



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL – UAEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISES DE CURVAS MESTRAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS “IN SITU” & LABORATÓRIO”: ESTUDO
DE CASO DE TRECHO INSTRUMENTADO NA BR-101/PE**

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE

CAMPINA GRANDE – PB
2024

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE

**ANÁLISES DE CURVAS MESTRAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS “IN SITU” & LABORATÓRIO”: ESTUDO
DE CASO DE TRECHO INSTRUMENTADO NA BR-101/PE**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Mecânica dos Pavimentos

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Co-Orientador: Prof. Dr. Jonny Dantas Patricio

CAMPINA GRANDE – PB
2024

C377a Cavalcante, Cacildo de Medeiros Brito.
Análises de curvas mestras de misturas asfálticas “*in situ*” & laboratório” : estudo de caso de trecho instrumentado na BR-101/PE / Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante. – Campina Grande, 2024.
207 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. Dr. Jonny Dantas Patricio".

Referências.

1. Misturas Asfálticas Instrumentação. 2. Mecânica dos Pavimentos. 3. Comportamento Mecânico. 4. Curva Mestra “*in situ*”. 5. Sensores. 6. Geotecnia. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Patricio, Jonny Dantas. III. Título.

CDU 625.85(043)

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE

ANÁLISES DE CURVAS MESTRAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS “IN SITU” & LABORATÓRIO”: ESTUDO DE CASO DE TRECHO INSTRUMENTADO NA BR-101/PE

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 24/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Orientador: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. Jonny Dantas Patricio
Coorientador: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof.^a Dr.^a Leda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Membro Interno: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. Lelio Antônio Teixeira Brito
Membro Externo: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello
Membro Externo: Universidade de Brasília (UNB)

Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Membro Externo: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof.^a Dr.^a Liedi Bariani Bernucci
Membro Externo: Universidade de São Paulo (USP)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

2. ALUNO(A): CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO - UFCG - COORIENTADOR, DR.^º LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO - UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO, DR. LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO - UNB - EXAMINADOR EXTERNO, DR. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI - UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO, DR.^º LIEDI BARIANI BERNUCCI - USP - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 18/2024). / TITULO DA TESE: "ANÁLISES DE CURVAS MESTRES DE MISTURAS ASFÁLTICAS "IN SITU" & LABORATÓRIO": ESTUDO DE CASO DE TRECHO INSTRUMENTADO NA BR-101/PE" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, SALA DE VÍDEOCONFERÊNCIA, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.

3. EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.

4. CAMPINA GRANDE, 24 DE MAIO DE 2024

5.

6.

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO
Data: 28/05/2024 17:46:21-0300
Verifique em <https://validar.jti.gov.br>

7.

8.

9. LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO - UNB - EXAMINADOR EXTERNO

10.

11.



JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI
Data: 30/05/2024 18:17:59-0300
Verifique em <https://validar.jti.gov.br>

12.

13.

14.

JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI - UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO

15.

16.

Documento assinado digitalmente



LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI
Data: 05/05/2024 04:22:31-0300
Verifique em <https://validar.jti.gov.br>

17.

18.

19.

LIEDI BARIANI BERNUCCI - USP - EXAMINADORA EXTERNA



Documento assinado eletronicamente por Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo, em 27/05/2024, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 27/05/2024, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR, em 27/05/2024, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante, Usuário Externo, em 27/05/2024, às 13:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A), em 27/05/2024, às 14:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por Lélío Antônio Teixeira Brito, Usuário Externo, em 28/05/2024, às 06:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador 4401596 e o código CRC B605612D.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Rosângela, e meu pai, Jorge, por sempre acreditarem que poderia ir além, por todo o amor e companheirismo.

A minha esposa Kellianne, que me apoiou em todas as etapas de nossa vida.

Às minhas princesas Anna Elisa, Anna Sophia e Anna Yuki, que sempre me recebem com beijos e abraços, alegrando todos os meus dias.

Aos amigos Kennedy, Jonny, Euclides e Hamilton por todo o entusiasmo e confiança.

A todos os mestres e professores que influenciaram toda a minha vida, representando uma fonte contínua de aprendizado e desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, principalmente.

À Kellianne minha esposa pelo incentivo, carinho, compreensão, amizade e amor durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Meus pais, Jorge e Rosângela, por todo o esforço, companheirismo, cobrança e incentivo em todas as fases de minha vida.

Ao Professor Dr. Kennedy por todo o companheirismo, orientação, disponibilidade, paciência, incentivo, mentoria e paciência.

Ao Professor Dr. Jonny Patrício pela paciência, disponibilidade e orientação em todos os momentos.

Aos Amigos do LEP, que sempre se fizeram presentes e disponíveis para ajudar, não importando as dificuldades.

Ao Amigo Euclides, pelas muitas horas de aprendizado e convivência no DNIT.

Ao Amigo Hamilton, por acreditar e ajudar na concretização deste degrau do caminho.

Ao DNIT por todo incentivo e experiências que me tornaram um profissional melhor.

Aos Amigos do DNIT, que dividem as dificuldades de nossa função de levar o melhor na engenharia rodoviária a sociedade.

À Insttale Engenharia Ltda. por todo o apoio disponibilizado, que propiciou este estudo.

À ATECEL pela disponibilidade, apoio e auxílio desprendido para auxiliar no presente trabalho.

Ao Professor Dr. José Afonso Gonçalves de Macedo, mestre, pessoa por quem cultivei grande respeito e admiração.

RESUMO

No Brasil o procedimento de dimensionamento de Pavimentos Flexíveis com o software “MeDiNa” permite a análise do desempenho funcional e estrutural do pavimento com auxílio da estimativa de área trincada e do acúmulo de deformação permanente. Neste contexto, os resultados de ensaios realizados em laboratório servem de base para o uso de simulações mecanicistas para previsão do desempenho de misturas asfálticas aplicadas em campo. Entretanto, os dados obtidos em laboratórios a partir de condições controladas de tensões, de deformações, de frequências e de temperaturas diferem das situações reais em que o revestimento asfáltico está submetido em campo. A partir deste pressuposto, esta pesquisa teve por objetivo estabelecer as “Curvas Mestras” de um revestimento asfáltico tipo CA (Concreto Asfáltico), a partir da análise comparativa de resultados obtidos de curvas mestras de campo (Trecho Experimental Instrumentado) e de laboratório. Uma vez que os diferentes fatores influenciam no comportamento mecânico das camadas asfálticas, o conhecimento das respostas “in situ” dos materiais constituintes do pavimento com auxílio de trechos experimentais instrumentados é fundamental para subsidiar os modelos constituintes de previsão de desempenho. Como método de trabalho, foram instalados vários tipos de sensores (células de carga, *strain gauges*, sensores J e LM), para mensurar o comportamento visco-elasto-plástico de uma camada asfáltica ao longo de um período de 12 meses com medição: das variações de tensões, de frequências e de temperaturas sob solicitações reais do tráfego. Para calibração da instrumentação foram realizadas avaliações estruturais a partir dos resultados da caracterização em laboratório e “in situ”, com auxílio do FWD e de retroanálise das Bacias de Deflexões. Os resultados indicam que é possível discretizar o comportamento mecânico da camada asfáltica a partir da “Curva Mestre in situ”, como também, determinar módulos dinâmicos da ordem de grandeza aproximada aos estimados para a Curva Mestre obtida em laboratório. Foram observados que os níveis de deformações (parcelas elástica, viscosa e plástica), que ocorrem na camada asfáltica instrumentada, são maiores que aquelas mensuradas em laboratório a partir da realização do ensaio de Módulo Dinâmico. Pode-se inferir que o comportamento mecânico que está submetido a camada asfáltica “in situ”, para o estudo de caso em específico, é o visco-elástico-plástico-não linear, diferindo das condições pré-estabelecidas para as misturas asfálticas submetidas aos ensaios em laboratório, as quais partem do pressuposto de um regime visco-elástico-linear. Por conseguinte, é possível compreender melhor o comportamento mecânico que ocorre em camadas submetidas as condições ambientais e de solicitação de tráfego reais, aprimorando a estimativa dos parâmetros de desempenho de “área trincada” e de “acúmulo de deformação permanente”, a partir de modelos matemáticos para métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Palavras-chave: Comportamento Mecânico; Misturas Asfálticas Instrumentação; Sensores; Curva Mestre.

ABSTRACT

In Brazil, the Flexible Pavement sizing procedure with the "MeDiNa" software allows the analysis of the functional and structural performance of the pavement with the help of estimating the cracked area and permanent deformation of the asphalt surface. In this context, the results of tests in the laboratory serve as basis for using mechanistic simulations to predict the mechanical behavior of Hot Mix Asphalt (HMA) applied in the field. However, data obtained in laboratories under controlled conditions of stresses, strains, frequencies, and temperatures differ from the real situations in which the HMA is subjected in the field. Based on this assumption, this research aims to verify the hypothesis of establishing the "Master Curves" of an Asphalt Concrete (CA), from the comparative analysis of results obtained in the Field (Instrumented Experimental Section) and in the laboratory. Since various factors influence the mechanical behavior of asphalt layers, knowledge the "in situ" responses of the pavement's constituent materials with the aid of instrumented experimental sections is essential to support the constituent performance prediction models. As a working method, several types of sensors (load cells, "strain gauges" and temperature sensors) were installed, to measure the viscous-elastic-plastic behavior of the asphalt layer over a period of 12 months with: the variations of stress, frequencies, and temperatures under real traffic demands. To calibrate the instrumentation, structural assessments were carried out based on the results of the laboratory and in situ characterization, with the help of FWD and backcalculation. The results indicate that it is possible to describe the mechanical behavior of the asphalt layer from the "Master Curve in situ", as determine dynamic moduli in same order of magnitude to those estimated for the laboratory Master Curve. It was observed that the readings of deformations (elastic, viscous and plastic) occurring in the instrumented asphalt layer are higher than those measured in the laboratory from the performance of the Dynamic Modulus test. We can infer that the mechanical behavior that the asphalt layer is subjected to "in situ", for the specific case study, is viscous-elastic-plastic-non-linear, differing from the pre-established conditions for the asphalt mixtures submitted to laboratory tests, which assume a viscous-elastic-linear regime. Therefore, it's possible to better understand the mechanical behavior that occurs in layers subjected to real environmental and traffic conditions, improving the estimation of "cracked area" and "permanent deformation" performance parameters, based on mathematical models for flexible pavement design methods.

Keywords: Mechanical Behavior; Asphalt Mixes Instrumentation; Sensors; Master Curve.

