,C1CCPavVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CCPavFWD and C1CCPavVB
## t = 2.4804, df = 5, p-value = 0.05581
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.0020837 0.1167353
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.05732579

```

```
# C1CCBasFWD x C1CCBasVB"
t.test(C1CCBasFWD,C1CCBasVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CCBasFWD and C1CCBasVB
## t = 2.3703, df = 5, p-value = 0.06393
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.001078136 0.026602369
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.01276212
```

```
# C1CCSubFWD x C1CCSubVB"
t.test(C1CCSubFWD,C1CCSubVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CCSubFWD and C1CCSubVB
## t = 2.2735, df = 5, p-value = 0.07212
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.003989746 0.065051865
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.03053106
```

```
# C1CCConjFWD x C1CCConjVB"
t.test(C1CCConjFWD,C1CCConjVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CCConjFWD and C1CCConjVB
## t = 2.277, df = 5, p-value = 0.07181
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.001809464 0.029874686
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.01403261
```

```
# C2CCPavFWD x C2CCPavVB"
t.test(C2CCPavFWD,C2CCPavVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CCPavFWD and C2CCPavVB
## t = 2.5512, df = 5, p-value = 0.05119
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.001134811 0.299615139
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.1492402
```

```
# C2CCBasFWD x C2CCBasVB"
t.test(C2CCBasFWD,C2CCBasVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CCBasFWD and C2CCBasVB
## t = 2.3349, df = 5, p-value = 0.0668
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.001293696 0.026930291
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.0128183
```

```
# C2CCSubFWD x C2CCSubVB"
t.test(C2CCSubFWD,C2CCSubVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CCSubFWD and C2CCSubVB
## t = 2.3905, df = 5, p-value = 0.06235
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.00679226 0.18711527
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.0901615
```

```
# C2CCCConjFWD x C2CCCConjVB"
t.test(C2CCCConjFWD,C2CCCConjVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CCCConjFWD and C2CCCConjVB
## t = 2.7812, df = 5, p-value = 0.03885
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  0.003503457 0.089017267
## sample estimates:
## mean of the differences
##      0.04626036
```

```
# C1CRPavFWD x C1CRPavVB"
t.test(C1CRPavFWD,C1CRPavVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CRPavFWD and C1CRPavVB
## t = 0.9426, df = 5, p-value = 0.3892
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.04337444 0.09360193
## sample estimates:
## mean of the differences
##      0.02511375
```

```
# C1CRBasFWD x C1CRBasVB"
t.test(C1CRBasFWD,C1CRBasVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CRBasFWD and C1CRBasVB
## t = -1.2367, df = 5, p-value = 0.2711
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.12987444 0.04550357
## sample estimates:
## mean of the differences
##     -0.04218544
```

```
# C1CRSubFWD x C1CRSubVB"
t.test(C1CRSubFWD,C1CRSubVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CRSubFWD and C1CRSubVB
## t = 2.0919, df = 5, p-value = 0.09069
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.005594093 0.054481767
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.02444384
```

```
# C1CRConjFWD x C1CRConjVB"
t.test(C1CRConjFWD,C1CRConjVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C1CRConjFWD and C1CRConjVB
## t = 2.7341, df = 5, p-value = 0.04108
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.0008687085 0.0281753155
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.01452201
```

```
# C2CRPavFWD x C2CRPavVB"
t.test(C2CRPavFWD,C2CRPavVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CRPavFWD and C2CRPavVB
## t = 1.8743, df = 5, p-value = 0.1198
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.0301688 0.1925847
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.08120794
```

```

# C2CRBasFWD x C2CRBasVB"
t.test(C2CRBasFWD,C2CRBasVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CRBasFWD and C2CRBasVB
## t = -1.2381, df = 5, p-value = 0.2706
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.11075636 0.03874833
## sample estimates:
## mean of the differences
## -0.03600401

# C2CRSubFWD x C2CRSubVB"
t.test(C2CRSubFWD,C2CRSubVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CRSubFWD and C2CRSubVB
## t = 2.2293, df = 5, p-value = 0.07623
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.01096004 0.15415521
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.07159759

# C2CRConjFWD x C2CRConjVB"
t.test(C2CRConjFWD,C2CRConjVB,paired = T,conf.level = 0.95,alternative =
"two.sided")
## Paired t-test
## data: C2CRConjFWD and C2CRConjVB
## t = 2.8889, df = 5, p-value = 0.03423
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.005026088 0.086202638
## sample estimates:
## mean of the differences
## 0.04561436

```

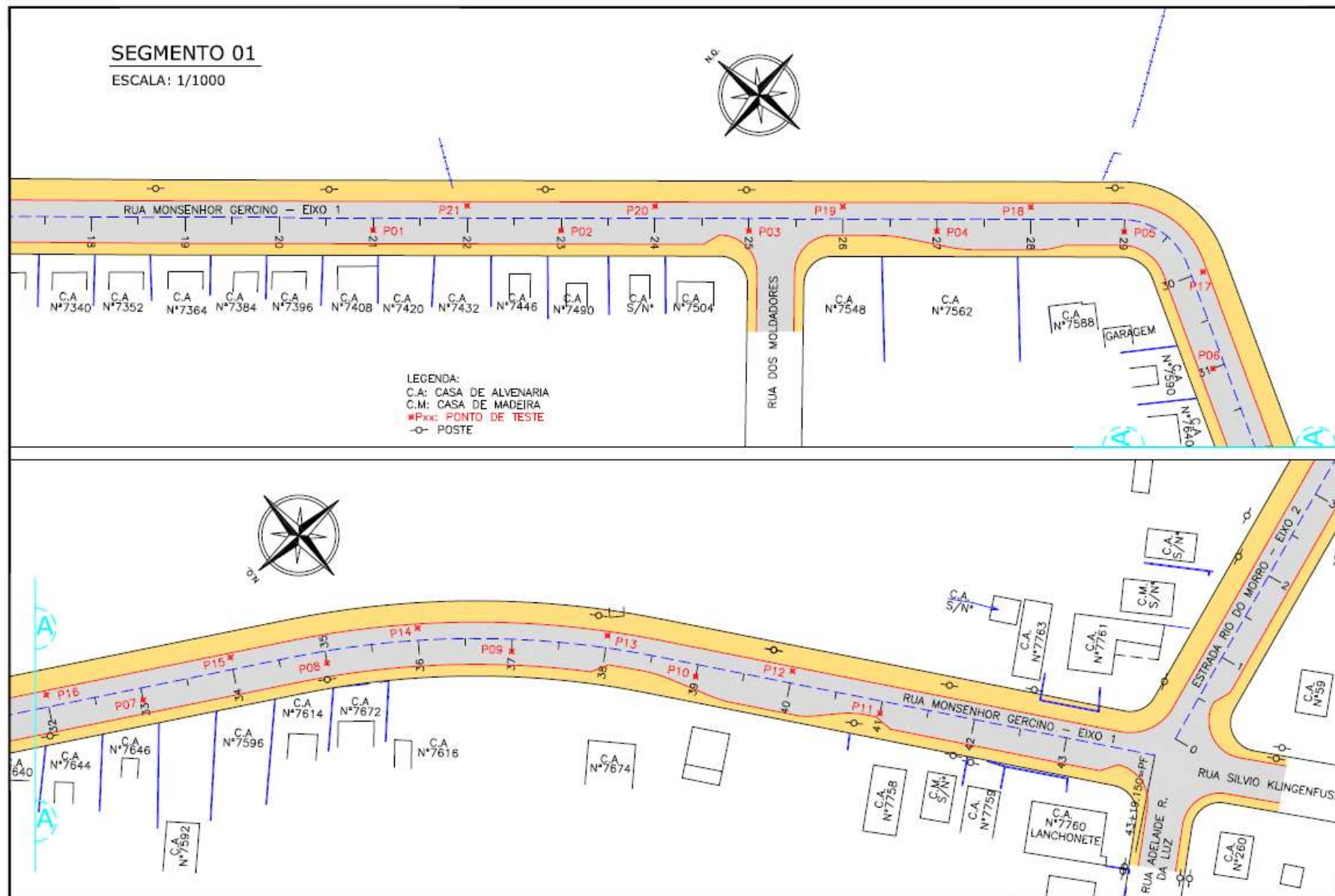
ANEXO A – DADOS DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE

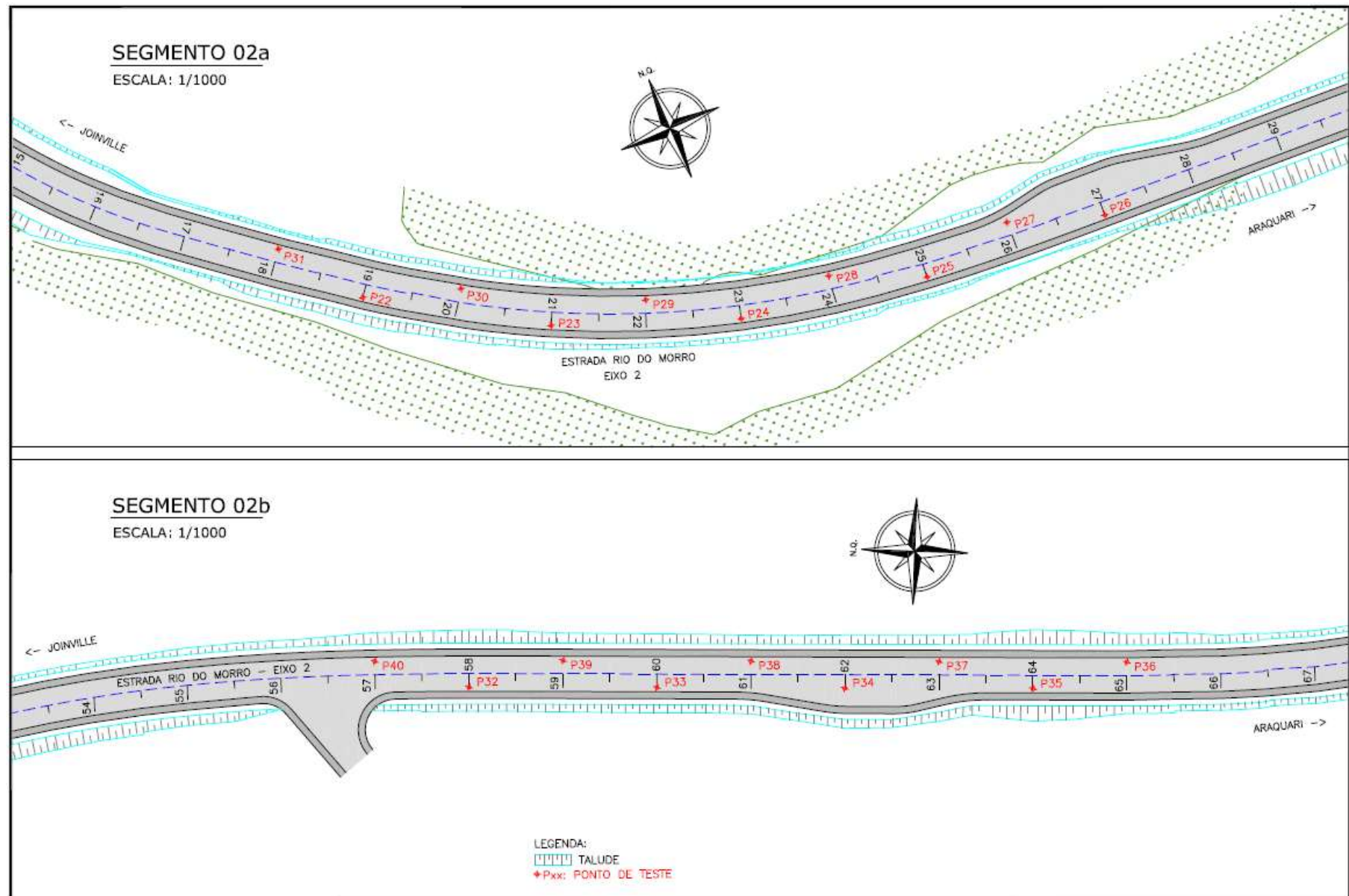
Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
01	1	21+0	direito	720755.464	7083619.075
02	1	23+0	direito	720780.436	7083587.828
03	1	25+0	direito	720805.407	7083556.580
04	1	27+0	direito	720830.378	7083525.332
05	1	29+0	direito	720855.273	7083494.162
06	1	31+0	direito	720844.403	7083461.217
07	1	33+0	direito	720823.877	7083426.884
08	1	35+0	direito	720803.297	7083392.693
09	1	37+0	direito	720778.630	7083361.973
10	1	39+0	direito	720748.253	7083336.661
11	1	41+0	direito	720716.055	7083312.928
12	1	40+0	esquerdo	720735.239	7083320.609
13	1	38+0	esquerdo	720767.376	7083344.654
14	1	36+0	esquerdo	720795.807	7083373.444
15	1	34+0	esquerdo	720818.078	7083407.050
16	1	32+0	esquerdo	720838.603	7083441.382
17	1	30+0	esquerdo	720859.128	7083475.714
18	1	28+0	esquerdo	720846.926	7083512.954
19	1	26+0	esquerdo	720821.955	7083544.202
20	1	24+0	esquerdo	720796.984	7083575.450
21	1	22+0	esquerdo	720772.012	7083606.698
22	2	19+0	direito	720786.338	7082924.760
23	2	21+0	direito	720820.259	7082902.599
24	2	23+0	direito	720857.625	7082887.026
25	2	25+0	direito	720897.271	7082878.570
26	2	27+0	direito	720937.137	7082874.753
27	2	26+0	esquerdo	720917.556	7082882.049
28	2	24+0	esquerdo	720878.360	7082887.560
29	2	22+0	esquerdo	720840.826	7082899.157
30	2	20+0	esquerdo	720806.109	7082917.730
31	2	18+0	esquerdo	720774.360	7082941.625
32	2	58+0	direito	721357.461	7082539.371
33	2	60+0	direito	721357.921	7082499.391
34	2	62+0	direito	721358.611	7082459.395
35	2	64+0	direito	721359.219	7082419.402
36	2	65+0	esquerdo	721365.223	7082399.524
37	2	63+0	esquerdo	721364.631	7082439.481
38	2	61+0	esquerdo	721364.057	7082479.477
39	2	59+0	esquerdo	721363.484	7082519.472
40	2	57+0	esquerdo	721362.588	7082559.521
41	2	100+15	direito	721283.401	7081782.319
42	2	101+3	direito	721278.547	7081775.960
43	2	103+5	direito	721253.045	7081742.546

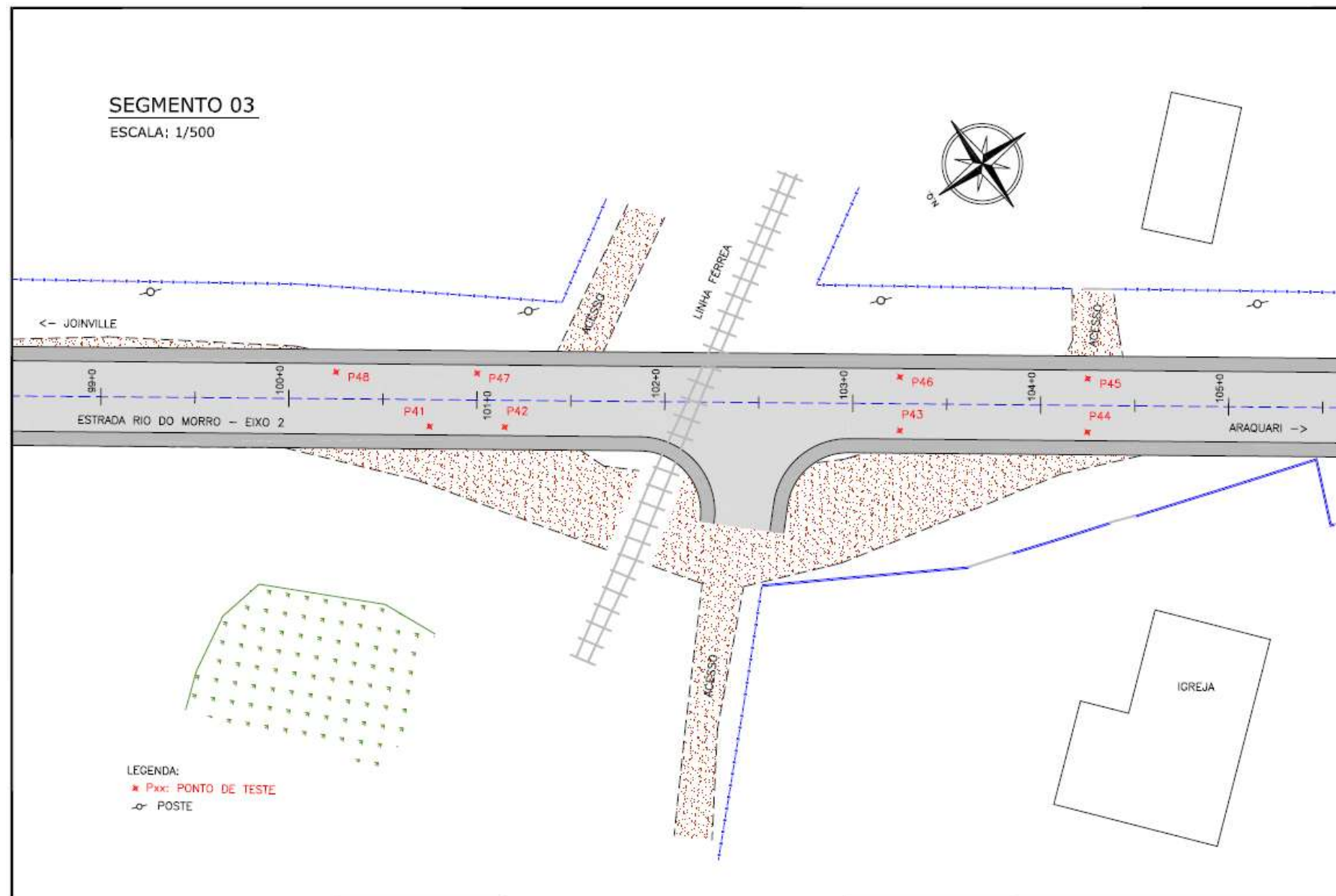
Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
44	2	104+5	direito	721240.931	7081726.674
45	2	104+5	esquerdo	721245.462	7081723.216
46	2	103+5	esquerdo	721257.597	7081739.114
47	2	101+0	esquerdo	721284.898	7081774.886
48	2	100+5	esquerdo	721293.999	7081786.810
49	2	160+10	direito	721662.396	7080828.310
50	2	161+10	direito	721672.303	7080810.722
51	2	162+10	direito	721683.359	7080793.833
52	2	163+10	direito	721695.516	7080777.718
53	2	164+10	direito	721708.720	7080762.448
54	2	165+10	direito	721722.911	7080748.093
55	2	166+10	direito	721738.028	7080734.714
56	2	170+0	direito	721796.898	7080696.022
57	2	171+0	direito	721814.769	7080686.852
58	2	172+0	direito	721832.820	7080678.126
59	2	173+0	direito	721850.933	7080669.621
60	2	173+10	esquerdo	721862.399	7080670.496
61	2	172+10	esquerdo	721844.371	7080679.107
62	2	171+10	esquerdo	721826.259	7080687.582
63	2	170+10	esquerdo	721808.404	7080696.440
64	2	169+10	esquerdo	721790.861	7080705.820
65	2	166+0	esquerdo	721734.136	7080745.546
66	2	165+0	esquerdo	721719.750	7080759.159
67	2	164+0	esquerdo	721706.302	7080773.701
68	2	163+0	esquerdo	721693.854	7080789.107
69	2	162+0	esquerdo	721682.459	7080805.307
70	2	161+0	esquerdo	721672.169	7080822.231
71	2	330+0	direito	723398.129	7078349.234
72	2	332+0	direito	723422.508	7078317.550
73	2	334+0	direito	723446.579	7078285.630
74	2	336+0	direito	723470.859	7078253.841
75	2	338+0	direito	723494.911	7078221.864
76	2	340+0	direito	723519.098	7078190.022
77	2	342+0	direito	723543.295	7078158.148
78	2	344+0	direito	723567.653	7078126.370
79	2	346+0	direito	723594.105	7078095.985
80	2	348+0	direito	723625.242	7078070.259
81	2	350+0	direito	723658.550	7078048.085
82	2	352+0	direito	723689.978	7078024.149
83	2	354+10	direito	723718.889	7077984.759
84	2	356+0	direito	723728.817	7077957.153
85	2	358+0	direito	723732.710	7077918.175
86	2	359+0	esquerdo	723736.393	7077897.722
87	2	357+0	esquerdo	723737.547	7077938.322
88	2	355+0	esquerdo	723727.820	7077977.810
89	2	353+0	esquerdo	723707.491	7078013.020

Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
90	2	351+0	esquerdo	723678.289	7078041.179
91	2	349+0	esquerdo	723645.116	7078063.956
92	2	347+0	esquerdo	723612.694	7078086.851
93	2	345+0	esquerdo	723584.525	7078114.396
94	2	343+0	esquerdo	723559.910	7078145.650
95	2	341+0	esquerdo	723535.691	7078177.501
96	2	339+0	esquerdo	723511.601	7078209.412
97	2	337+0	esquerdo	723487.328	7078241.217
98	2	335+0	esquerdo	723463.238	7078273.146
99	2	333+0	esquerdo	723439.068	7078305.024
100	2	331+0	esquerdo	723414.887	7078336.885
101	2	376+0	direito	723641.345	7077571.379
102	2	377+0	direito	723634.464	7077552.600
103	2	378+0	direito	723627.583	7077533.821
104	2	379+0	direito	723620.701	7077515.042
105	2	380+5	direito	723612.100	7077491.568
106	2	381+0	direito	723606.939	7077477.484
107	2	382+0	direito	723600.057	7077458.705
108	2	383+0	direito	723593.176	7077439.926
109	2	384+0	direito	723586.295	7077421.147
110	2	385+0	direito	723579.413	7077402.369

Fonte: Nery (2021).

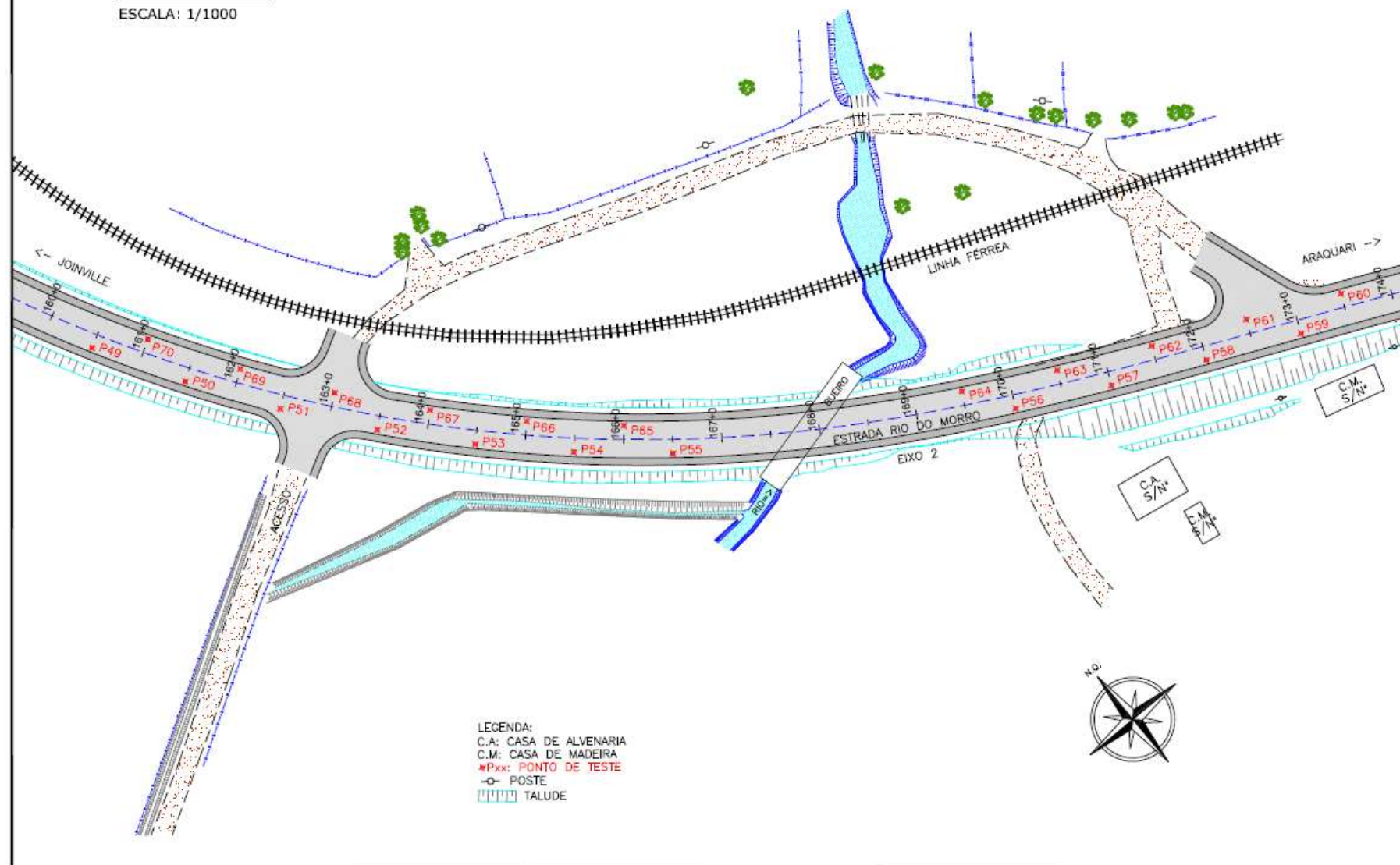






SEGMENTO 04

ESCALA: 1/1000

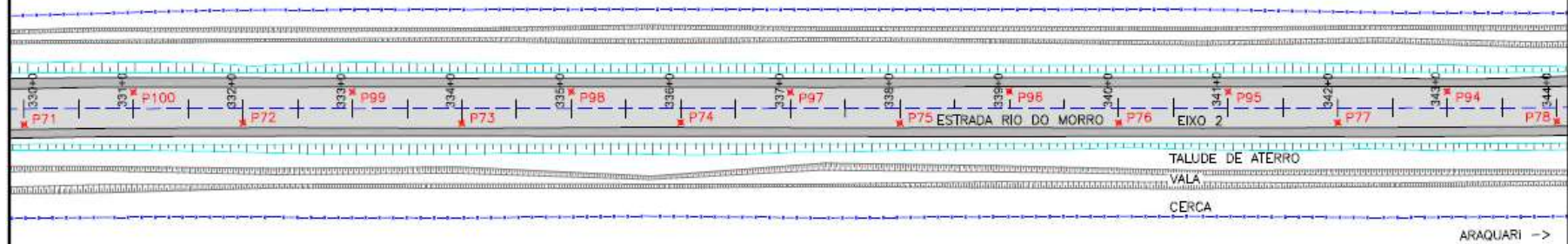


SEGMENTO 05

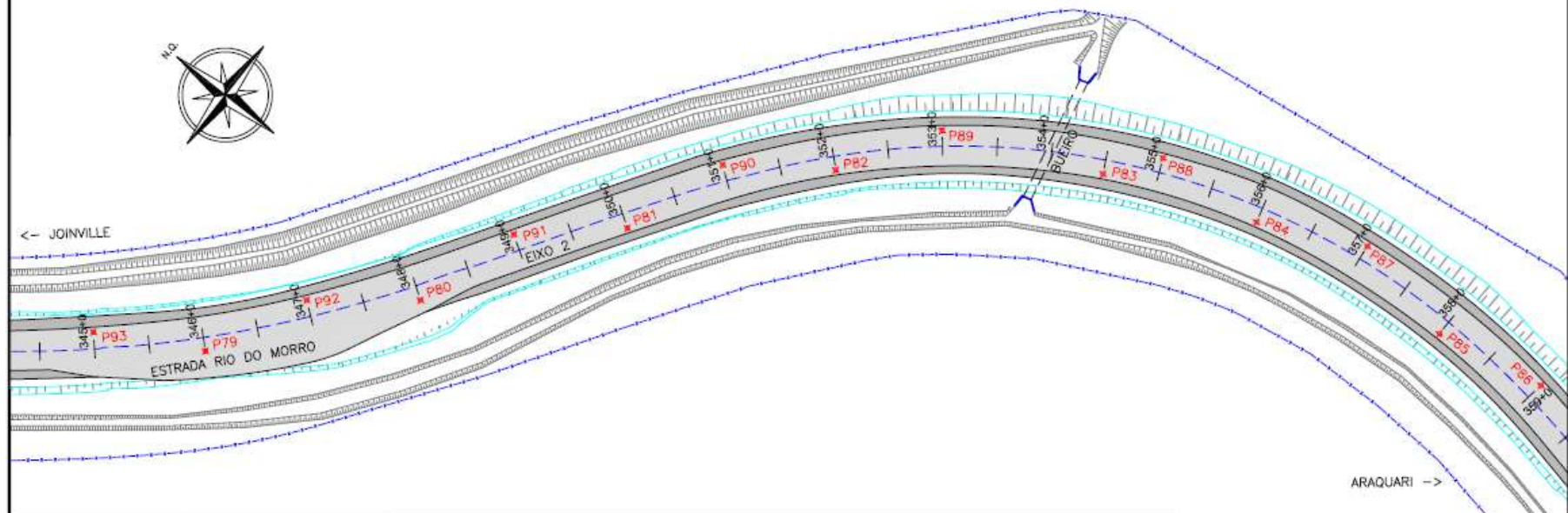
ESCALA: 1/1000

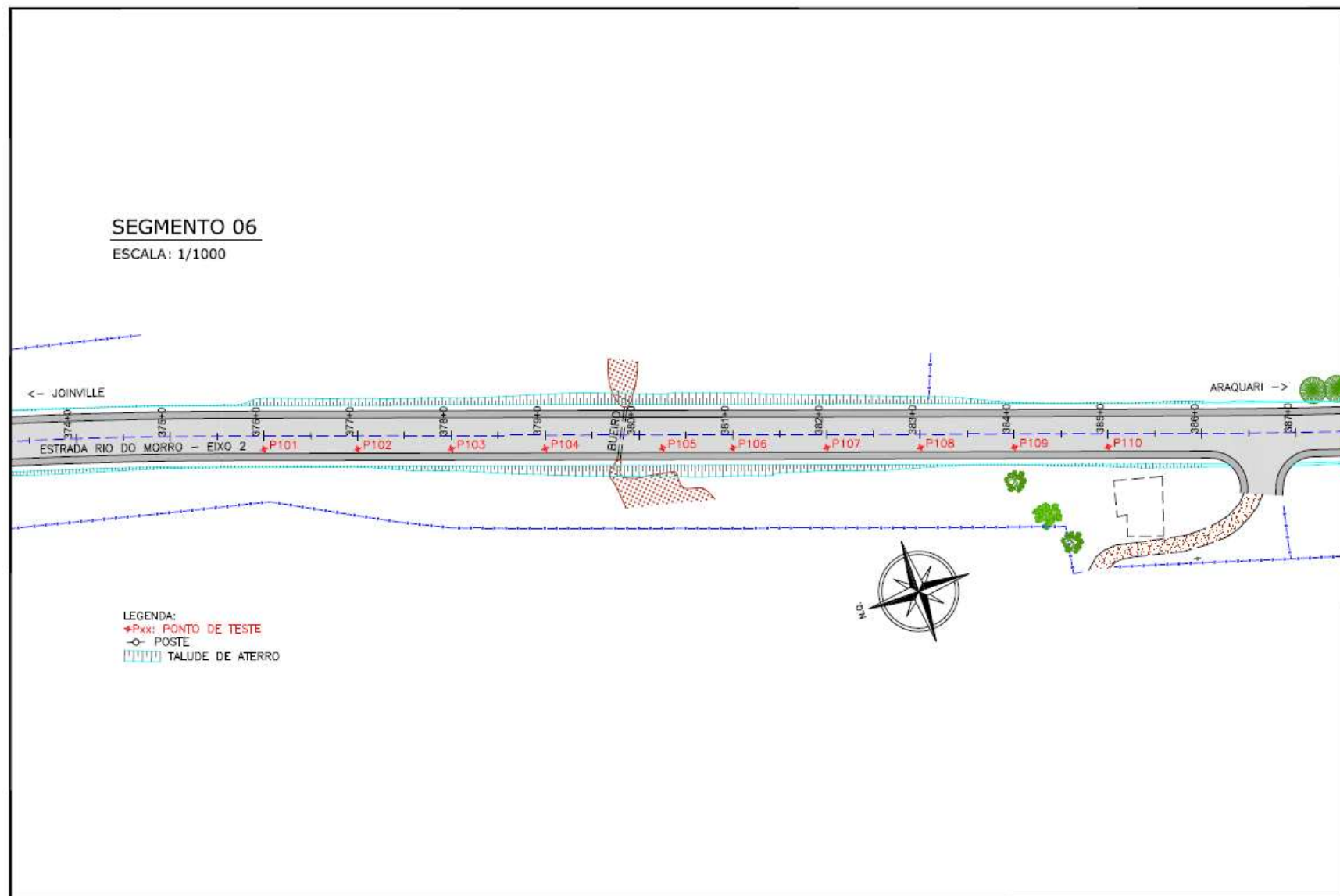


<- JOINVILLE



<- JOINVILLE





Fonte: Nery (2021).

ANEXO B – DADOS DO ENSAIO COM O FWD

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1 x 10-2 mm)							Temperatura		Data:
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
TRECHO 01											
01	4160	45,8	34,3	28,0	20,8	16,5	11,5	8,5	21	22	13:08
02	4138	26,5	19,6	15,9	11,7	9,7	7,4	6,0	21	22	13:11
03	4023	26,8	19,9	15,8	11,4	9,0	6,2	4,8	21	22	13:12
04	4060	39,5	29,1	22,7	15,9	12,1	8,3	6,2	21	22	13:13
05	4038	42,2	29,2	21,5	14,6	10,9	7,6	6,0	21	22	13:14
06	4186	41,9	31,2	24,7	17,5	13,2	8,8	6,5	21	22	13:15
07	4060	28,1	20,4	15,4	10,0	7,2	4,5	3,5	21	22	13:16
08	4051	38,1	28,3	22,5	15,3	11,3	7,1	5,3	21	22	13:17
09	4124	28,0	21,1	16,9	12,0	9,3	6,1	4,7	21	22	13:17
10	4065	31,1	23,3	18,1	12,7	10,2	7,1	5,6	21	22	13:18
11	4144	32,0	22,8	17,0	11,3	8,5	5,3	4,1	21	22	13:20