LISTA DE ABREVIÇÕES

AEMC - Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AMP - Asfalto modificado por polímero
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM - American Society for Testing and Materials
CA – Concreto Asfáltico
CAP – Cimento asfáltico de petróleo
CBR – California Bearing Ratio
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR – Concreto Compactado a Rolo
CP – Corpo de Prova
CPU - Central Process Unit
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EVA - etileno vinil acetato
FWD - Falling Weight Deflectometer
HD – Hard Drive
IPR – Instituto de Pesquisa Rodoviária
ISC - Índice de Suporte Califórnia
LAPAV - Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LVDT - Linear Variable Differential Transformer
LVE – Linear-visco-elástico
MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
MEF - Método dos Elementos Finitos
MEPDG – Mechanistic-empirical Pavement Design Guide
Mr – Módulo de Resiliência
NLVE – Não Linear-visco-elástico
SBS - estireno-butadienoestireno
SSD - Solid State Drive
S-VECD - Simplified Viscoelastic Continuum Damage
TR – Temperatura de Referência
tTSP - time-temperature superposition principle

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	22
1.1 – JUSTIFICATIVA	24
1.2 – OBJETIVOS.	26
1.2.1 – OBJETIVO GERAL	26
1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.3 – HIPÓTESES	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 - Carregamentos em pavimentos	28
2.2 - Desenvolvimento das tensões nos pavimentos	30
2.3 - <i>Fatores que Influenciam o Comportamento da Rigidez da Mistura Asfáltica</i>	31
2.3.1 – Temperatura e Frequência de Carregamento	31
2.3.2 – Estado de Tensão	31
2.3.3 – Agregados	31
2.3.4 – Propriedades dos Ligantes Asfálticos	32
2.3.5 – Filer	32
2.3.6 – Volume de Vazios	32
2.4 - <i>Teorias Sobre Tensões e Deformações dos Materiais Constituintes do Pavimento</i>	32
2.5 - Equação de Boussinesq	33
2.6 – Breve Histórico Acerca das Teorias das Camadas Elásticas	35
2.7 – Definição de Módulo de Resiliência (M_r) em misturas asfálticas	36
2.8 – Métodos Computacionais	39
2.9 – Método Viscoelástico	40
2.10 – Teoria das camadas viscoelásticas	41
2.11 – Definição de módulo dinâmico ($ E^* $)	43
2.12 – Princípio da superposição tempo-temperatura	45

2.13 – Construção de Curvas Mestre baseados no Modelo Sigmoidal _____	46
2.14 – Procedimento para desenvolvimento de curva mestre _____	47
2.15 – Modelo de Fonseca (1995) do Módulo Dinâmico por Compressão Axial ($ E^* $) _____	49
2.16 – Dimensionamento Empírico- Mecânico dos Pavimentos _____	51
2.17 - Fadiga dos Pavimentos _____	52
2.18 - Fatores que influenciam no fenômeno da Fadiga _____	55
2.18.1 - Modos de Carregamento _____	55
2.18.2 - Frequências de Carregamento _____	56
2.18.3 - Critério de Parada do Ensaio de Fadiga _____	57
2.18.4 - Temperatura _____	57
2.18.5 - Formas de Onda do Carregamento _____	59
2.19 – Danos por Deformação Permanente _____	60
2.20 – Instrumentação de Pavimentos _____	61
2.21 - Seções Instrumentadas _____	62
2.21.1 - Virginia Smart Road _____	62
2.21.2 - Seção teste de Maine _____	63
2.21.3 - A Instrumentação da Autoestrada A41N na França. _____	63
2.21.4 - Seção Instrumentada na China _____	64
2.21.5 - Segmentos Instrumentados no Brasil _____	64
3 – MATERIAIS E MÉTODOS _____	67
3.1 – Escolha do trecho para Instrumentação _____	67
3.2 - Obra _____	68
3.3 - Caracterização do Trecho Instrumentado _____	69
3.4 - Características Mecânicas da Camada Asfáltica _____	70
3.4.1 - Ensaio de Laboratório _____	70
3.4.1.1 Caracterização dos Agregados _____	71
3.4.1.2 Caracterização dos Ligantes Asfálticos _____	73
3.4.1.3 Verificação da Dosagem do Binder _____	75
3.4.1.4 Verificação da Dosagem da Mistura Faixa C _____	76

3.4.1.5 Resistência a Tração _____	78
3.4.1.6 Dano por Umidade Induzida _____	78
3.4.1.7 Módulo de Resiliência _____	78
3.4.1.8 Flow Number _____	79
3.4.1.9 <i>Módulo Dinâmico</i> _____	80
3.4.1.10 <i>Ensaio de Fadiga à Tração Direta – Modelo S-VECD</i> _____	81
3.4.2 - Ensaio “ <i>in situ</i> ” _____	83
3.4.2.1 Pêndulo britânico _____	83
3.4.2.2 Mancha de Areia _____	84
3.4.2.3 Levantamento defletoométrico com Falling Weight deflectometer (FWD) _____	84
3.4.2.4 Retroanálise dos Módulos de Resiliência das Camadas do Pavimento _____	87
3.5 - Características Intrínsecas _____	91
3.5.1 - Instalação do Sistema de Instrumentação _____	91
3.5.2 - Materiais _____	92
3.5.2.1 <i>Strain Gauge</i> _____	92
3.5.2.2 Células de Tensão _____	94
3.5.2.3 Termopares _____	95
3.5.2.4 Sistema de Aquisição de Dados _____	95
3.5.3 - Instalação do Sistema de Instrumentação _____	97
3.6 – Disposição dos Sensores da Instrumentação _____	101
3.6.1 – Uso da Roseta de Deformações _____	102
3.6.2 - Relato de acompanhamento da vida útil dos sensores _____	103
3.7 – Qualidade dos dados _____	109
3.8 – Metodologia para Obtenção dos Valores Medidos pelos Sensores _____	110
3.8.1 – Frequência _____	111
3.8.2 – Frequência Reduzida _____	112
3.8.3 – Tensões _____	113
3.8.4 – Deformações Longitudinais e Transversais _____	113
3.8.5 – Deformações Axiais _____	115
3.8.6 – Medidas de Módulos _____	116
3.9 - Obtenção das Curvas de Módulo Dinâmico dos Meses Instrumentados _____	116

3.9.1 – Matriz de dados _____	116
3.9.2 – Fator de correção da frequência – Frequência Reduzida _____	117
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS _____	119
4.1 – Quantidade de Veículos _____	119
4.1 - Frequência Medida _____	119
4.2 - Temperaturas Medidas _____	122
4.3 - Frequência Reduzida para Temperatura de Referência de 20°C _____	126
4.4 - Medida das Tensões _____	131
4.5 - Medida das Deformações Longitudinais _____	133
4.6 - Medida das Deformações Transversais _____	135
4.7 - Medida das Deformações Axiais _____	137
4.8 - Medidas de Módulos Dinâmicos _____	140
4.9 - Medidas de Deformação na profundidade 12,0 cm – Influência da Geogrelha _____	143
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PÓS-TRATAMENTO _____	146
5.1 – Determinação das Curvas mestras “ <i>in situ</i> ” _____	146
5.1.1 – Tratamento dos dados de levantamento _____	151
5.2 - Obtenção da Curva Mestra para todo o Período Instrumentado. _____	160
5.2.1 – Tratamento dos Dados da Curva de Todo o Período Instrumentado. _____	161
5.3 - Determinação da temperatura de referência para mesmo módulo na Fr de 10Hz _____	163
5.4 - Análise do comportamento da mistura com e sem Geogrelha sobre as juntas transversais. _____	166
6 - CONCLUSÕES _____	169
7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	171
Apêndice 1: Avaliação do comportamento dos “Strain Gauges” _____	184
Apêndice 2: Deformações ao longo dos meses por canais de leitura _____	194
Apêndice 3: Ajustes do Modelo Sigmoidal mês a mês _____	199
Apêndice 4: Protocolo – Instrumentação para a determinação do módulo dinâmico “<i>in situ</i>” _____	202

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1: Equações de Boussinesq para um Ponto de Carga.	34
Tabela 2. 2: Esquemas de carregamento para realização de ensaios de fadiga.	56
Tabela 3. 1: Espessuras das camadas do pavimento monitorado.....	68
Tabela 3. 2: Ensaios laboratoriais executados na presente pesquisa.....	71
Tabela 3. 3: Granulometria dos agregados.....	72
Tabela 3. 4: Caracterização física dos agregados.....	73
Tabela 3. 5: Caracterização do CAP 50/70.....	74
Tabela 3. 6: Caracterização do AMP 55/75.....	74
Tabela 3. 7: Mistura adotado para a dosagem do “Binder”.....	75
Tabela 3. 8: Parâmetros Volumétricos obtidos na dosagem do “Binder”.....	76
Tabela 3. 9: Mistura adotado para a dosagem do Faixa C.....	77
Tabela 3. 10: Parâmetros Volumétricos obtidos na dosagem do Faixa C.....	77
Tabela 3. 11: Ensaio de resistência à tração indireta das camadas de “Binder” e Faixa C.....	78
Tabela 3. 12: Ensaio de Lottman.....	78
Tabela 3. 13: Características das camadas do pavimento monitorado.....	79
Tabela 3. 14: Características das camadas do pavimento monitorado.....	79
Tabela 3. 15: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoideal utilizado para determinação do módulo dinâmico.....	81
Tabela 3. 16: Coeficientes C_{11} e C_{12} das amostras de Faixa C da BR 101.....	81
Tabela 3. 17: Coeficientes C_{11} e C_{12} das amostras de Binder da BR 101.....	82
Tabela 3. 18: Ensaios “in situ” executados na presente pesquisa.....	83
Tabela 3. 19: Características das camadas do pavimento monitorado.....	83
Tabela 3. 20: Características das camadas do pavimento monitorado.....	84
Tabela 3. 21: Levantamento deflectômetro pelo Falling Weight Deflectometer (FWD).....	85
Tabela 3. 22: Correção em relação a carga para levantamento deflectométrico pelo Falling Weight Deflectometer (FWD).....	86
Tabela 3. 23: Módulos de Resiliência iniciais e Coeficientes de Poisson das camadas da estrutura do pavimento.....	88
Tabela 3. 24: Módulos obtidos por retroanálise no BackMeDiNa (MPa).....	89
Tabela 3. 25: Módulos após correção em relação a temperatura.....	90
Tabela 3. 26: Características técnicas dos extensômetros.....	93
Tabela 3. 27: Características técnicas das células de tensão em solo, concreto e outros materiais maciços.....	94

Tabela 3. 28: Inventário dos canais associados aos “strain gauges”	102
Tabela 3. 29: Inventário dos canais associados as células de carga	102
Tabela 3. 30: Inventário dos canais associados aos termopares	102
Tabela 3. 31: Canais apresentando leituras – “strain gauges” Longitudinais	106
Tabela 3. 32: Canais apresentando leituras - “strain gauges” 45°	106
Tabela 3. 33: Canais apresentando leituras - “strain gauges” Transversais	106
Tabela 3. 34: Canais apresentando leituras - “strain gauges” Fibra Inferior.....	106
Tabela 3. 35: Canais apresentando leituras – Células de Carga	107
Tabela 3. 36: Determinação dos fatores de deslocamento para construção da curva.	117
Tabela 4. 1: Histogramas das Frequências ao longo dos meses de dezembro/2019 a julho/2020.....	121
Tabela 4. 2: Histogramas das Temperaturas ao longo dos meses de dezembro/2019 a julho/2020.	124
Tabela 4. 3: Histogramas das Frequências Reduzidas - meses de Dezembro/2019 a Julho/2020.....	129
Tabela 4. 4: Comparação dos Histogramas das Frequências Efetivas e Frequências Reduzidas	130
Tabela 4. 5: Histogramas dos Módulos Calculados - meses de dezembro/2019 a julho/2020.	142
Tabela 5. 1: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para dezembro	147
Tabela 5. 2: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para janeiro	147
Tabela 5. 3: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para fevereiro.....	147
Tabela 5. 4: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para março	148
Tabela 5. 5: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para maio.....	148
Tabela 5. 6: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para junho.....	148
Tabela 5. 7: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para julho.....	148
Tabela 5. 8: Fatores de ajuste das regressões das curvas mestras, estimação do comportamento da camada pelo modelo sigmoidal e comportamento dos valores de campo.	149
Tabela 5. 9: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para todo o período de levantamento.	160
Tabela 5. 10: Comparação dos fatores de ajuste das curvas mestras “in situ” e laboratório.	160
Tabela 5. 11: Determinação da espessura de revestimento para mesma deformação com Geogrelha.	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa dos trechos experimentais do DNIT em todo o Brasil.	23
Figura 2. 1: Transmissão de cargas em pavimentos rígidos x flexíveis	29
Figura 2. 2: Deformações medidas no revestimento do pavimento asfáltico.....	30
Figura 2. 3: Distribuição de tensões no pavimento asfáltico.....	30
Figura 2. 4: Notação de Boussinesq para a equação.....	34
Figura 2. 5: Linhas de Influência para Determinação da Tensão Vertical em um Ponto Devido a um Carregamento Circular aplicado na superfície de uma camada.	35
Figura 2. 6: Aparelhagem para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas.	37
Figura 2. 7: Duração dos tempos de carregamento e repouso.....	37
Figura 2. 8: Esquema do carregamento do corpo de prova no ensaio de MR.	38
Figura 2. 9: Exemplo de malha estruturada utilizada no MEF.	39
Figura 2. 10: Modelos Mecânicos para Materiais Viscoelásticos.....	40
Figura 2. 11: Curvas de tensão e deformação em um ensaio de módulo complexo	42
Figura 2. 12: Plano complexo dos módulos.	42
Figura 2. 13: Ilustração do esquema geral do corpo de prova no ensaio com dois medidores de deslocamento.	44
Figura 2. 14: Exemplo de construção da curva mestra de módulo dinâmico.	48
Figura 2. 15: Exemplo da variação do $\log(\alpha T)$ pela temperatura de ensaio	49
Figura 2. 16: Representação gráfica da equação proposta por Fonseca.....	50
Figura 2. 17: Fadiga de uma mistura de asfalto para diferentes temperaturas.	58
Figura 2. 18: Danos por fadiga para diferentes condições de temperatura. (a) pavimento flexível a elevadas temperaturas. (b) Pavimento flexível a temperaturas intermediárias. (c) pavimento flexível a baixas temperaturas. (d) pavimento semi-rígido a elevadas temperaturas. (e) pavimento semi-rígido a temperaturas intermediárias. (f) pavimento semi-rígido a baixas temperaturas.	59
Figura 2. 19: Tipos de onda de carregamento do ensaio de fadiga.....	60
Figura 2. 20: Configuração da instrumentação das pistas experimentais do LAPAV-UFRGS.....	64
Figura 2. 21: Posição relativa dos sensores em cada camada e arranjo dos “strains gages” (UFSC – DNIT).....	65
Figura 2. 22: Vista superior do trecho da BR – 116.....	65
Figura 3. 1: Localização do trecho monitorado	67
Figura 3. 2: Seção transversal tipo do trecho monitorado	68
Figura 3. 3: Fluxograma das etapas da pesquisa.	69
Figura 3. 4: Curvas granulométricas dos agregados.....	72
Figura 3. 5: Curva de viscosidade rotacional versus temperatura do CAP 50/70.....	74

Figura 3. 6: Curva de viscosidade rotacional do AMP 55/75.....	75
Figura 3. 7: Curva de Fuller para a mistura adotado do “Binder”.....	76
Figura 3. 8: Curva de Fuller para a mistura adotada na Faixa C.....	77
Figura 3. 9: Curva mestra - Faixa B.....	80
Figura 3. 10: Curva mestra - Faixa C.....	80
Figura 3. 11: (a) Curvas C vs. S e (b) Curva de Gr das amostras de Faixa C da BR 101.....	82
Figura 3. 12: (a) Curvas C x S e (b) Curva de Gr das amostras de Binder da BR 101.....	82
Figura 3. 13: Trecho experimental analisado com o FWD.....	85
Figura 3. 14: Tela inicial do software BackMeDiNa.....	87
Figura 3. 15: Tela de resultado da retroanálise pelo software BackMeDiNa.....	88
Figura 3. 16: Sistema de proteção em perfil H.....	93
Figura 3. 17: Informações comerciais dos extensômetros adquiridos da marca Kyowa.....	94
Figura 3. 18: Células de tensão adquiridas.....	95
Figura 3. 19: a) e (b): Sistema de aquisição de dados.....	96
Figura 3. 20: Ilustração do monitoramento e aquisição do sinal.....	97
Figura 3. 21: Croqui de locação adotado para a instalação dos sensores.....	98
Figura 3. 22: Posicionamento das juntas de dilatação – “strain gauges” sobre as juntas.....	98
Figura 3. 23: Instalação dos sensores.....	99
Figura 3. 24: Croqui da instalação dos sensores entre as novas camadas do Binder e do revestimento.....	100
Figura 3. 25: Proteção e verificação dos sensores durante a instalação.....	100
Figura 3. 26: Sensores instalados com sua respectiva legenda.....	101
Figura 3. 27: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 15 de Dezembro de 2019 às 00:01:13.....	104
Figura 3. 28: Deformações ao longo dos meses para o canal 03.....	108
Figura 3. 29: Fluxograma de aquisição e trabalho dos dados da pesquisa.....	110
Figura 3. 30: Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso completa.....	111
Figura 3. 31: Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso incompleta.....	111
Figura 3. 32: Cálculo dos fatores de deslocamento tempo-temperatura para TR=20°C.....	112
Figura 3. 33: Medição da tensão com todo o pulso durante o registro.....	113
Figura 3. 34: Medição da tensão com parte do pulso durante o registro.....	113
Figura 3. 35: Medição da deformação no canal 12.....	114
Figura 3. 36: Medição da deformação no canal 14.....	114
Figura 3. 37: Detalhamento da Tensão e Deformação registrados quando ocorrem pulsos múltiplos.....	114
Figura 3. 38: Regressão para cálculo do Coeficiente de Poisson em função da temperatura.....	115
Figura 3. 39: Sigmoides para as temperaturas 12°C, 20°C e 28°C.....	117
Figura 3. 40: Construção da curva da superposição tempo-temperatura com os dados “in situ”.....	118

Figura 3. 41: Determinação dos fatores de ajuste para determinação do fator de correção.	118
Figura 4. 1: Frequência dos veículos comerciais ao longo do dia no trecho instrumentado.	119
Figura 4. 2: Frequências Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	120
Figura 4. 3: Comparação dos Histogramas das Frequências Mês a Mês.	122
Figura 4. 4: Temperaturas Medidas entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	123
Figura 4. 5: Comparação dos Histogramas das Temperaturas Mês a Mês.	125
Figura 4. 6: Variação da Temperatura (°C) ao longo dos meses.	126
Figura 4. 7: Frequências Reduzidas Calculadas entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	127
Figura 4. 8: Comparação dos Histogramas das Frequências Reduzidas Mês a Mês.	128
Figura 4. 9: Distribuição Normal das Tensões na Profundidade 8,0 cm.	131
Figura 4. 10: Tensões Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	132
Figura 4. 11: Comportamento das tensões ao longo dos meses.	133
Figura 4. 12: Def. Long. Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	134
Figura 4. 13: Comportamento estatístico das deformações longitudinais.	135
Figura 4. 14: Comportamento estatístico das deformações transversais.	135
Figura 4. 15: Def. Transv. Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	136
Figura 4. 16: Comportamento estatístico das deformações axiais.	137
Figura 4. 17: Contribuição, por mês, das deformações longitudinais e transversais para a deformação vertical.	138
Figura 4. 18: Def. Vertical Calculada ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	139
Figura 4. 19: Distribuição Normal dos Módulos Dinâmicos na profundidade 8,0 cm em todo o levantamento....	140
Figura 4. 20: Módulos Calculados ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.	141
Figura 4. 21: Comportamento dos Módulos ao longo dos meses.	143
Figura 4. 22: Deformações na profundidade 12,0 cm sobre junta de transição com e sem Geogrelha.	144
Figura 4. 23: Comparação dos valores médios das deformações sobre uma junta transversal com e sem Geogrelha.....	145
Figura 5. 1: Comparação entre as Curvas Mestras mês a mês e a determinada em Laboratório	146
Figura 5. 2: Faixas de combinações de tensão e temperatura do ensaio de Módulo Dinâmico (a) e os pares de tensão e temperatura medidos ao longo dos meses (b) a (h).	150
Figura 5. 3: Média dos pares de tensão e deformação ao longo dos meses e a faixa dos limites de linearidade do ensaio de módulo dinâmico.	151
Figura 5. 4 Filtragem dos dados do mês de Dezembro e regressão não-linear	153
Figura 5. 5 Filtragem dos dados do mês de Janeiro e regressão não-linear.	154
Figura 5. 6: Filtragem dos dados do mês de Fevereiro e regressão não-linear	155

Figura 5. 7: Filtragem dos dados do mês de Março e regressão não-linear	156
Figura 5. 8: Filtragem dos dados do mês de Maio e regressão não-linear.....	157
Figura 5. 9: Filtragem dos dados do mês de Junho e regressão não-linear.....	158
Figura 5. 10: Filtragem dos dados do mês de Julho e regressão não-linear.....	159
Figura 5. 11: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para todo o período de levantamento.	160
Figura 5. 12: Filtragem dos dados do mês de Todo o Período e regressão não-linear	162
Figura 5. 13: Superfície dos fatores de ajuste para a mistura estudada.	163
Figura 5. 14: Deslocamento da curva de laboratório para a determinada “in situ” para módulos idênticos na frequência 10 Hz.....	164
Figura 5. 15: Cálculo dos fatores de transferência para as temperaturas de 12°C, 20°C e 28°C.....	165
Figura 5. 16: Correlação entre as deformações com e sem Geogrelha para mesma tensão, frequência e temperatura.....	166
Figura 5. 17: Estrutura de pavimento adotada para análise do ganho estrutural da Geogrelha	167
Figura A1. 1:Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 09 de Janeiro de 2020 às 00:13:47.....	185
Figura A1. 2: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 07 de Fevereiro de 2020 às 14:44:15.....	186
Figura A1. 3: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 09 de Março de 2020 às 16:51:38.....	188
Figura A1. 4: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 05 de Maio de 2020 às 10:26:37.....	189
Figura A1. 5: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 01 de Junho de 2020 às 00:02:12.....	190
Figura A1. 6: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 14 de Julho de 2020 às 14:50:05.....	191
Figura A1. 7: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 29 de Julho de 2020 às 09:02:01.....	192
Figura A1. 8: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 30 de Julho de 2020 às 14:14:03.....	193
Figura A2. 1: Deformações ao longo dos meses para o canal 04	195
Figura A2. 2: Deformações ao longo dos meses para o canal 10	196
Figura A2. 3: Deformações ao longo dos meses para o canal 12	197
Figura A2. 4: Deformações ao longo dos meses para o canal 14	198
Figura A3. 1: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de dezembro.....	200
Figura A3. 2: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de janeiro.....	200
Figura A3. 3: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de fevereiro.....	200
Figura A3. 4: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de março.....	200
Figura A3. 5: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de maio.....	201
Figura A3. 6: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de junho.....	201
Figura A3. 7: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para os dados de julho.....	201

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil encontra-se em uma fase de evolução na forma com que se projeta pavimentos, impulsionado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), que trabalha para que ocorra a implementação do método de Dimensionamento MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos), que traz uma evolução no projeto dos pavimentos para tráfego pesado.