12	4164	28,2	20,3	16,0	11,5	9,3	6,8	5,6	21	22	13:27
13	4128	33,9	25,5	20,1	14,3	11,3	7,4	5,7	21	22	13:27
14	4149	40,3	28,3	21,0	13,9	10,2	6,2	4,9	21	22	13:28
15	4202	40,9	29,7	22,7	15,0	10,8	6,3	4,6	21	22	13:29
16	4117	34,8	25,1	19,3	12,7	9,6	6,2	5,1	21	22	13:30
17	4172	42,2	31,9	25,7	18,0	13,9	8,9	6,8	21	22	13:31
18	4113	40,6	29,9	23,8	17,7	14,3	10,1	8,1	21	22	13:32
19	4107	30,2	22,3	17,8	12,7	10,2	7,4	6,2	21	23	13:33
20	4035	38,2	28,3	22,6	15,7	12,7	9,0	7,2	21	23	13:33
21	4055	42,2	32,6	27,3	20,6	17,5	12,2	9,6	21	22	13:34
TRECHO 02											
22	4125	31,0	22,0	16,1	10,6	7,7	4,5	3,3	22	23	13:51
23	4218	31,3	22,4	17,1	12,1	9,4	6,1	4,7	22	23	13:53
24	4166	31,6	22,8	17,4	12,4	9,6	6,1	4,7	22	23	13:54
25	4175	31,2	23,0	17,9	12,6	9,9	6,4	5,0	22	23	13:56
26	4123	37,7	27,1	20,0	13,3	10,1	6,4	4,9	22	23	13:56
27	4176	37,7	27,4	20,7	14,2	10,6	6,7	5,2	23	24	14:06
28	4154	37,0	28,0	22,1	15,6	12,0	7,6	5,8	23	24	14:07
29	4132	35,7	26,4	20,3	14,0	10,7	6,9	5,1	23	24	14:08
30	4162	35,4	26,2	19,6	13,1	9,8	6,5	4,9	23	24	14:09
31	4034	32,4	23,1	17,4	11,3	8,3	5,2	4,0	22	24	14:10
32	4209	32,5	23,4	18,0	12,7	9,8	6,5	4,9	23	24	14:20
33	4117	30,4	21,5	16,1	11,3	9,0	6,1	4,8	21	24	14:21
34	4049	30,0	22,0	17,0	12,1	9,3	6,0	4,5	23	24	14:21
35	4169	20,6	15,0	12,0	9,8	9,0	6,5	4,8	19	24	14:22
36	4221	35,5	25,7	19,4	13,2	9,8	5,8	4,1	23	25	14:25
37	4076	32,2	22,7	16,8	11,5	8,7	5,5	4,1	23	25	14:26
38	4221	35,9	26,0	19,9	13,6	10,2	6,4	4,9	23	24	14:27

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1 x 10-2 mm)							Temperatura		Data:
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
39	4194	32,8	23,0	17,7	12,4	9,5	6,2	4,7	23	25	14:28
40	4169	31,6	22,6	17,4	12,2	9,6	6,2	4,8	23	25	14:29
TRECHO 03											
41	4130	56,3	38,4	26,5	16,8	12,5	8,2	6,2	22	27	14:57
42	4076	63,7	43,4	31,7	20,9	15,5	9,9	7,2	22	27	14:58
43	4168	61,4	40,2	28,2	18,2	13,4	9,0	6,6	23	27	15:02
44	4057	50,1	33,4	22,6	13,8	10,1	6,8	5,2	22	27	15:03
45	4135	68,7	45,3	30,6	17,5	11,1	6,5	5,1	23	27	15:07
46	4152	70,1	46,4	33,9	22,0	16,3	10,7	8,2	24	27	15:08
47	4084	59,8	44,0	33,3	22,8	17,4	11,5	8,5	25	27	15:12
48	4171	54,7	39,3	29,3	19,1	13,8	8,5	6,1	25	27	15:13
TRECHO 04											
49	4062	41,2	29,3	21,8	14,9	11,3	7,2	5,6	23	27	15:29
50	4104	51,2	33,9	24,5	15,8	11,6	7,3	5,6	22	27	15:30
51	4063	45,0	29,2	20,6	13,4	10,0	6,5	5,0	23	27	15:31
52	4026	47,3	32,3	24,2	15,7	11,9	7,7	6,1	22	27	15:32
53	4125	44,3	29,5	21,4	14,1	10,5	6,6	5,2	22	27	15:33
54	4044	48,4	32,0	23,4	15,6	11,3	7,2	5,4	23	27	15:33
55	4138	49,0	32,3	23,5	15,7	11,6	7,4	5,7	23	27	15:34
56	4128	37,3	25,0	18,4	11,9	8,5	5,4	4,0	23	26	15:40
57	4128	49,0	34,7	25,9	17,7	13,4	9,1	6,9	23	26	15:41
58	4200	50,1	35,1	26,9	18,5	14,2	9,7	7,3	23	26	15:42
59	4178	49,5	33,1	24,1	15,9	12,0	7,9	6,2	23	26	15:43
60	4198	42,4	30,7	23,6	16,1	11,8	7,3	5,5	20	26	15:47
61	4157	48,5	33,5	24,5	16,5	12,6	8,5	6,6	23	26	15:48
62	4037	47,6	33,7	24,7	16,5	12,7	8,7	6,7	23	26	15:49
63	4216	46,4	31,5	21,8	13,6	9,7	6,0	4,5	23	26	15:49
64	4045	42,3	29,2	21,3	14,2	10,5	6,8	5,0	23	26	15:50
65	4197	47,4	34,2	25,6	17,1	12,5	8,0	6,0	23	27	15:54
66	4109	48,6	33,8	24,8	16,6	12,1	7,7	5,8	23	27	15:57
67	4055	51,3	37,2	27,8	19,4	14,8	9,8	7,7	23	27	15:57
68	4202	35,1	25,4	19,2	12,6	9,0	5,5	4,2	23	27	15:58
69	4039	52,7	35,9	26,0	16,7	12,1	7,7	5,7	23	26	15:59
70	4068	39,2	27,2	20,0	13,5	10,0	6,6	5,0	23	25	16:00
TRECHO 05											
71	4122	39,5	27,5	20,4	13,5	9,7	5,8	4,3	22	26	16:18
72	4192	34,1	23,5	17,1	10,8	7,4	4,3	3,0	22	26	16:19
73	4181	30,2	21,6	16,4	10,8	7,7	4,2	2,8	19	26	16:20
74	4104	31,4	21,9	16,2	10,7	7,6	4,4	3,1	22	26	16:21
75	4212	28,8	20,3	15,2	10,4	7,8	4,9	3,6	22	26	16:22
76	4074	29,3	20,3	14,8	9,6	7,1	4,2	3,0	18	26	16:22

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1 x 10-2 mm)							Temperatura		Data:
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
77	4081	33,6	23,6	17,7	11,9	8,9	5,8	4,3	22	26	16:23
78	4176	33,4	22,9	16,8	10,9	7,9	4,6	3,3	22	26	16:24
79	4092	34,2	24,1	17,8	11,8	8,3	4,9	3,6	22	26	16:25
80	4114	34,4	24,0	17,6	11,7	8,5	5,2	4,0	22	26	16:26
81	4133	35,7	24,9	18,1	11,8	8,6	5,3	3,9	19	26	16:26
82	4101	35,1	25,1	18,5	12,0	8,5	5,0	3,5	22	26	16:27
83	4066	34,2	24,1	18,1	12,3	9,3	5,9	4,5	22	26	16:28
84	4197	35,4	25,0	18,5	12,4	9,4	6,0	4,6	22	26	16:30
85	4174	35,1	24,9	18,6	12,6	9,4	5,8	4,3	22	26	16:32
86	4079	30,1	21,5	16,3	11,4	8,6	5,4	4,0	23	26	16:37
87	4069	31,6	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,9	23	26	16:38
88	4217	32,0	22,2	16,5	11,4	9,0	6,1	4,7	23	26	16:39
89	4168	34,1	24,7	18,9	13,2	10,4	6,7	5,0	23	26	16:40
90	4173	31,8	23,0	17,4	11,7	8,6	5,1	3,7	23	26	16:41
91	4103	30,8	21,2	15,6	9,9	7,0	3,8	2,6	23	26	16:42
92	4175	27,8	19,1	13,4	8,1	5,2	2,9	2,2	23	26	16:43
93	4074	28,2	19,0	13,6	8,2	5,7	3,5	2,7	23	26	16:44
94	4220	29,7	21,5	16,1	10,9	8,1	4,9	3,7	23	26	16:44
95	4106	30,0	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,6	22	26	16:45
96	4180	29,4	21,3	16,2	11,0	8,3	5,2	3,9	22	26	16:46
97	4048	28,7	20,2	15,3	10,3	7,7	4,8	3,5	22	26	16:47
98	4093	30,2	21,1	15,4	10,4	8,0	5,2	3,8	22	25	16:47
99	4112	32,6	23,1	17,5	11,5	8,4	5,2	3,9	22	26	16:49
100	4161	31,6	22,3	16,9	11,3	8,5	5,2	3,9	22	26	16:49

TRECHO 06

101	4180	45,8	32,5	23,7	15,7	11,5	7,2	5,4	22	25	17:02
102	4071	38,9	27,1	19,3	12,0	8,4	5,1	3,9	22	25	17:03
103	4135	41,3	27,9	19,8	12,6	8,8	5,4	4,0	22	25	17:04
104	4151	34,1	24,1	17,9	11,9	8,7	5,4	4,2	22	25	17:04
105	4174	39,4	27,0	19,5	12,3	8,8	5,5	4,3	21	25	17:05
106	4066	36,4	24,7	17,9	11,5	8,5	5,5	4,4	21	25	17:06
107	4064	38,1	26,9	19,9	13,1	9,5	5,9	4,5	21	25	17:07
108	4050	30,7	21,0	14,7	9,2	6,6	4,3	3,5	21	25	17:08
109	4122	40,9	27,3	19,9	13,1	9,6	6,0	4,6	21	25	17:09
110	4064	48,8	35,7	26,4	16,9	12,5	8,1	6,2	21	25	17:10

Fonte: Nery (2021).

ANEXO C – LEITURA DAS DEFLEXÕES CORRIGIDAS PARA A TEMPERATURA DE 25°C

Segmento 1			Segmento 2			Segmento 3		
Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)	
	FWD	VB		FWD	VB		FWD	VB
01	45,8	43,9	22	31,1	30,4	41	55,3	39,3
02	26,7	78,3	23	30,7	40,9	42	63,4	37,4
03	27,7	24,8	24	31,4	40,9	43	59,8	37,7
04	40,5	36,2	25	30,9	33,0	44	50,1	27,8
05	43,5	38,0	26	37,9	43,3	45	67,4	50,9
06	41,7	38,2	27	37,2	42,0	46	68,5	56,4
07	28,8	30,7	28	36,7	54,3	47	59,4	49,3
08	39,1	40,7	29	35,6	36,4	48	53,2	47,1
09	28,3	28,9	30	35,0	54,7			
10	31,8	27,1	31	33,1	40,6			
11	32,1	31,2	32	31,8	29,2			
12	28,2	51,0	33	30,4	20,8			
13	34,2	50,7	34	30,5	26,9			
14	40,4	48,6	35	20,4	26,9			
15	40,5	48,2	36	34,5	30,9			
16	35,2	28,7	37	32,4	26,8			