A metodologia do MedDina abrange o dimensionamento de rodovias que possuem tráfego com número de veículos equivalentes superiores a 5×10^7 , estas rodovias deixarão de ser dimensionadas com a utilização dos ábacos do método do Prof. Murilo (IPR - 719 - Manual de Pavimentação, 2006). Utiliza os avanços do conhecimento dos materiais constituintes do pavimento, com a implementação de uma metodologia mecanístico-empírica. Adota-se como critério de dimensionamento a previsão de desempenho da estrutura do pavimento, com estimativa do percentual de área trincada de até 30%, afundamento de trilha de roda inferior que 10mm e a deflexão máxima do subleito possuir deflexão de $70 \times 10^{-2} mm$ (DNIT, 2020a).

Tal evolução se faz necessária, uma vez que o método de dimensionamento pelo ISC (Índice de Suporte Califórnia) se encontra em utilização a mais de 50 anos, existindo a necessidade de sua substituição, frente as novas técnicas, ensaios e compreensões dos materiais constituintes do pavimento na atualidade.

Outras metodologias se destacam da Brasil neste aspecto, como o MPEDG/EUA (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) lançado em 2004 pelo Programa Nacional Cooperativo de Pesquisa de Rodovias (Nation Cooperative Highway Research Program – NCHRP) ou o método de dimensionamento semiempírico da França, que considera tanto os pavimentos existentes, quanto os modelos mecânicos do comportamento dos materiais constituintes dos pavimentos (La route et ses chaussées: Manuel de travaux publics, Paris, Eyrolles ,2020).

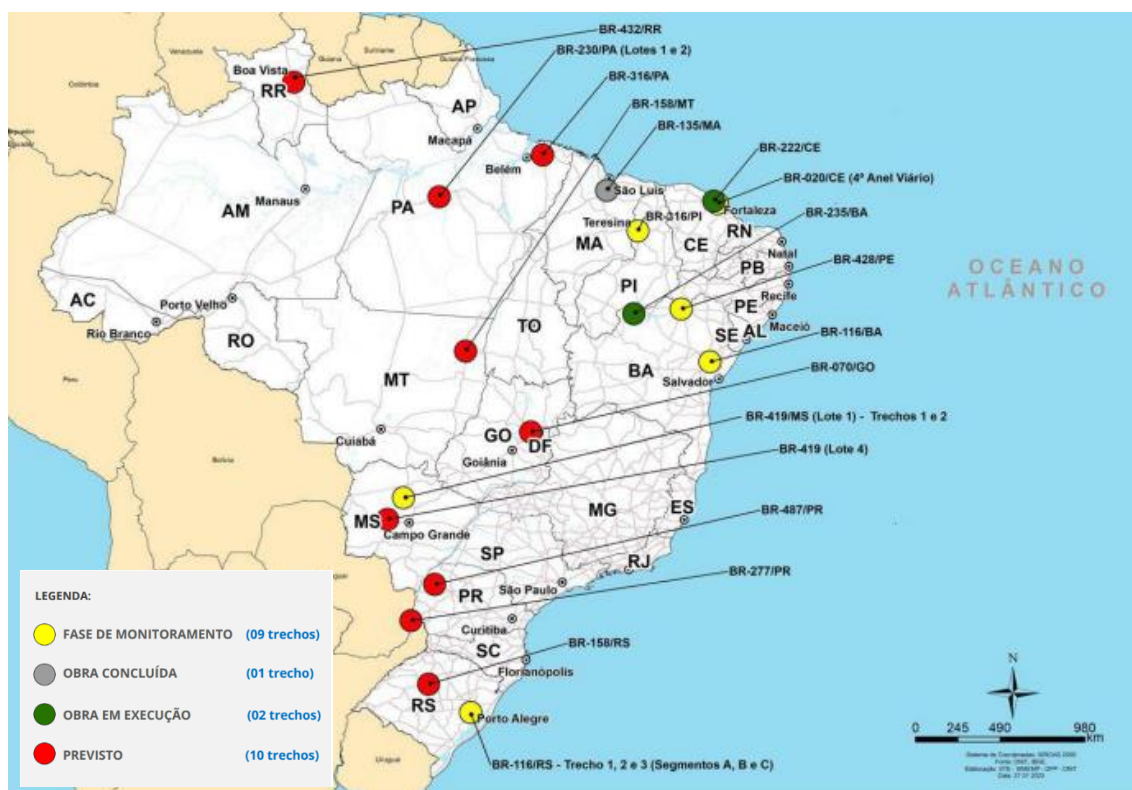
O contínuo avanço da pesquisa no conhecimento dos materiais e melhorias dos métodos de dimensionamento dos pavimentos se faz ainda mais relevante ao Brasil, devido a importância do nosso modal de transportes, onde as estradas são elementos de grande relevância na economia do país, sendo o principal meio utilizado para escoar sua produção.

O desempenho e a durabilidade dos pavimentos brasileiros são parâmetros de suma importância, tanto para os pavimentos existentes quanto para os novos, na perspectiva de melhorar continuamente sua compreensão e assim, aumentar sua vida útil e diminuir os perigos a que os usuários estão submetidos.

Entretanto, esta inflexão na forma de dimensionar passa por uma etapa crucial, a calibração do método a ser implementado no Brasil, um país continental, com regiões distintas e com características climáticas e geológicas variadas. Para a calibração, trechos experimentais estão sendo monitorados no país, direcionados pelo IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), administrado pelo DNIT, para auxiliar nesta etapa da implementação do novo método, inclusive com o lançamento do Guia para Execução de

Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa (DNIT, 2020b). A Figura 1.1 apresenta o panorama dos trechos experimentais em andamento.

Figura 1.1: Mapa dos trechos experimentais do DNIT em todo o Brasil.



Fonte: Anuário IPR, 2022.

A Diretoria de Planejamento e Pesquisa do DNIT estabeleceu, junto as Superintendências nos Estados, os segmentos experimentais indicados na Figura 1.1, para avaliar e aperfeiçoar a calibração do novo método de dimensionamento, de forma a auxiliar os projetistas no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Um dos aspectos que subsidiam as pesquisas em andamento baseiam-se na premissa de que o comportamento dos materiais utilizados na pavimentação é definido por meio de ensaios especiais (Flow Number, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, etc), realizados sob situações de contorno conhecidas, em corpos-de-prova moldados em laboratório, realizado sob controle de sistemas computacionais, que nos aproximam do estado-da-arte na utilização dos materiais de pavimentação sob condições de contorno conhecidos (Ziegler, 2021).

Uma das características intrínsecas do material asfáltico, que apresenta a forma com que este material vai se comportar em função da frequência e temperatura é a Curva Mestre, que é determinada por meio da Norma DNIT 416/2919 – ME. Esta é uma expressão matemática que sintetiza o comportamento viscoelástico, utilizado como critério de desempenho para dosagem, como também para o dimensionamento de pavimentos.

Entretanto as solicitações que ocorrem nos pavimentos são diferentes daquelas estimadas em laboratório. Dentre as diferenças destacam-se as frequências a que os pavimentos são submetidos e

aqueles considerados em laboratório (enquanto ensaia-se com frequências de 1 Hz o tráfego real se aproxima mais de 10 Hz, CHENG, 2022c), como também o efeito da mudança de temperatura em função do clima, algo que não pode ser facilmente analisado em laboratório (variações de mais de 20°C ao longo do dia na camada), entre outros.

De certo, o conhecimento de como os fatores regionais, como o tráfego, temperatura e materiais regionais influenciam este comportamento, fora das condições de contorno estudadas em laboratório, torna-se de grande importância para a adequada previsão do desempenho do pavimento a ser dimensionado.

Assim se origina o presente trabalho, com a perspectiva de conhecimento de como a camada asfáltica irá se comportar ao longo do tempo, sob o efeito de cargas reais, das alterações de temperatura ocorridas ao longo do dia, semana, mês e ano, e seus efeitos nas tensões e deformações ocorridas, de forma a nos subsidiar acerca da adequada utilização do método de dimensionamento para pavimentos.

Tal conhecimento será possível devido ao monitoramento das cargas, deformações e temperatura que ocorrem ao longo do dia, com a implantação de células de carga, “*strain gauges*” e sensores de temperatura, de forma a conhecer a resposta da camada asfáltica para cada carga solicitante, no trecho instrumentado, possibilitando a reconstituição da curva-mestra da camada asfáltica e sua comparação com a obtida em laboratório.

1.1 – JUSTIFICATIVA

A implementação do MeDiNa pelo DNIT passa, na atualidade, por período de calibração, de forma a capacitar o método para ser utilizado em todo o território brasileiro. Ademais, conforme apresentado no Anuário do IPR (Instituto de Pesquisa Rodoviária) em 2022, vários esforços estão em curso, com a implementação de trechos experimentais em vários Estados (Pernambuco (BR-428), Piauí (BR-316), Bahia (BR-116 e BR-235), Mato Grosso do Sul (BR-419) e Maranhão (BR-135)), dentre outros 10 trechos previstos, de forma a fornecer os dados necessários para uma adequada previsão do comportamento dos materiais. Esta pesquisa então proporciona um melhor conhecimento do comportamento dos materiais *in situ*, uma vez que apresenta a comparação entre o comportamento previsto em laboratório e aquele que realmente ocorre no trecho.

Segundo BERNUCCI et. al. (2007), existem técnicas de análise estrutural que permitem modelar os tipos de ruptura (fadiga e deformação) considerados no novo método, baseadas em várias teorias e no conhecimento das propriedades básicas dos materiais. No entanto, mesmo as mais sofisticadas destas técnicas de análise mecânica prescindem de algumas hipóteses simplificadoras e de uma certa “calibração” com dados empíricos, já que o fenômeno a ser modelado é dos mais complexos.

Logo, torna-se imprescindível o aperfeiçoamento das técnicas e estudo dos materiais que compõe o pavimento e o entendimento do comportamento da estrutura no que diz respeito às características regionais de tráfego e clima. Existem vários esforços sendo realizados entre os pesquisadores do comportamento do material asfáltico. Wang et. al (2023) propôs uma abordagem mais precisa para a quantificação da fadiga de ligantes asfálticos, acoplando o mecanismo viscoelástico não

linear na estrutura teórica do Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD), que responde ao comportamento viscoelástico linear, de forma a melhorar seus resultados, já que os modelos de comportamento Nonlinear Viscoelasticity (NLVE) apresentam resultados de fadiga inferiores que os modelos Linear Viscoelasticity (LVE).

Já Queiroz et. al (2023), em seu estudo sobre as propriedades viscoelásticas e fadiga em misturas modificadas com polímero, utilizando o modelo S-VECD, também discretizou o comportamento das misturas por meio de sua curva mestra, e a partir dela calculou os módulos de estocagem e relaxação. Sendo assim, os autores, com os dados de entrada de viscoelasticidade e os dados experimentais de fadiga para tração direta, utilizaram as equações do modelo S-VECD para as misturas estudadas, permitindo a análise dos danos por fadiga durante os ciclos de carregamento e a previsão e definição da falha por fadiga das misturas.

Oliveira (2023) avaliou, em seu estudo, três ligantes asfálticos e três misturas correspondentes, para investigar as relações entre a viscoelástica linear e as propriedades de fadiga de materiais asfálticos, em diferentes escalas de materiais, conclui que a determinação do módulo complexo por meio do modelo reológico, para pequenas deformações e poucos ciclos, apresenta resultados aproximados, como também estabeleceu uma correlação entre a vida à fadiga dos ligantes e suas misturas correspondentes em relação à deformação em níveis necessários para produzir falha após um milhão de ciclos (γ_6 para ligantes asfálticos e ϵ_6 para misturas asfálticas).

Spadoni et al. (2022), que estudou o aproveitamento de materiais poliméricos, como estireno-butadienoestireno (SBS) e etileno vinil acetato (EVA), como modificadores de betume, comparou os desempenhos das misturas, possibilitando estudar as melhorias proporcionadas pelos polímeros as misturas asfálticas, enquanto utiliza o modelo de aproximação S-VECD para avaliação do comportamento das misturas modificadas via método seco e molhado.

Yue et al. (2021), que estudou as propriedades de asfaltos modificados com polímeros em CBUQ avaliando da fadiga e as propriedades de autocura dos betumes pelo ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) e pela definição de falha por fadiga e critérios de falha por fadiga baseados na energia de pseudo-deformação (PSE). Para tanto, discretizou o comportamento das curvas mestras e utilizou seus parâmetros sob o modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD).

Conhecer o comportamento do material asfáltico, que sofre influência da velocidade de aplicação da carga, da temperatura em que será solicitado, dos níveis de tensão aplicados, que governam os regimes de resposta mecânica desta camada, prevalece entre as prioridades dos cientistas da área. Entretanto, também se faz necessário o conhecimento de como estas respostas estimadas em laboratório se desenvolvem em campo.

Um estudo que reforça esta necessidade é o de Cheng et. al. (2022c), que afirma que as diferenças no carregamento dos veículos e das cargas simuladas em laboratório (Uniaxial Compression - UC/For-point Bending – 4PB/Indirect Tensile - IDT) tendem a produzir diferentes módulos, principalmente devido as diferenças das tensões como das frequências que o carregamento real produz. Conhecer esta correlação é necessária para facilitar a escolha apropriada dos módulos de resposta do pavimento quando realizar seu dimensionamento.

SILVA e MOTTA (1999), quando da realização da instrumentação da solução de whitetopping que analisaram, explicitam sobre a necessidade de calibração dos modelos de comportamento muito bem, elencando inclusive que no Brasil existem dois simuladores de tráfego: o carrossel do IPR/DNER, que se encontra fora de operação, e o simulador linear da UFRGS/DAER/RS.

Outra questão também de suma importância a ser estudada é a influência da temperatura nos pavimentos asfálticos, conforme bem detalhado por CAVALCANTE (2005), fator que compromete o sucesso do dimensionamento, caso não seja corretamente considerado. Isto ocorre principalmente devido às grandes temperaturas que ocorrem no pavimento. É necessária a avaliação de como a temperatura influencia grandes espessuras de asfalto. A evolução do método que define a espessura de asfalto de uma tabela, que varia unicamente em função do tráfego, para a determinação por meio de ensaios e modelagem numérica da real espessura de camada asfáltica necessária para suportar as solicitações do tráfego precisa considerar todos os efeitos que governaram o comportamento da camada asfáltica, para um dimensionamento adequado. Este estudo tenta então estabelecer uma aproximação melhor entre a resposta do pavimento quando submetido a diferentes cargas e o realizado em laboratório.

Desta forma, o presente trabalho propôs uma análise do comportamento da estrutura do pavimento e comparação com as respostas esperadas, utilizando o programa computacional de análise tensão/deformação AEMC - Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Portanto, o conhecimento dos regimes que governam o comportamento da camada asfáltica "in situ" e sua comparação com a estimativa do comportamento realizado em laboratório.

1.2 – OBJETIVOS.

1.2.1 – OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve por objetivo principal realizar a determinação da Curva Mestra de Campo da camada asfáltica da BR-101/PE – Contorno do Recife, e compará-la à determinada em Laboratório e demais ensaios inerentes a caracterização mecânica da mistura asfáltica (previsão de desempenho através da vida fadiga e deformação permanente)

1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar mecanicamente a camada asfáltica utilizada na restauração da BR-101/PE;
- Analisar e filtrar os dados dos sensores da instrumentação e tratá-los para conhecer as tensões, deformações, frequência e temperatura e assim, avaliar o comportamento da camada asfáltica em diferentes profundidades;
- Determinar as Curvas Mestras a partir dos resultados de tensões, de deformações, de temperatura e de frequência de aplicações de cargas medidos em campo em um trecho experimental instrumentado, e comparar com os obtidos através dos ensaios em laboratório.
- Avaliar os fatores que influem no comportamento da Curva Mestra de Campo ao compará-la a determinada em Laboratório.

- Avaliar o ganho estrutural proporcionado pelo uso da Geogrelha no reforço estrutural realizado na Restauração da BR-101/PE Contorno do Recife.

1.3 – HIPÓTESES

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi formulada a seguinte hipótese:

“É possível estabelecer os fatores de transferência, laboratório versus campo, inerentes a determinação da Curva Mestra para as misturas asfálticas (previsão de vida fadiga e de deformação permanente) a partir de uma análise comparativa dos resultados de tensões, de deformações, de temperatura e de frequência de aplicações de cargas, obtidos com o auxílio de ensaios em laboratório e os medidos em campo de um trecho experimental instrumentado.”

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em volume único dispondo o conteúdo da seguinte forma:

Capítulo 1, que é composto por Introdução, Justificativa, Objetivos, Hipóteses e Organização do Trabalho.

Capítulo 2, compreendendo a Fundamentação Teórica, onde focou-se nos assuntos mais relevantes ao desenvolvimento do trabalho, como: Comportamento visco-elasto-plástico do material, os fatores que influenciam o comportamento da rigidez do asfalto, sua discretização em modelos matemáticos elásticos e viscosos, os ensaios que norteiam sua determinação, construção de curvas mestras e como influenciam no dimensionamento dos pavimentos.

Capítulo 3, que apresenta todos os materiais e métodos experimentais e/ou ensaios utilizados para caracterização mecânica da camada instrumentada bem como os materiais e equipamentos necessários para a instrumentação do trecho experimental.

Capítulo 4, apresenta os resultados dos sensores, sua caracterização e tratamento estatístico ao longo do período de observação do trecho instrumentado.

Capítulo 5, são realizadas as análises dos dados e a discretização do comportamento da camada asfáltica em curva mestra e comparados os resultados obtidos “in situ” com os determinados em laboratório.

Capítulo 6, apresenta-se as conclusões obtidas na pesquisa e;

Capítulo 7, contém sugestões para pesquisas futuras.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na primeira parte da revisão serão apresentados conceitos que possibilitem compreender conceitualmente o comportamento da rigidez da mistura asfáltica, avançando para a o campo das considerações analíticas deste parâmetro. Desta forma, a rigidez deste material é uma propriedade intrínseca, obtida a partir da curva de tensão vs. deformação, dependente dos equipamentos de medição, do tamanho ou geometria dos corpos de prova.

Lytton (1993) afirma que existem vários tipos de curvas de tensão vs deformação para materiais asfálticos que podem determinar a sua rigidez. Dentre os fatores que influenciam a determinação desta propriedade, destaca-se que a geometria do corpo de prova é uma característica importante, pois determina onde esta propriedade do material pode ser medida, como também define a forma de aplicação do carregamento, interferindo no tipo de rigidez que se irá medir, como também os efeitos da frequência e da temperatura.

Segundo Kim (2009) a rigidez é a propriedade central do desempenho das camadas da mistura asfáltica em pavimentos. Segundo o autor, diversos fatores afetam este parâmetro e seus métodos de mensuração, destacando a importância das deformações nas respostas do pavimento para análise da determinação da vida útil da camada.

Com o objetivo de se determinar a rigidez “*in situ*”, é comum a utilização de sensores imersos no material asfáltico (células de carga, “*strain gauges*” e sensores de temperatura), para melhor compreender quais parâmetros que interferem na medida desta propriedade intrínseca do material asfáltico, e suas influências no comportamento mecânico das camadas asfálticas, como também sua importância, na tentativa de melhorar as previsões das respostas do pavimento ao efeito do tráfego.