17	42,1	55,6	38	35,0	31,0			
18	41,1	61,3	39	32,1	27,0			
19	30,5	40,2	40	31,1	25,0			
20	39,2	47,8						
21	43,3	24,9						
X	36,2	39,8	X	33,2	34,8	X	59,7	43,2
σ	6,2	10,8	σ	2,5	9,5	σ	6,6	9,3
DC	42,4	50,6	DC	35,7	44,3	DC	66,3	52,5
D _{min}	26,7	24,8	D _{min}	30,4	20,8	D _{min}	50,1	27,8
D _{max}	45,8	61,3	D _{max}	37,9	54,7	D _{max}	68,5	56,4
CV%	17	27	CV%	8	27	CV%	11	22
N	21	20	N	18	19	N	8	8

Segmento 4			Segmento 5			Segmento 6		
Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)		Ponto	Deflexão (1 x 10-2 mm)	
	FWD	VB		FWD	VB		FWD	VB
49	41,2	19,8	71	39,1	32,1	101	44,9	32,0
50	50,6	35,5	72	33,2	20,1	102	39,2	34,2
51	45,0	27,6	73	29,5	26,1	103	41,0	30,5
52	47,7	31,4	74	31,2	22,0	104	33,7	28,4
53	43,6	25,5	75	27,9	21,9	105	38,7	30,5
54	48,6	27,5	76	29,3	18,1	106	36,7	28,4
55	48,1	31,4	77	33,6	22,1	107	38,4	32,6
56	36,9	23,7	78	32,6	20,1	108	31,1	24,3
57	48,4	27,5	79	34,1	30,1	109	40,7	30,2
58	48,7	37,4	80	34,1	22,2	110	49,2	34,2
59	48,3	29,4	81	35,2	24,3			
60	41,2	33,8	82	34,9	30,2			
61	47,6	27,8	83	34,3	26,1			
62	48,1	37,8	84	34,4	26,1			
63	44,9	37,7	85	34,3	26,1			
64	42,7	27,8	86	30,1	24,1			
65	45,8	39,4	87	31,7	20,2			
66	48,0	31,5	88	31,0	20,2			
67	51,4	55,2	89	33,4	26,2			
68	33,9	21,7	90	31,1	22,1			
69	53,2	37,4	91	30,6	24,3			
70	39,5	19,7	92	27,2	22,2			
			93	28,2	20,3			
			94	28,7	22,2			
			95	29,8	24,0			
			96	28,7	20,2			
			97	28,9	20,2			
			98	30,3	22,2			
			99	32,3	26,1			
			100	31,0	24,2			
X	45,6	30,1	X	31,7	23,5	X	39,4	30,5
σ	4,8	6,1	σ	2,7	3,4	σ	5,2	3
DC	50,4	36,2	DC	34,4	26,9	DC	44,6	33,5
D _{min}	33,9	19,7	D _{min}	27,2	18,1	D _{min}	31,1	24,3
D _{max}	53,2	39,4	D _{max}	39,1	32,1	D _{max}	49,2	34,2
CV%	11	20	CV%	9	14	CV%	13	10
N	22	21	N	30	30	N	10	10

Fonte: Nery (2021).

ANEXO D – MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES RETROANALISADOS A PARTIR DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM O FWD

Pontos	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (μm)	
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti- mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito		
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm						
SEGMENTO 01														
01	campo	45,8	34,3	28,0	20,8	16,5	11,5	8,5	10251	793	527	130	5,75	
	retro	45,8	34,4	27,9	21,2	16,5	10,6	7,4						
02	campo	26,5	19,6	15,9	11,7	9,7	7,4	6,0	15243	1450	966	218	7,937	
	retro	26,4	19,8	16,1	12,4	9,7	6,3	4,4						
03	campo	26,8	19,9	15,8	11,4	9,0	6,2	4,8	15989	1198	798	229	4,139	
	retro	27,1	19,9	15,9	11,9	9,1	5,7	4,0						
04	campo	39,5	29,1	22,7	15,9	12,1	8,3	6,2	10820	749	524	169	4,899	
	retro	39,7	28,7	22,5	16,5	12,5	7,8	5,4						
05	campo	42,2	29,2	21,5	14,6	10,9	7,6	6,0	7452	639	446	187	6,583	
	retro	42,2	28,9	21,8	15,3	11,3	6,8	4,8						
06	campo	41,9	31,2	24,7	17,5	13,2	8,8	6,5	10820	811	475	160	4,097	
	retro	42,1	30,9	24,4	18,0	13,6	8,5	5,9						
07	campo	28,1	20,4	15,4	10,0	7,2	4,5	3,5	12460	933	620	279	4,534	
	retro	28,7	19,8	14,9	10,4	7,6	4,6	3,2						
08	campo	38,1	28,3	22,5	15,3	11,3	7,1	5,3	10820	811	466	181	4,690	
	retro	38,7	27,9	21,8	15,7	11,8	7,2	5,0						
09	campo	28,0	21,1	16,9	12,0	9,3	6,1	4,7	15077	1129	750	228	4,042	
	retro	28,7	21,0	16,6	12,3	9,4	5,9	4,1						
10	campo	31,1	23,3	18,1	12,7	10,2	7,1	5,6	13885	1025	692	204	5,898	
	retro	31,2	22,9	18,2	13,5	10,3	6,5	4,5						
11	campo	32,0	22,8	17,0	11,3	8,5	5,3	4,1	11327	848	556	254	3,569	
	retro	32,4	22,3	16,8	11,7	8,6	5,2	3,6						
12	campo	28,2	20,3	16,0	11,5	9,3	6,8	5,6	13808	1198	798	233	7,399	
	retro	28,2	20,5	16,3	12,1	9,3	5,8	4,0						
13	campo	33,9	25,5	20,1	14,3	11,3	7,4	5,7	12623	946	629	191	4,484	
	retro	34,3	25,1	19,9	14,7	11,2	7,0	4,9						
14	campo	40,3	28,3	21,0	13,9	10,2	6,2	4,9	8942	670	419	211	3,743	
	retro	40,6	27,8	20,8	14,3	10,4	6,2	4,3						
15	campo	40,9	29,7	22,7	15,0	10,8	6,3	4,6	10820	798	329	203	3,268	
	retro	41,2	29,3	22,4	15,5	11,1	6,5	4,5						
16	campo	34,8	25,1	19,3	12,7	9,6	6,2	5,1	10432	782	520	222	5,874	
	retro	35,5	24,7	18,8	13,2	9,7	5,9	4,1						
17	campo	42,2	31,9	25,7	18,0	13,9	8,9	6,8	10820	811	491	152	4,863	
	retro	42,7	31,5	25,1	18,6	14,2	8,9	6,2						

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 01													
18	campo	40,6	29,9	23,8	17,7	14,3	10,1	8,1	9794	860	629	147	7,692
	retro	40,5	30,0	24,2	18,4	14,4	9,2	6,4					
19	campo	30,2	22,3	17,8	12,7	10,2	7,4	6,2	15077	1129	750	203	7,516
	retro	30,2	22,4	18,0	13,5	10,4	6,6	4,6					
20	campo	38,2	28,3	22,6	15,7	12,7	9,0	7,2	11361	838	594	160	7,760
	retro	38,2	28,2	22,5	16,8	13,0	8,2	5,7					
21	campo	42,2	32,6	27,3	20,6	17,5	12,2	9,6	10940	1025	692	116	7,041
	retro	42,0	32,7	27,4	21,8	17,5	11,7	8,3					
SEGMENTO 02													
22	campo	31,0	22,0	16,1	10,6	7,7	4,5	3,3	11327	848	513	280	3,180
	retro	31,5	21,4	15,9	10,8	7,8	4,6	3,2					
23	campo	31,3	22,4	17,1	12,1	9,4	6,1	4,7	12668	964	682	233	3,251
	retro	31,3	22,2	17,3	12,5	9,4	5,8	4,0					
24	campo	31,6	22,8	17,4	12,4	9,6	6,1	4,7	12460	933	620	233	3,531
	retro	31,9	22,6	17,4	12,5	9,4	5,7	4,0					
25	campo	31,2	23,0	17,9	12,6	9,9	6,4	5,0	13706	1026	682	218	3,609
	retro	31,3	22,7	17,9	13,1	10,0	6,2	4,3					
26	campo	37,7	27,1	20,0	13,3	10,1	6,4	4,9	9836	726	476	210	4,772
	retro	38,1	26,4	20,0	14,0	10,3	6,2	4,3					
27	campo	37,7	27,4	20,7	14,2	10,6	6,7	5,2	10820	811	458	204	3,940
	retro	38,0	26,9	20,7	14,7	10,8	6,5	4,5					
28	campo	37,0	28,0	22,1	15,6	12,0	7,6	5,8	11902	892	540	178	4,149
	retro	37,5	27,5	21,8	16,0	12,2	7,6	5,2					
29	campo	35,7	26,4	20,3	14,0	10,7	6,9	5,1	11475	860	546	197	3,919
	retro	36,0	25,8	20,1	14,6	11,0	6,7	4,7					
30	campo	35,4	26,2	19,6	13,1	9,8	6,5	4,9	10432	782	520	216	6,181
	retro	36,4	25,4	19,4	13,7	10,1	6,1	4,3					
31	campo	32,4	23,1	17,4	11,3	8,3	5,2	4,0	10432	782	520	250	4,534
	retro	33,1	22,6	16,9	11,7	8,5	5,1	3,5					
32	campo	32,5	23,4	18,0	12,7	9,8	6,5	4,9	12460	933	620	225	3,706
	retro	32,7	23,3	18,1	13,0	9,8	6,0	4,2					
33	campo	30,4	21,5	16,1	11,3	9,0	6,1	4,8	12460	933	620	249	5,875
	retro	30,6	21,4	16,4	11,7	8,7	5,3	3,7					
34	campo	30,0	22,0	17,0	12,1	9,3	6,0	4,5	13706	995	672	225	2,582
	retro	30,2	21,7	17,0	12,4	9,4	5,8	4,0					
35	campo	20,6	15,0	12,0	9,8	9,0	6,5	4,8	23690	2020	1343	262	8,480
	retro	20,4	15,7	13,0	10,1	8,1	5,3	3,7					
36	campo	35,5	25,7	19,4	13,2	9,8	5,8	4,1	11475	860	459	226	2,573
	retro	35,9	25,3	19,3	13,5	9,9	5,9	4,1					
37	campo	32,2	22,7	16,8	11,5	8,7	5,5	4,1	11475	821	572	245	2,760
	retro	32,3	22,3	16,9	11,8	8,7	5,3	3,7					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 02													