2.1 - Carregamentos em pavimentos

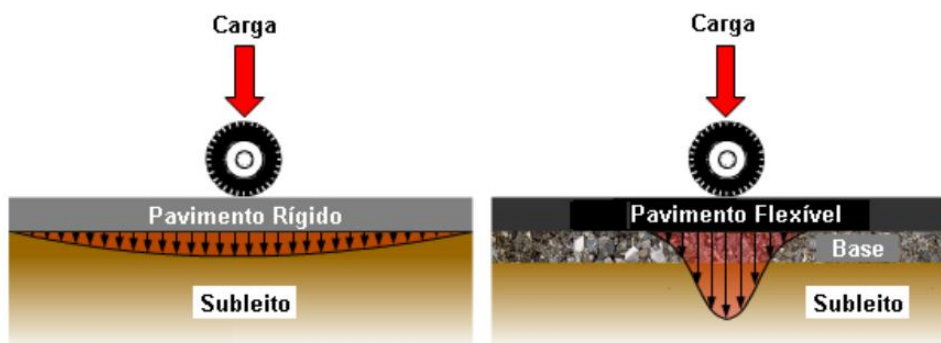
Uma vez que o desempenho do material asfáltico é medido quando da execução da camada asfáltica de um pavimento rodoviário, tem-se que, por definição, os pavimentos rodoviários são estruturas compostas por múltiplas camadas capazes de suportar as variações de cargas e intempéries. Além disso, devem atender a critérios de desempenho, tais como, durabilidade, impermeabilização, conforto, entre outros (Ziegler, 2021).

De acordo com Colpo (2019), outro fator importante a ser analisado são os tipos de carregamentos impostos sobre o pavimento. Ziegler (2021) afirma que enquanto obras de engenharia voltadas a edificações residenciais e comerciais possuem maior preocupação com as cargas fixas, na engenharia rodoviária as cargas mais importantes são as cargas móveis. Estas que são compostas por cargas cisalhantes, de compressão e de tração, geradas pela passagem dos eixos dos veículos.

Dentre as estruturas possíveis para constituir os pavimentos, pode-se classificá-las em rígidas e flexíveis. Onde os pavimentos rígidos são aqueles compostos por placas de Concreto de Cimento Portland (CCP), e os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por revestimento asfáltico em uma estrutura de múltiplas camadas granulares adjacentes (Queiroz, 2018).

Bernucci *et al.*, (2022) afirmam que devido a sua elevada rigidez em relação as demais camadas, os pavimentos de CCP, possuem cargas de superfície distribuídas em uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, o que diminui as cargas transmitidas para as camadas inferiores. Já nos pavimentos flexíveis, a rigidez do pavimento em relação às demais camadas não é tão elevada, fazendo com que haja uma maior transmissão das cargas para as camadas inferiores. Os efeitos práticos destes tipos de transmissão de cargas podem ser vistos na Figura 2.1.

Figura 2. 1: Transmissão de cargas em pavimentos rígidos x flexíveis



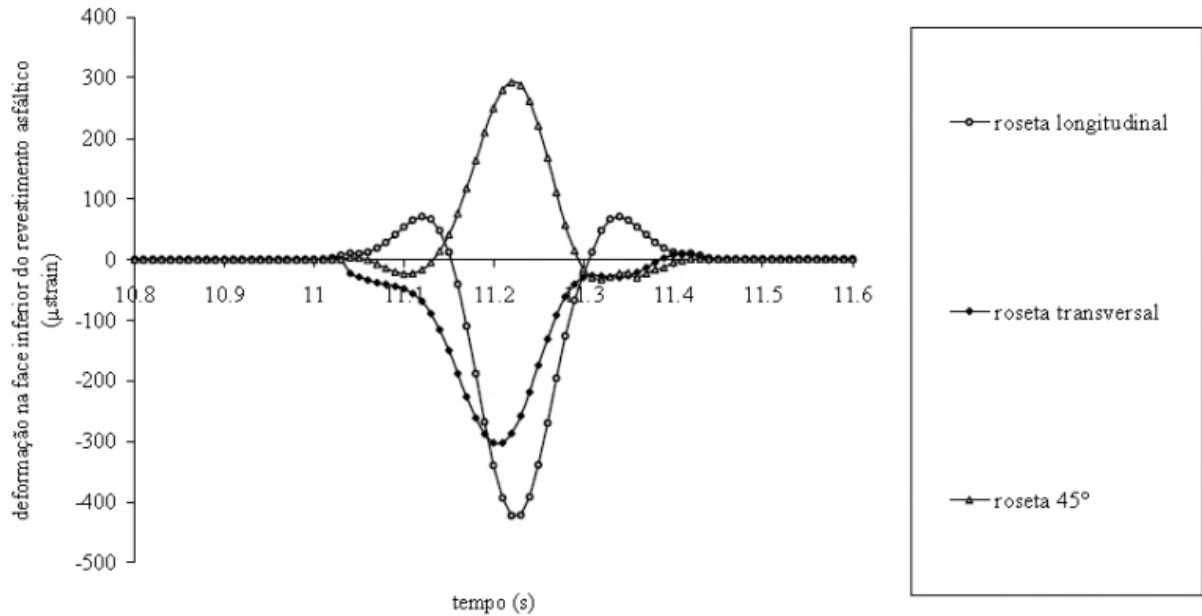
Fonte: (Bernucci *et al.*, 2007)

Ziegler (2021) afirma ainda que, devido à maior distribuição de esforços entre as diferentes camadas dos pavimentos asfálticos, existe uma maior preocupação em definir as deflexões, deslocamentos, que propiciem uma melhor interação entre elas. Esta metodologia é chamada de compatibilização de camadas e é amplamente utilizado para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis.

A mensuração destes níveis deflectométricos não é obtida de maneira simples, seja em laboratório ou em campo, devido às incertezas das propriedades e comportamento que envolvem a natureza dos solos e dos pavimentos flexíveis. Em laboratório, por muitos anos, dimensionou-se a resistência dos solos por meio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) associada a ábacos de dimensionamento e, mais recentemente, com uso do ensaio de módulo de resiliência, buscando-se uma solução elástica para o dimensionamento de pavimentos asfálticos.

Nota-se uma necessidade de compreender as características de desempenho dos materiais em campo, para um melhor entendimento sobre como as solicitações sobre o pavimento se comportam na prática. Gonçalves (2002) utilizou a técnica da instrumentação, onde foram instalados "strain gauges" para leitura de deflexões, nas direções transversal, longitudinal e a 45° do sentido da passagem do eixo. Estas direções foram escolhidas para se aproximarem das direções principais e o "strain gauge" a 45° é utilizado para validar as medidas transversais e longitudinais. A Figura 2.2 demonstra algumas deformações medidas pelo autor. Foi observado que as leituras dos "strain gauges", na direção transversal, possuem apenas esforços de tração, enquanto os longitudinais possuem tanto esforços de tração como de compressão.

Figura 2. 2: Deformações medidas no revestimento do pavimento asfáltico



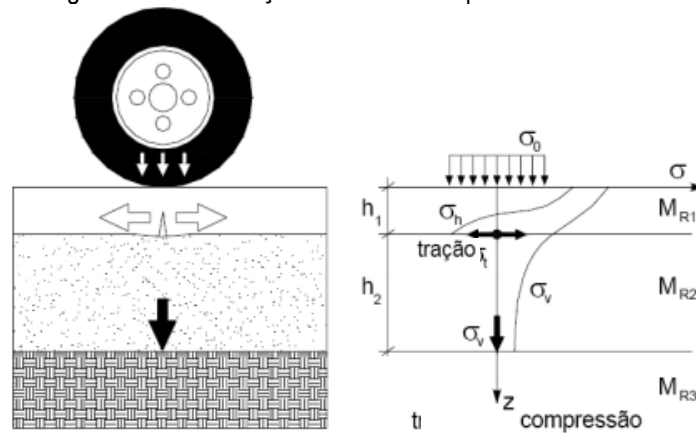
Fonte: (Gonçalves, 2002)

Segundo Kim (2009) a importância no conhecimento das deformações de modo acurado é essencial. O autor afirma ainda que da mesma forma que o Módulo Elástico (Young) é parâmetro para a determinação da deflexão das barras metálicas em estruturas, a rigidez da mistura asfáltica é crítica para determinar o comportamento das estruturas de pavimento, sendo constituído de materiais de comportamento muito complexo, apesar do fato de que são comuns.

2.2 - Desenvolvimento das tensões nos pavimentos

De acordo com Medina e Motta (2015) as tensões desenvolvidas nas estruturas do pavimento iniciam-se no topo da fibra do revestimento devido às solicitações verticais repetidas dos veículos. Consequentemente, surgem tensões de compressão na fibra superior e de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica, como ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2. 3: Distribuição de tensões no pavimento asfáltico



Fonte: (Medina e Motta, 2015)

A continuidade do ciclo de carregamento e descarregamento permite o desenvolvimento do fenômeno de fadiga do revestimento, provocando sua deterioração devido ao surgimento inicial de micro trincas na sua base, que posteriormente, com a continuidade das solicitações do tráfego, se propagam até o topo, ocasionando sua ruptura (Medina e Motta, 2015).

Também de acordo com a Figura 2.3, pode-se observar que os veículos geram uma carga de compressão sobre as camadas inferiores ao revestimento asfáltico, o que também podem ocasionar danos pelo afundamento da estrutura.

2.3 - Fatores que Influenciam o Comportamento da Rigidez da Mistura Asfáltica

A aplicação de cargas de tráfego gera tensões cisalhantes, de compressão e de tração, que provocam sua deterioração com o passar do tempo. Entretanto, associado ao carregamento por cargas móveis, a camada asfáltica sofre influência em seu comportamento devido aos fatores relatados, por Lytton (2000), dentre os quais pode-se destacar a taxa de carregamento, a temperatura, seu estado de tensão, os agregados constituintes, as propriedades do ligante asfáltico, o filer e o volume de vazios, sendo importante conhecer como esta influência ocorre.

2.3.1 – Temperatura e Frequência de Carregamento

A rigidez da camada asfáltica depende diretamente da temperatura e da taxa de carregamento. De acordo com Kim (2000), para qualquer temperatura, a mistura asfáltica irá deformar lentamente e permanentemente se seu carregamento ocorrer sob baixas frequências, enquanto, se o carregamento ocorrer rapidamente, ele apresentará comportamento de maior rigidez e estará mais susceptível a fratura. Para qualquer frequência de aplicação da carga, haverá uma temperatura acima da qual o material irá relaxar rápido o suficiente sem o acúmulo de deformações ao corpo de prova. Este comportamento dará subsídio ao efeito da superposição tempo-temperatura do ensaio de Módulo Dinâmico.

2.3.2 – Estado de Tensão

Kim (2000) afirma que o estado de tensão e deformação a que a camada está submetida altera sua rigidez. Lytton (2000) então apresenta que, devido a forma das partículas e da compactação da mistura asfáltica, é possível afirmar que o material asfáltico seja anisotrópico, apresentando um módulo vertical, um módulo horizontal e um módulo cisalhante. Sendo assim, seus valores de rigidez variam diretamente com a forma com a qual o estado de tensão ocorre.

2.3.3 – Agregados

Segundo Lytton (2000), a principal razão para a apresentação de anisotropia para a camada asfáltica deriva da forma dos agregados utilizados na sua formulação. Quando compactados, os agregados tendem a se reorganizar e assumir a posição plana, resultando em um módulo que é maior na direção vertical que na direção horizontal.

2.3.4 – Propriedades dos Ligantes Asfálticos

As propriedades dos ligantes influenciam diretamente a previsão a rigidez das camadas asfálticas. Conforme Kim (2000), as principais propriedades do asfalto que afetam a rigidez da mistura asfáltica são sua resposta a uma tensão constante, espessura do filme asfáltico que envolvem os agregados, o grau de envelhecimento e sua resposta a ação deletéria da água. Com relação a conformidade, destaca-se que quando esta tensão é aplicada constante em um único sentido, as deformações se elevam com o tempo após a aplicação da carga, que indicaria sua fluência. Desta forma, cada característica desta, intrínseca do ligante asfáltico, influencia diretamente o comportamento da camada asfáltica.

2.3.5 – Fíler

Lytton (2000) descreve que o Fíler corresponde as partículas menores que a peneira #200, com diâmetros menores que 0.075mm. Afirmo o autor que eles correspondem a aproximadamente metade do volume do “mastique” (mistura entre o filer e o ligante asfáltico). A rigidez da camada é diretamente afetada por como quão bem estes finos interagem com o ligante asfáltico, ao seu tamanho e distribuição na mistura e o quanto estes finos estão dispersos no ligante.

2.3.6 – Volume de Vazios

Volumes de vazio podem ser descritos como pequenas partículas presentes na mistura com rigidez igual a zero. Quando da dosagem da Mistura Asfáltica busca-se prover a massa da melhor combinação deste fator, pois uma grande quantidade de vazios acelera as micro trincas, e uma quantidade muito pequena de vazios pode causar exsudação e promover grandes deformações plásticas.

2.4 - Teorias Sobre Tensões e Deformações dos Materiais Constituintes do Pavimento

Uma vez compreendido quais os tipos de pavimentos são comuns na pavimentação rodoviária, como as cargas geram esforços em seus materiais, quais fatores interferem no comportamento da rigidez das camadas asfálticas e de como esforços espelham eventos que norteiam os critérios de dimensionamento para pavimentos novos (trincamento e afundamento de trilha de rodas), este tópico dará subsídio a compreender como houve a evolução das teorias do comportamento mecânico das misturas.

Chen *et al.* (2022) avaliam o desempenho dos materiais constituintes dos pavimentos por meio do conhecimento do comportamento de seus elementos, tanto individualmente quanto em conjunto, sendo o Módulo de Resiliência do asfalto influenciado pelas propriedades do ligante, interação do agregado pétreo e os vazios da mistura.

A teoria da elasticidade foi a primeira a ser utilizada, aplicada para estudar a resposta do pavimento assumindo que os materiais que o compõem apresentam comportamento unicamente elástico. Esta consideração tem suas restrições, pois a teoria da elasticidade funciona bem enquanto a relação tensão-deformação é constante, no entanto, sabe-se que os materiais constituintes do pavimento não seguem precisamente esta relação (Medina e Motta, 2015).

Segundo Huang (1993), a consideração do comportamento elástico dos materiais constituintes do pavimento só se torna adequada enquanto estes materiais são submetidos a tensões menores que a tensão de ruptura. As formulações matemáticas derivadas da teoria da elasticidade consideram tanto que

o material mantém uma relação tensão-deformação constante, como que as tensões aplicadas estão dentro da faixa deste comportamento, entretanto, adotam pressupostos diferentes para as propriedades dos materiais e geometria.

2.5 - Equação de Boussinesq

Segundo Cavalcante (2005), em 1885, o cientista francês Joseph Boussinesq, publicou o trabalho “*Application des Potentiels a l’Etude de l’Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*”, desenvolvendo um sistema de equações para o cálculo das tensões e deformações, assumindo as hipóteses de que o material é homogêneo, isotrópico, semi-infinito e de comportamento elástico-linear obedecendo à Lei de Hooke, para a aplicação de uma carga pontual agindo perpendicularmente na superfície do maciço.

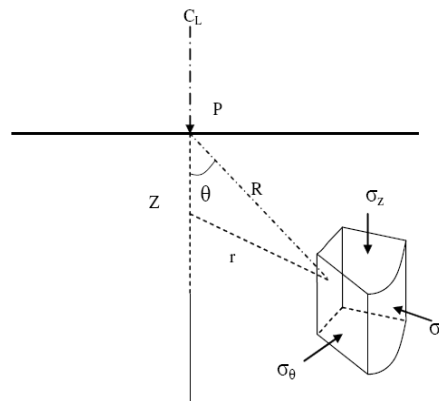
Com base na teoria da elasticidade, Boussinesq desenvolveu equações para calcular tensões dentro de um semi-espaço homogêneo, isotrópico, linearmente elástico, sob um ponto de carga agindo perpendicularmente à superfície. Este semi-espaço foi considerado como uma área infinitamente grande a uma profundidade infinita. Segundo Huang (1993), Boussinesq determinou o valor da tensão em um ponto de uma estrutura composta de um material homogêneo, isotrópico e linearmente elástico por meio da Equação (01):

$$\sigma_z = \frac{P(3z^3)}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} = \frac{(3P/2\pi)}{z^2 \left(1 + \frac{r^2}{z^2}\right)^{5/2}} \quad \text{Equação 01}$$

sendo P = carga aplicada, z = profundidade do ponto estudado, r = distância horizontal entre o ponto de carga e o ponto estudado.

Boussinesq desenvolveu também outras equações para calcular as deformações, tensões normais e deslocamentos em um material elástico carregado como mostrado na Tabela 2.1 e na Figura 2.4. Pode ser observado, a partir da Tabela 2.1 que as tensões normais, deslocamentos, deformação tangencial e deformação radial dependem do coeficiente de Poisson e/ou do módulo de elasticidade (E), enquanto a tensão vertical e deformações principais são independentes destes parâmetros.

Figura 2. 4: Notação de Boussinesq para a equação.



Fonte: (HUANG, 1993)

Tabela 2. 1: Equações de Boussinesq para um Ponto de Carga.

<p>Tensões Normais</p> $\sigma_z = \frac{3P}{(2\pi R^2)} \cos^3 \theta$ $\sigma_r = \frac{3P}{(2\pi R^2)} \left(3 \cos \theta \sin^2 \theta - \left(\frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right) \right)$ $\sigma_t = \frac{3P}{(2\pi R^2)} (1-2\nu) \left(-\cos \theta + \left(\frac{1}{1+\cos \theta} \right) \right)$ $\sigma_v = \frac{1}{3} (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_t) = \frac{P}{(3\pi R^2)} (1+\nu) \cos \theta$ <p>Tensões Cisalhantes</p> $\tau_{rz} = \frac{3P}{(2\pi R^2)} \cos^2 \theta \sin \theta$ $\tau_{rt} = \tau_{zt} = 0$	<p>Deformações Normais</p> $\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} (3 \cos^3 \theta - 2\nu \cos \theta)$ $\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} \left(-3 \cos^3 \theta - (3-2\nu) \cos \theta - \left(\frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right) \right)$ $\varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} \left(-\cos \theta + \left(\frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right) \right)$ $\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} (1-2\nu) \cos \theta$ <p>Deslocamentos</p> $d_z = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} (2(1-\nu) + \cos^2 \theta)$ $d_r = \frac{(1+\nu)P}{(2\pi ER^2)} \left(\cos \theta \sin \theta - \frac{(1-2\nu) \sin \theta}{1+\cos \theta} \right)$ $d_t = 0$
--	---

Fonte: HUANG, 1993.

Verifica-se, portanto, que para a utilização da teoria da elasticidade foram adotadas restrições, tanto na aplicação da carga, quanto aos materiais solicitados (semi-espaço homogêneo, isotrópico, linearmente elástico, sob um ponto de carga agindo perpendicularmente à superfície), de forma a subsidiar a implementação da teoria da elasticidade para o comportamento mecânico do pavimento.

Uma evolução desta metodologia foi promovida por Westergaard, que derivou a equação de tensões sobre um ponto carregado em um espaço semi-infinito, elástico e homogêneo com coeficiente de Poisson igual a zero.

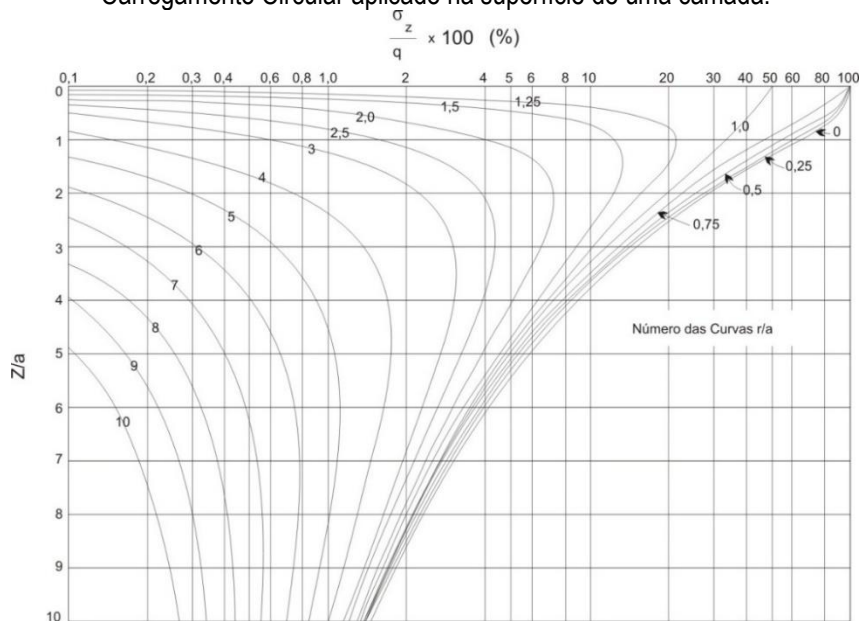
Quando estudadas as respostas fornecidas pelas equações de Boussinesq e comparando-as às de Westergaard, ambas tendem a convergir para o mesmo valor de tensões para $r/z \geq 1,5$; já para valores de $r/z < 1,5$ as equações de Boussinesq fornecem valores superiores que as equações de Westergaard (Huang, 1993).

De forma a melhor compreender a forma com que Boussinesq desenvolveu sua teoria, Huang (1993), afirmou que a teoria de Boussinesq é mais realista para tensões em materiais granulares assumindo a variável módulo de deformabilidade, que varia em função da mudança da pressão confinante. Esta hipótese considera que o módulo do material aumenta com o aumento das tensões a que está submetido.

A solução de Boussinesq foi estendida por diferentes pesquisadores para várias condições de carregamento diferentes. Pode-se citar como exemplo, a solução para uma área circular carregada, que pode ser obtida através da integração da solução de Boussinesq para um ponto de carga.

Outra forma de obtenção das soluções é pelo método das linhas de influência, que fornecem as soluções para tensões e deformações em ábacos que foram desenvolvidos aplicando simplificações para as condições existentes, como visto na Figura 2.5. Estas hipóteses permitem, segundo Foster e Ahlin (1954) *apud*. Alkasawneh (2007) desprezar o coeficiente de Poisson, ou o considerar, visto que possui relativamente pouco efeito sobre a deformação e as tensões na teoria do semi-espaco elástico.