38	campo	35,9	26,0	19,9	13,6	10,2	6,4	4,9	11475	860	511	212	3,315
	retro	36,0	25,6	19,8	14,1	10,4	6,3	4,4					
39	campo	32,8	23,0	17,7	12,4	9,5	6,2	4,7	10572	933	620	229	3,078
	retro	32,8	23,0	17,8	12,8	9,6	5,9	4,1					
40	campo	31,6	22,6	17,4	12,2	9,6	6,2	4,8	12460	933	620	233	4,065
	retro	31,9	22,6	17,5	12,5	9,4	5,7	4,0					
SEGMENTO 03													
41	campo	56,3	38,4	26,5	16,8	12,5	8,2	6,2	7060	359	325	169	7,378
	retro	56,6	37,4	27,0	17,9	12,7	7,6	5,3					
42	campo	63,7	43,4	31,7	20,9	15,5	9,9	7,2	5574	374	274	138	4,876
	retro	64,0	43,0	31,7	21,5	15,5	9,2	6,4					
43	campo	61,4	40,2	28,2	18,2	13,4	9,0	6,6	6418	312	320	161	6,126
	retro	61,4	40,1	28,7	18,9	13,5	8,0	5,6					
44	campo	50,1	33,4	22,6	13,8	10,1	6,8	5,2	6667	385	348	204	7,217
	retro	50,5	32,3	22,8	14,7	10,4	6,1	4,3					
45	campo	68,7	45,3	30,6	17,5	11,1	6,5	5,1	6897	259	170	192	4,657
	retro	69,0	44,6	30,6	18,0	11,5	6,3	4,5					
46	campo	70,1	46,4	33,9	22,0	16,3	10,7	8,2	4646	329	274	131	6,792
	retro	70,1	46,2	33,7	22,8	16,5	9,9	6,9					
47	campo	59,8	44,0	33,3	22,8	17,4	11,5	8,5	6503	487	315	121	7,741
	retro	60,4	42,8	33,1	23,7	17,7	10,8	7,5					
48	campo	54,7	39,3	29,3	19,1	13,8	8,5	6,1	7766	555	240	160	4,860
	retro	55,0	38,5	29,1	19,8	14,0	8,1	5,6					
SEGMENTO 04													
49	campo	41,2	29,3	21,8	14,9	11,3	7,2	5,6	8942	660	446	187	4,428
	retro	41,4	28,8	21,9	15,4	11,4	6,9	4,8					
50	campo	51,2	33,9	24,5	15,8	11,6	7,3	5,6	6118	432	375	180	3,944
	retro	51,4	33,6	24,4	16,4	11,9	7,1	5,0					
51	campo	45,0	29,2	20,6	13,4	10,0	6,5	5,0	5178	501	446	207	4,475
	retro	45,3	28,8	20,7	14,0	10,2	6,1	4,3					
52	campo	47,3	32,3	24,2	15,7	11,9	7,7	6,1	7488	508	373	179	5,931
	retro	47,4	32,0	23,8	16,3	11,8	7,0	4,9					
53	campo	44,3	29,5	21,4	14,1	10,5	6,6	5,2	6988	567	405	204	4,053
	retro	44,2	29,4	21,6	14,7	10,6	6,3	4,4					
54	campo	48,4	32,0	23,4	15,6	11,3	7,2	5,4	7131	454	373	188	3,406
	retro	48,4	32,0	23,3	15,6	11,2	6,7	4,7					
55	campo	49,0	32,3	23,5	15,7	11,6	7,4	5,7	5705	508	373	188	4,224
	retro	49,1	32,2	23,5	16,0	11,5	6,9	4,8					
56	campo	37,3	25,0	18,4	11,9	8,5	5,4	4,0	8445	699	426	250	2,638
	retro	37,4	24,9	18,2	12,3	8,7	5,1	3,6					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 04													
57	campo	49,0	34,7	25,9	17,7	13,4	9,1	6,9	7648	573	387	158	6,445
	retro	49,1	34,2	26,2	18,5	13,7	8,3	5,8					
58	campo	50,1	35,1	26,9	18,5	14,2	9,7	7,3	7766	582	387	153	6,889
	retro	50,3	35,4	27,1	19,3	14,4	8,7	6,1					
59	campo	49,5	33,1	24,1	15,9	12,0	7,9	6,2	5348	561	373	179	6,128
	retro	49,4	32,8	24,4	16,8	12,2	7,3	5,1					
60	campo	42,4	30,7	23,6	16,1	11,8	7,3	5,5	9836	737	387	184	3,316
	retro	42,7	30,3	23,3	16,5	12,1	7,2	5,0					
61	campo	48,5	33,5	24,5	16,5	12,6	8,5	6,6	7488	561	373	170	7,433
	retro	48,6	33,4	25,2	17,5	12,8	7,7	5,4					
62	campo	47,6	33,7	24,7	16,5	12,7	8,7	6,7	7766	547	387	163	7,677
	retro	47,8	33,1	25,0	17,6	12,9	7,8	5,4					
63	campo	46,4	31,5	21,8	13,6	9,7	6,0	4,5	8942	441	351	224	4,428
	retro	46,8	30,8	22,0	14,2	9,9	5,7	4,0					
64	campo	42,3	29,2	21,3	14,2	10,5	6,8	5,0	8129	609	377	204	4,160
	retro	42,5	28,8	21,4	14,6	10,5	6,2	4,3					
65	campo	47,4	34,2	25,6	17,1	12,5	8,0	6,0	8237	617	348	173	5,302
	retro	47,8	33,4	25,3	17,6	12,8	7,6	5,3					
66	campo	48,6	33,8	24,8	16,6	12,1	7,7	5,8	7488	561	320	179	4,405
	retro	48,7	33,3	24,9	17,0	12,2	7,2	5,0					
67	campo	51,3	37,2	27,8	19,4	14,8	9,8	7,7	7766	538	387	140	6,880
	retro	51,5	36,4	28,1	20,2	15,1	9,3	6,4					
68	campo	35,1	25,4	19,2	12,6	9,0	5,5	4,2	11475	860	431	238	3,911
	retro	35,4	24,8	18,8	13,0	9,4	5,5	3,8					
69	campo	52,7	35,9	26,0	16,7	12,1	7,7	5,7	7060	425	315	172	4,299
	retro	52,9	35,4	25,9	17,3	12,3	7,3	5,1					
70	campo	39,2	27,2	20,0	13,5	10,0	6,6	5,0	8942	670	446	211	4,234
	retro	39,2	26,8	20,1	13,9	10,1	6,1	4,2					
SEGMENTO 05													
71	campo	39,5	27,5	20,4	13,5	9,7	5,8	4,3	8942	670	439	218	3,012
	retro	39,8	27,0	20,1	13,7	9,9	5,9	4,1					
72	campo	34,1	23,5	17,1	10,8	7,4	4,3	3,0	12460	757	386	298	2,004
	retro	34,3	23,1	16,8	10,9	7,5	4,3	3,0					
73	campo	30,2	21,6	16,4	10,8	7,7	4,2	2,8	13706	1026	424	294	2,482
	retro	30,4	21,3	16,0	10,9	7,7	4,4	3,1					
74	campo	31,4	21,9	16,2	10,7	7,6	4,4	3,1	11327	848	470	284	2,039
	retro	31,7	21,6	16,0	10,8	7,7	4,5	3,1					
75	campo	28,8	20,3	15,2	10,4	7,8	4,9	3,6	13214	960	659	281	1,988
	retro	28,9	20,0	15,2	10,7	7,9	4,7	3,3					
76	campo	29,3	20,3	14,8	9,6	7,1	4,2	3,0	12460	905	489	308	1,922
	retro	29,4	20,0	14,8	9,9	7,0	4,1	2,9					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 05													
77	campo	33,6	23,6	17,7	11,9	8,9	5,8	4,3	10432	782	520	242	3,691
	retro	34,0	23,3	17,5	12,1	8,9	5,3	3,7					
78	campo	33,4	22,9	16,8	10,9	7,9	4,6	3,3	11327	797	445	280	1,517
	retro	33,5	22,7	16,8	11,2	7,9	4,6	3,2					
79	campo	34,2	24,1	17,8	11,8	8,3	4,9	3,6	10432	782	441	254	2,815
	retro	34,6	23,6	17,6	11,9	8,5	5,0	3,5					
80	campo	34,4	24,0	17,6	11,7	8,5	5,2	4,0	10432	770	473	250	2,778
	retro	34,6	23,6	17,6	12,1	8,7	5,1	3,6					
81	campo	35,7	24,9	18,1	11,8	8,6	5,3	3,9	10432	758	410	254	3,004
	retro	35,8	24,4	18,1	12,2	8,7	5,0	3,5					
82	campo	35,1	25,1	18,5	12,0	8,5	5,0	3,5	11475	834	355	254	2,859
	retro	35,4	24,6	18,4	12,4	8,7	5,0	3,5					
83	campo	34,2	24,1	18,1	12,3	9,3	5,9	4,5	10432	782	520	230	3,344
	retro	34,6	23,9	18,1	12,6	9,3	5,6	3,9					
84	campo	35,4	25,0	18,5	12,4	9,4	6,0	4,6	10432	782	520	230	3,925
	retro	35,7	24,6	18,6	13,0	9,6	5,8	4,0					
85	campo	35,1	24,9	18,6	12,6	9,4	5,8	4,3	10432	782	520	230	2,826
	retro	35,5	24,5	18,5	13,0	9,5	5,7	4,0					
86	campo	30,1	21,5	16,3	11,4	8,6	5,4	4,0	12460	933	620	249	2,117
	retro	30,3	21,2	16,3	11,6	8,6	5,2	3,6					
87	campo	31,6	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,9	11327	848	564	254	2,162
	retro	31,7	21,8	16,5	11,5	8,4	5,1	3,5					
88	campo	32,0	22,2	16,5	11,4	9,0	6,1	4,7	9817	933	620	249	5,176
	retro	32,0	22,0	16,8	11,9	8,8	5,4	3,7					
89	campo	34,1	24,7	18,9	13,2	10,4	6,7	5,0	11475	860	572	215	4,148
	retro	34,6	24,5	18,9	13,6	10,1	6,2	4,3					
90	campo	31,8	23,0	17,4	11,7	8,6	5,1	3,7	12460	933	498	254	2,660
	retro	32,2	22,6	17,2	12,0	8,7	5,2	3,6					
91	campo	30,8	21,2	15,6	9,9	7,0	3,8	2,6	13706	810	424	313	1,753
	retro	31,0	21,0	15,4	10,1	7,0	4,0	2,8					
92	campo	27,8	19,1	13,4	8,1	5,2	2,9	2,2	15989	731	495	394	3,309
	retro	28,1	18,5	13,2	8,3	5,6	3,2	2,2					
93	campo	28,2	19,0	13,6	8,2	5,7	3,5	2,7	13434	741	536	359	2,816
	retro	28,4	18,7	13,3	8,6	6,0	3,5	2,4					
94	campo	29,7	21,5	16,1	10,9	8,1	4,9	3,7	12460	933	620	270	3,390
	retro	30,3	21,0	15,9	11,2	8,2	4,9	3,4					
95	campo	30,0	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,6	12460	933	573	258	3,408
	retro	30,5	21,3	16,2	11,4	8,4	5,0	3,5					
96	campo	29,4	21,3	16,2	11,0	8,3	5,2	3,9	13706	1026	610	261	2,755
	retro	29,5	20,9	16,1	11,4	8,4	5,1	3,5					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti- mento	Base (BGS)	Sub- base (MS)	Sub- leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 05													
97	campo	28,7	20,2	15,3	10,3	7,7	4,8	3,5	12460	933	611	275	2,048
	retro	28,9	20,0	15,1	10,6	7,7	4,7	3,2					
98	campo	30,2	21,1	15,4	10,4	8,0	5,2	3,8	11327	848	564	280	4,093
	retro	30,6	20,8	15,5	10,6	7,7	4,6	3,2					
99	campo	32,6	23,1	17,5	11,5	8,4	5,2	3,9	11475	860	485	254	2,965
	retro	32,9	22,8	17,2	11,8	8,6	5,1	3,5					
100	campo	31,6	22,3	16,9	11,3	8,5	5,2	3,9	11327	848	564	258	3,020
	retro	32,1	22,1	16,6	11,6	8,5	5,1	3,5					
SEGMENTO 06													
101	campo	45,8	32,5	23,7	15,7	11,5	7,2	5,4	8237	608	348	188	4,724
	retro	46,2	31,8	23,8	16,3	11,8	7,0	4,8					
102	campo	38,9	27,1	19,3	12,0	8,4	5,1	3,9	9836	589	387	243	4,704
	retro	39,2	26,2	19,1	12,6	8,9	5,2	3,6					
103	campo	41,3	27,9	19,8	12,6	8,8	5,4	4,0	9836	510	394	239	2,654
	retro	41,5	27,5	19,8	12,9	9,1	5,3	3,7					
104	campo	34,1	24,1	17,9	11,9	8,7	5,4	4,2	10432	782	505	246	3,527
	retro	34,5	23,6	17,7	12,2	8,9	5,3	3,7					
105	campo	39,4	27,0	19,5	12,3	8,8	5,5	4,3	9538	616	394	243	3,960
	retro	39,7	26,6	19,4	12,9	9,1	5,3	3,7					
106	campo	36,4	24,7	17,9	11,5	8,5	5,5	4,4	8581	711	473	238	4,864
	retro	36,4	24,5	18,1	12,4	9,0	5,3	3,7					
107	campo	38,1	26,9	19,9	13,1	9,5	5,9	4,5	8942	670	446	218	4,161
	retro	38,7	26,3	19,7	13,5	9,8	5,9	4,1					
108	campo	30,7	21,0	14,7	9,2	6,6	4,3	3,5	11138	743	498	312	4,362
	retro	31,0	20,4	14,8	9,7	6,8	4,0	2,8					
109	campo	40,9	27,3	19,9	13,1	9,6	6,0	4,6	8942	548	446	224	2,776
	retro	40,9	27,2	19,9	13,4	9,6	5,7	4,0					
110	campo	48,8	35,7	26,4	16,9	12,5	8,1	6,2	7766	582	305	167	8,060
	retro	49,4	34,4	26,0	17,9	12,9	7,6	5,3					

Fonte: Nery (2021).

ANEXO E – MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES RETROANALISADOS A PARTIR DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 01													
01	campo	23,7	21,6	18,5	13,4	10,3	7,2	4,1	8976	674	381	96	9,526
	retro	25,2	20,3	17,4	13,6	10,8	6,9	4,9					
02	campo	42,2	41,1	37,0	26,8	19,6	16,5	15,4	8047	603	235	44	28,543
	retro	44,8	38,3	34,0	27,9	22,9	15,4	11,0					
03	campo	13,4	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	8329	793	527	265	3,564
	retro	13,2	9,4	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
04	campo	19,6	17,5	13,4	9,3	7,2	5,2	4,1	7868	590	394	140	9,206
	retro	20,9	15,9	13,1	9,7	7,5	4,6	3,3					
05	campo	20,6	13,4	10,3	7,2	4,1	2,1	1,1	3529	403	272	226	5,131
	retro	20,6	13,4	10,0	6,5	4,6	2,7	1,9					
06	campo	20,6	18,5	14,4	10,3	8,2	4,1	3,1	7868	590	358	132	9,284
	retro	22,1	16,9	14,0	10,4	8,0	4,9	3,5					
07	campo	16,5	13,4	9,3	5,2	3,1	2,1	1,1	10964	445	277	276	7,560
	retro	17,2	11,9	8,9	5,7	3,9	2,2	1,6					
08	campo	21,6	19,6	16,5	11,3	10,3	7,2	6,2	10473	785	524	99	9,529
	retro	22,5	18,4	16,0	12,8	10,4	6,8	4,9					
09	campo	15,4	13,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	14593	1093	727	138	3,868
	retro	16,1	13,1	11,4	9,1	7,4	4,9	3,5					
10	campo	14,4	13,4	9,3	8,2	6,2	4,1	3,1	10964	822	546	178	8,490
	retro	15,8	12,1	10,1	7,6	5,9	3,7	2,6					
11	campo	16,5	12,4	10,3	6,2	5,2	3,1	2,1	8237	617	410	207	3,905
	retro	16,8	12,1	9,7	6,9	5,1	3,0	2,2					
12	campo	26,8	21,6	18,5	14,4	12,4	10,3	7,2	8944	714	476	80	9,654
	retro	26,4	21,8	19,1	15,5	12,6	8,4	6,0					
13	campo	26,8	21,6	16,5	14,4	10,3	8,2	5,2	6744	506	337	99	8,831
	retro	27,2	21,1	17,7	13,5	10,6	6,7	4,7					
14	campo	25,7	20,6	15,4	11,3	7,2	4,1	2,1	6131	460	190	140	7,346
	retro	26,5	19,5	15,5	10,7	7,7	4,5	3,1					
15	campo	25,7	20,6	18,5	16,5	14,4	10,3	8,2	10591	1009	670	71	7,598
	retro	25,1	21,5	19,4	16,3	13,8	9,7	7,1					
16	campo	15,4	13,4	12,4	11,3	9,3	5,2	4,1	17657	1322	880	119	7,122
	retro	16,3	13,8	12,2	10,1	8,4	5,7	4,1					
17	campo	29,8	27,8	24,7	22,6	19,6	14,4	10,3	14256	1067	711	48	5,897
	retro	30,9	27,5	25,2	22,0	19,1	14,1	10,6					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 01													
18	campo	32,9	25,7	20,6	17,5	12,4	7,2	4,1	5574	418	233	86	8,173
	retro	33,1	25,5	21,2	15,9	12,2	7,5	5,3					
19	campo	21,6	16,5	12,4	9,3	6,2	4,1	3,1	6503	487	310	158	3,657
	retro	21,8	15,9	12,7	9,0	6,7	4,0	2,8					
20	campo	25,7	19,6	14,4	11,3	7,2	5,2	4,1	5574	405	270	131	6,065
	retro	25,9	18,9	15,1	10,8	8,0	4,8	3,4					
21	campo	13,4	11,3	8,2	7,2	6,2	3,1	2,1	12060	904	601	202	6,136
	retro	14,1	10,8	9,0	6,7	5,2	3,2	2,3					
SEGMENTO 02													
22	campo	15,4	10,3	8,2	6,2	5,2	3,1	2,1	7139	679	451	228	4,215
	retro	15,4	11,0	8,8	6,2	4,6	2,8	2,0					
23	campo	20,6	15,4	13,4	11,3	9,3	7,2	5,2	9077	864	576	112	7,493
	retro	20,2	16,3	14,2	11,3	9,1	6,0	4,3					
24	campo	20,6	15,4	12,4	10,3	8,2	5,2	4,1	7343	649	433	135	4,895
	retro	20,5	15,7	13,1	9,9	7,7	4,8	3,4					
25	campo	16,5	13,4	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	9967	747	496	175	9,773
	retro	16,7	12,7	10,5	7,8	6,0	3,7	2,6					
26	campo	21,6	17,5	12,4	8,2	7,2	5,2	4,1	6503	487	325	150	9,219
	retro	22,1	16,2	13,0	9,3	7,0	4,2	3,0					
27	campo	21,6	17,5	14,4	8,2	7,2	3,1	2,1	6503	487	256	160	9,498
	retro	22,7	16,5	13,1	9,1	6,6	3,9	2,7					
28	campo	27,8	24,7	21,6	16,5	14,4	9,3	7,2	8976	674	449	73	6,315
	retro	28,7	23,8	20,9	17,0	14,0	9,4	6,7					
29	campo	18,5	13,4	10,3	8,2	7,2	5,2	4,1	8346	626	416	167	9,087
	retro	18,5	13,8	11,3	8,3	6,3	3,8	2,7					
30	campo	27,8	22,6	18,5	13,4	8,2	5,2	4,1	5574	418	223	113	9,073
	retro	29,1	21,7	17,6	12,6	9,4	5,6	4,0					
31	campo	20,6	18,5	15,4	11,3	8,2	6,2	4,1	8655	649	433	117	8,435
	retro	22,1	17,4	14,7	11,3	8,9	5,7	4,0					
32	campo	14,4	11,3	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	13266	994	661	175	7,967
	retro	14,6	11,5	9,8	7,5	5,9	3,8	2,7					
33	campo	10,3	9,3	8,2	7,2	5,2	4,1	3,1	22362	1678	1114	190	5,167
	retro	11,2	9,2	8,1	6,5	5,3	3,6	2,5					
34	campo	13,4	12,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	19423	1454	968	135	5,305
	retro	14,5	12,2	10,8	8,9	7,4	5,0	3,6					
35	campo	13,4	12,4	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	13266	994	661	175	9,758
	retro	14,6	11,5	9,8	7,5	5,9	3,8	2,7					
36	campo	15,4	11,3	9,3	8,2	7,2	5,2	4,1	13266	994	661	163	8,573
	retro	15,2	12,1	10,3	8,0	6,3	4,1	2,9					
37	campo	13,4	10,3	9,3	8,2	7,2	3,1	2,1	13266	994	661	187	8,666
	retro	14,1	11,0	9,3	7,1	5,6	3,5	2,5					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 02													
38	campo	15,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	9967	747	496	200	4,976
	retro	15,5	11,6	9,5	6,9	5,3	3,2	2,3					
39	campo	13,4	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	3,1	14593	1093	727	163	5,579
	retro	14,6	11,7	10,1	7,9	6,3	4,1	2,9					
40	campo	12,4	11,3	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	17025	1277	849	172	4,392
	retro	13,3	10,8	9,3	7,4	6,0	3,9	2,8					
SEGMENTO 03													
41	campo	20,6	18,5	14,4	12,4	10,3	8,2	6,2	12220	917	609	98	8,774
	retro	21,2	17,6	15,5	12,6	10,4	7,0	5,0					
42	campo	19,6	16,5	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	8655	649	433	133	7,862
	retro	20,5	15,9	13,3	10,1	7,8	4,9	3,5					
43	campo	19,6	14,4	10,3	8,2	5,2	2,1	2,1	6200	484	310	197	5,984
	retro	19,7	13,8	10,8	7,4	5,3	3,1	2,2					
44	campo	14,4	12,4	8,2	7,2	6,2	4,1	2,1	9967	747	496	203	8,535
	retro	15,4	11,5	9,3	6,8	5,2	3,2	2,2					
45	campo	26,8	22,6	16,5	13,4	11,3	7,2	6,2	6744	506	337	97	9,849
	retro	27,4	21,4	18,0	13,8	10,8	6,8	4,8					
46	campo	29,8	25,7	19,6	16,5	13,4	9,3	5,2	6744	506	337	80	8,908
	retro	30,5	24,3	20,8	16,2	12,9	8,3	5,9					
47	campo	25,7	21,6	16,5	12,4	8,2	6,2	3,1	5574	418	278	116	9,325
	retro	27,2	20,2	16,4	11,9	9,0	5,5	3,9					
48	campo	24,7	17,5	14,4	10,3	9,3	5,2	4,1	5017	460	306	131	6,013
	retro	24,7	18,1	14,7	10,7	8,0	4,9	3,4					
SEGMENTO 04													
49	campo	10,3	9,3	7,2	6,2	4,1	2,1	2,1	12623	946	629	270	7,487
	retro	11,9	8,8	7,1	5,2	3,9	2,4	1,7					
50	campo	18,5	16,5	14,4	10,3	6,2	4,1	3,1	10473	785	328	144	9,918
	retro	20,0	15,6	13,0	9,7	7,4	4,5	3,1					
51	campo	14,4	13,4	12,4	9,3	7,2	4,1	3,1	13266	994	661	146	8,585
	retro	16,2	13,0	11,2	8,8	7,1	4,6	3,2					
52	campo	16,5	13,4	10,3	8,2	6,2	5,2	3,1	10337	774	516	165	5,560
	retro	16,9	13,0	10,8	8,2	6,3	4,0	2,8					
53	campo	13,4	12,4	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	10964	822	546	210	9,325
	retro	14,5	10,9	8,9	6,6	5,0	3,1	2,2					
54	campo	14,4	13,4	10,3	8,2	5,2	3,1	2,1	9967	747	496	187	9,006
	retro	16,1	12,1	9,9	7,3	5,6	3,4	2,4					
55	campo	16,5	14,4	10,3	7,2	6,2	5,2	3,1	9397	704	469	171	8,796
	retro	17,3	13,1	10,8	8,0	6,1	3,8	2,7					
56	campo	12,4	11,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	229	8,303
	retro	14,1	10,4	8,4	6,1	4,6	2,8	2,0					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 04													
57	campo	14,4	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	3,1	13266	994	661	166	3,447
	retro	15,1	11,9	10,1	7,9	6,2	4,0	2,8					
58	campo	19,6	15,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	7153	471	358	179	7,679
	retro	19,9	14,2	11,2	7,9	5,8	3,5	2,5					
59	campo	15,4	13,4	11,3	8,2	6,2	4,1	4,1	10964	822	546	162	7,135
	retro	16,7	12,9	10,9	8,3	6,5	4,1	2,9					
60	campo	17,5	11,3	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	5625	518	417	228	4,610
	retro	16,9	11,6	9,0	6,2	4,6	2,7	1,9					
61	campo	14,4	13,4	9,3	7,2	6,2	4,1	2,1	10964	822	546	184	8,072
	retro	15,5	11,9	9,9	7,4	5,7	3,5	2,5					
62	campo	19,6	17,5	13,4	11,3	9,3	6,2	4,1	10473	785	524	116	6,371
	retro	20,4	16,4	14,1	11,1	8,9	5,8	4,1					
63	campo	19,6	17,5	14,4	9,3	6,2	4,1	3,1	9521	714	253	153	9,606
	retro	21,0	16,1	13,2	9,6	7,1	4,2	2,9					
64	campo	14,4	12,4	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	9061	679	451	228	6,788
	retro	15,2	11,0	8,8	6,2	4,6	2,8	2,0					
65	campo	20,6	17,5	15,4	12,4	10,3	7,2	5,2	12672	950	634	99	1,915
	retro	20,8	17,3	15,2	12,4	10,2	6,9	4,9					
66	campo	16,5	15,4	12,4	9,3	8,2	4,1	2,1	11109	834	554	141	9,553
	retro	17,8	14,1	12,0	9,3	7,4	4,7	3,3					
67	campo	28,8	24,7	19,6	15,4	13,4	10,3	8,2	10861	394	597	73	9,607
	retro	28,9	23,4	20,3	16,5	13,6	9,3	6,7					
68	campo	11,3	10,3	9,3	7,2	5,2	3,1	2,1	14070	1055	702	207	7,628
	retro	13,0	10,1	8,5	6,5	5,0	3,2	2,2					
69	campo	19,6	16,5	13,4	9,3	8,2	5,2	4,1	8655	649	433	135	6,049
	retro	20,4	15,7	13,1	9,9	7,7	4,8	3,4					
70	campo	10,3	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	256	6,607
	retro	11,6	8,8	7,2	5,4	4,1	2,5	1,8					
SEGMENTO 05													
71	campo	16,5	12,4	7,2	4,1	3,1	2,1	1,1	6466	382	340	304	7,441
	retro	17,0	10,9	7,9	4,9	3,4	2,0	1,4					
72	campo	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	1,1	10549	1004	668	337	3,368
	retro	10,4	7,4	5,9	4,2	3,1	1,9	1,3					
73	campo	13,4	10,3	8,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	245	3,636
	retro	13,6	9,9	8,0	5,7	4,3	2,6	1,8					
74	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	12623	946	629	266	4,169
	retro	12,0	8,9	7,2	5,2	4,0	2,4	1,7					
75	campo	11,3	10,3	8,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	485	288	8,865
	retro	12,5	9,1	7,2	5,0	3,7	2,2	1,5					
76	campo	9,3	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	13389	1004	668	337	5,127
	retro	10,3	7,5	5,9	4,2	3,1	1,9	1,3					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 05													
77	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	12623	946	629	266	4,169
	retro	12,0	8,9	7,2	5,2	4,0	2,4	1,7					
78	campo	10,3	9,3	5,2	3,1	2,6	2,1	1,1	13885	820	608	349	8,359
	retro	10,8	7,7	6,0	4,1	3,0	1,8	1,3					
79	campo	15,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	6187	588	496	251	4,758
	retro	14,9	10,3	8,0	5,6	4,1	2,5	1,8					
80	campo	11,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	12623	860	534	317	4,661
	retro	11,6	8,3	6,6	4,6	3,3	2,0	1,4					
81	campo	12,4	10,3	8,2	5,2	4,1	2,1	2,1	10571	793	527	261	5,208
	retro	13,2	9,5	7,6	5,4	4,0	2,4	1,7					
82	campo	15,4	14,4	11,3	8,2	7,2	5,2	3,1	11371	851	568	152	8,055
	retro	16,9	13,3	11,3	8,7	6,8	4,4	3,1					
83	campo	13,4	11,3	7,2	5,2	4,1	2,1	1,1	10571	793	415	265	6,587
	retro	13,8	10,0	7,9	5,5	4,0	2,3	1,7					
84	campo	13,4	11,3	8,2	5,2	3,1	2,1	1,1	10571	769	415	265	6,937
	retro	13,9	10,1	8,0	5,5	4,0	2,3	1,7					
85	campo	13,4	9,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	11628	872	580	225	7,418
	retro	13,5	10,2	8,3	6,1	4,7	2,9	2,0					
86	campo	12,4	8,2	7,2	5,2	3,1	2,1	1,1	9041	847	572	288	3,716
	retro	12,2	8,7	6,9	4,9	3,6	2,2	1,5					
87	campo	10,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	2,1	12623	946	629	312	6,349
	retro	11,0	8,0	6,4	4,5	3,4	2,0	1,4					
88	campo	10,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	265	5,767
	retro	11,4	8,6	7,0	5,2	4,0	2,4	1,7					
89	campo	13,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	733	527	257	4,288
	retro	13,5	9,7	7,8	5,5	4,1	2,5	1,7					
90	campo	11,3	9,3	6,2	5,2	4,1	3,1	2,1	11475	860	572	288	6,339
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
91	campo	12,4	8,2	7,2	4,1	3,1	2,1	2,1	9041	834	572	288	4,748
	retro	12,2	8,7	6,9	4,9	3,6	2,2	1,5					
92	campo	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	8,416
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
93	campo	10,3	9,3	6,2	5,2	3,1	2,1	1,1	12623	946	629	307	6,224
	retro	11,1	8,1	6,5	4,6	3,4	2,1	1,5					
94	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	4,669
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
95	campo	12,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	265	5,441
	retro	13,1	9,5	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
96	campo	10,3	8,2	7,2	5,2	4,1	2,1	1,1	13885	1041	692	283	4,410
	retro	11,0	8,2	6,7	4,9	3,7	2,3	1,6					

Ponto	Bacia de Deflexão	Deflexão (1x10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Sub-leito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 05													
97	campo	10,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	287	5,296
	retro	11,0	8,2	6,6	4,8	3,7	2,2	1,6					
98	campo	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	8,416
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
99	campo	13,4	10,3	7,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11628	573	483	292	5,242
	retro	13,7	9,5	7,3	5,0	3,6	2,1	1,5					
100	campo	12,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	265	5,441
	retro	13,1	9,5	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
SEGMENTO 06													
101	campo	16,5	15,4	11,3	9,3	7,2	5,2	3,1	11109	834	554	143	7,745
	retro	17,7	14,0	11,9	9,2	7,3	4,6	3,3					
102	campo	17,5	15,4	12,4	9,3	7,2	5,2	3,1	10473	785	524	140	5,351
	retro	18,4	14,4	12,2	9,4	7,4	4,7	3,3					
103	campo	15,4	12,4	9,3	7,2	5,2	2,1	1,1	9061	679	383	221	6,557
	retro	16,1	11,7	9,3	6,5	4,8	2,8	2,0					
104	campo	14,4	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	9061	679	451	224	6,978
	retro	15,4	11,1	8,9	6,3	4,7	2,8	2,0					
105	campo	15,4	13,4	8,2	6,2	4,1	3,1	1,1	9061	679	362	228	9,070
	retro	16,1	11,6	9,2	6,4	4,7	2,7	1,9					
106	campo	14,4	12,4	9,3	6,2	5,2	4,1	3,1	9967	747	496	203	7,476
	retro	15,4	11,5	9,3	6,8	5,2	3,2	2,2					
107	campo	16,5	13,4	10,3	7,2	5,2	3,1	2,1	8543	640	406	195	4,272
	retro	17,1	12,6	10,1	7,2	5,4	3,2	2,3					
108	campo	12,4	10,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	14070	1055	702	207	5,635
	retro	13,0	10,1	8,5	6,5	5,0	3,2	2,2					
109	campo	15,4	12,4	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	9967	747	496	190	5,578
	retro	15,9	12,0	9,8	7,2	5,5	3,4	2,4					
110	campo	17,5	12,4	9,3	6,2	4,1	2,1	2,1	7139	471	376	228	3,352
	retro	17,6	12,1	9,3	6,3	4,6	2,7	1,9					

Fonte: Nery (2021).

ANEXO F – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO FWD

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration Certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV112, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in March 2017 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV112 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

Rättvik 2017-03-22
KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB
Box 10, 795 21 Rättvik, Sweden
Tel: +46 248 130 24
e-mail: all@kuab.se

Postal address	Telephone	e-mail/Telefax	Visiting address	VAT number
Box 10 S-795 21 Rättvik Sweden	Nat: 0248 13024 Int: +46 248 13024	all@kuab.se	Faluvägen 6 S-795 35 Rättvik Sweden	SE556311352001

ANEXO G – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA VIGA BENKELMAN



Certificado de Calibração N°.: 1909-01

1 - Dados do cliente:

Contratante: Moraes Estudos Geológicos EIRELI ME (Solosville)
Endereço: Rua Bagé, 225 - Anita Garibaldi - CEP 89.203-290 - Joinville/SC
Solicitante: O mesmo
Endereço:

2 - Item calibrado:

Equipamento: Viga de Benkelman
Identificação: NS: 19135 Tipo: 02:01 - Relógio Comparador Digimess 10 mm Série: 5304208
Fabricante: Solotest
Identificação do cliente:
Observações:

3 - Calibração:

Norma de Referência: DNER 175-94
Procedimento: PC07
Temp. ambiente(°C): 20,1 a 20,5
Condições Ambientais: Sem ar condicionado
Executado por: Joelson A. Varela
Data da calibração: 02/09/2019
Local da calibração: Laboratório do cliente


Eng. Joelson A. Varela
Crea PR-99881/D

Assinado de forma digital por
JOELSON ALBINO
VARELA:01619451980
Dados: 2019.09.13 01:50:47 -03'00'

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com $n-1$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

- Os resultados apresentados neste documento se aplicam exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivos a quaisquer lotes.

SIMMETRO - Metrologia e Manutenção de Equipamentos Ltda
Rua Vitorio Marenda, 416 – S. José dos Pinhais – PR – CEP 83045-680
Tel (41) 3096-0577 – Cel (41) 99275-0577 e-mail: simmetro@simmetro.com.br

página 1 de 2



Certificado de Calibração Nº.: 1909-01

4 - Resultados obtidos:

Deslocamento da Extremidade da Viga	Leitura no relógio da viga		Constante				Resultados
	1ª Leitura	2ª Leitura	1ª Leitura	2ª Leitura	Média	U	
mm	mm	mm				mm	
0,00	0,000	0,000	***	***	***	0,003	Constante Média: 2,055
0,10	0,019	0,019	2,041	2,041	2,041	0,10	Desvio Padrão: 0,029
0,20	0,067	0,100	2,062	2,000	2,031	0,09	Desvio P. Média: 0,004
0,30	0,150	0,150	2,000	2,000	2,000	0,04	Erro Est. Média: 0,009
0,40	0,195	0,200	2,051	2,000	2,034	0,07	Lim.Sup. Confiança: 2,065
0,50	0,245	0,250	2,041	2,000	2,027	0,06	Lim.Inf. Confiança: 2,040
0,60	0,290	0,300	2,069	2,000	2,046	0,09	Estatos: Aprovado
0,70	0,340	0,345	2,059	2,029	2,049	0,04	Enquadramento de Aprovação: Caso I
0,80	0,390	0,400	2,051	2,000	2,034	0,10	
0,90	0,430	0,440	2,093	2,045	2,077	0,09	
1,00	0,480	0,490	2,083	2,041	2,069	0,08	
1,20	0,570	0,580	2,105	2,069	2,093	0,07	
1,40	0,670	0,680	2,090	2,069	2,079	0,06	
1,50	0,760	0,780	2,105	2,051	2,087	0,10	
1,80	0,860	0,870	2,093	2,069	2,085	0,05	
2,00	0,970	0,960	2,062	2,083	2,069	0,04	
2,20	1,080	1,070	2,037	2,058	2,043	0,04	
2,50	1,220	1,220	2,049	2,049	2,049	0,05	
3,00	1,450	1,460	2,069	2,055	2,064	0,05	
3,50	1,690	1,700	2,071	2,059	2,067	0,05	
4,00	1,940	1,950	2,062	2,051	2,058	0,05	
4,50	2,150	2,200	2,055	2,040	2,052	0,05	

padrões utilizados na calibração

tipo	capacidade	identificação	laboratório	certificado	calibração	validade
Micrômetro	50mm	MO-02	HAL GAL 0144 (TCO)	001922/2010	1901/10	01/09

Notas:

- 1 - Relógio da viga posicionado em meio para início da operação.
- 2- Intervalo de confiança dentro do especificado: 1,90 à 2,10.