Figura 2. 5: Linhas de Influência para Determinação da Tensão Vertical em um Ponto Devido a um Carregamento Circular aplicado na superfície de uma camada.



Fonte: (HUANG, 1993)

2.6 – Breve Histórico Acerca das Teorias das Camadas Elásticas

A teoria das camadas elásticas foi um método inicialmente proposto por Burmister (1945), como um esforço para resolver as limitações do método de Boussinesq. Nesta situação, o autor simplificou as condições entre duas camadas supondo que todas as camadas são isotrópicas, elásticas e homogêneas. A camada superior, em um sistema de duas camadas, foi assumida como infinita em extensão, na direção horizontal, mas finita em espessura no sentido vertical. A camada inferior, em um sistema de duas camadas, foi assumida como sendo de extensão infinita tanto no sentido horizontal como vertical.

Além disso, Burmister (1945) presumiu que as tensões e deformações normais fora dos limites da superfície carregada eram iguais a zero. A continuidade das condições ao longo da interface entre as camadas foi considerada utilizando dois casos. No primeiro caso, a plena continuidade de deformações e

de deslocamentos em toda a interface foi considerada assumindo pleno contato entre as duas camadas e possuindo resistência ao cisalhamento total. No segundo caso, a continuidade normal das tensões e deslocamentos normais só foi considerada assumindo uma interface sem atrito entre as camadas.

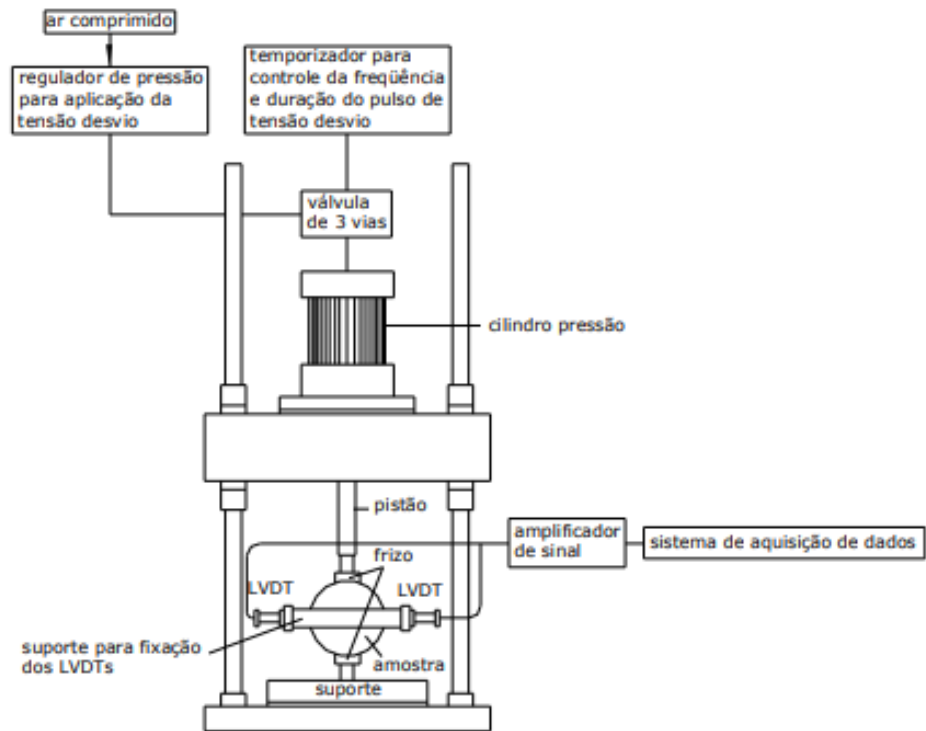
De forma a melhorar o método utilizado para duas camadas, Burmister estendeu a sua teoria para sistemas de três camadas ao derivar unicamente a equação do recalque da superfície do terreno. Segundo Huang (1993), baseados na teoria de Burmister, Acum e Fox derivaram uma solução de forma fechada para a interface das tensões abaixo do centro circular da área carregada. Em Schiffman (1962) desenvolveu uma solução para sistemas de multicamadas elásticas, que foi utilizado por muitos pesquisadores para desenvolver os programas de computador para análise do comportamento do pavimento.

Segundo Cavalcante (2005), mesmo com esta evolução, o comportamento real do pavimento e as condições de contorno são diferentes do comportamento retratado na teoria de camadas múltiplas elásticas. Os materiais do pavimento ocupam uma largura finita e não têm uma espessura constante. Afirma ainda que as variações da geometria do material e descontinuidades locais não são consideradas quando se utiliza este método. Além disso, idealizar a mistura asfáltica e o solo como materiais homogêneos, elástico-lineares e isotrópicos está longe de ser o real comportamento desses materiais. O ligante asfáltico tem um comportamento viscoelástico, enquanto materiais granulares têm um comportamento predominantemente não-linear.

2.7 – Definição de Módulo de Resiliência (M_r) em misturas asfálticas

De forma a consolidar toda a teoria elástica considerada até o momento, tem-se a definição do Módulo de Resiliência do material, determinado por meio de ensaio especial específico seguindo as especificações da norma DNIT ME 135/2018. O ensaio consiste basicamente na utilização de um equipamento composto de uma prensa, um sistema pneumático que controla o tempo e a frequência de aplicação da carga, um sistema que mede deslocamento horizontal do diâmetro de um corpo de prova quando empregado uma carga e um sistema de temperatura, na Figura 2.6 está ilustrado a aparelhagem do ensaio.

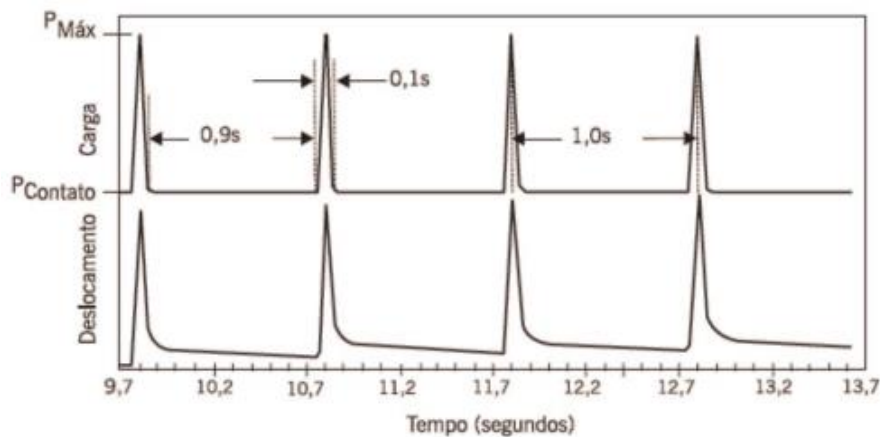
Figura 2. 6: Aparelhagem para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas.



Fonte: NORMA DNIT 135/2018 - ME

A frequência de aplicação de carga é de 1 Hz, ou seja, 60 ciclos por minuto, sendo 0,10 segundo de aplicação de carga e 0,90 segundos de descanso, como verificado na Figura 2.7. Os deslocamentos horizontais são registrados, mostrando uma parcela elástica, uma parcela viscosa e uma parcela plástica, logo o módulo de resiliência do corpo de prova ensaiado é definido como a média dos valores calculados para os vários deslocamentos medidos considerando apenas a parcela elástica da deformação do corpo de prova.

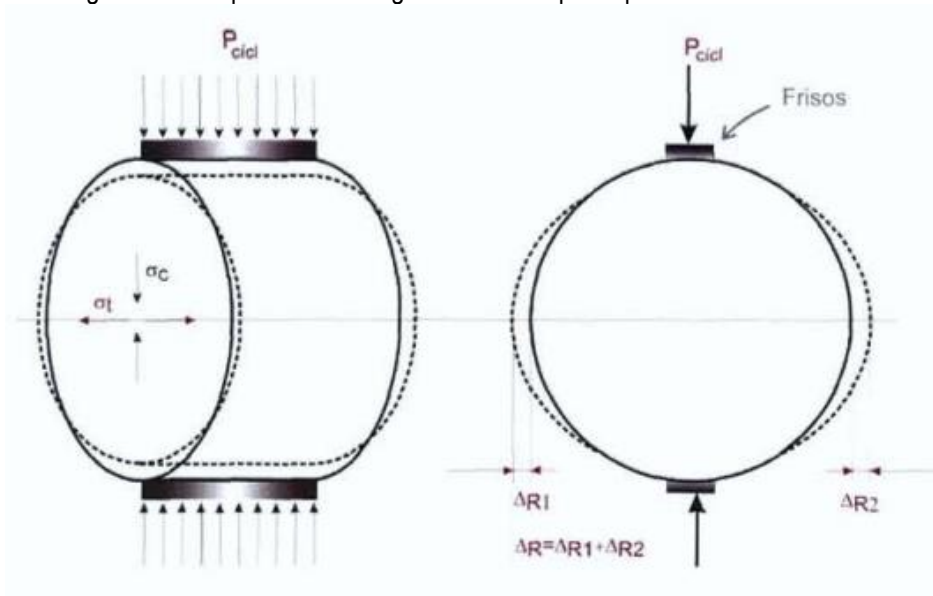
Figura 2. 7: Duração dos tempos de carregamento e repouso.



Fonte: NORMA DNIT 135/2018 - ME

Dada a dispersão inerente de misturas asfálticas deve-se ensaiar ao menos três corpos-de-prova para cada mistura. O estado de tensão que se desenvolve em um corpo-de-prova tanto no plano horizontal como vertical quando submetido à compressão diametral é apresentado na Figura 2.8.

Figura 2. 8: Esquema do carregamento do corpo de prova no ensaio de MR.



Fonte: Pesquisa CONCEPA/ANTT, 2008.

O módulo de resiliência (M_r) de misturas asfálticas obtido pelo ensaio de compressão diametral (tração indireta) é dado pela razão da tensão de tração normal ao plano vertical diametral e a respectiva deformação específica no plano diametral horizontal sendo expresso pela Equação 02.

$$M_r = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_{tr}} \quad \text{Equação 02}$$

A deformação específica num ponto distante de x do centro é dada pela Equação 03:

$$\varepsilon_x = \frac{2F}{E \cdot \pi t d} \left[\frac{4d^4 - 16d^2x^2}{(d^2 - 4x^2)^2} + (1 - \mu) \right] \quad \text{Equação 03}$$

Sendo:

ε_x : deformação específica

F : força vertical aplicada através do friso à geratriz do cilindro

E : módulo de elasticidade do material (M_r para solicitações dinâmicas)

t : altura do corpo-de-prova cilíndrico

x : abscissa – distância horizontal ao centro do corpo-de-prova

μ : coeficiente de Poisson

d : diâmetro do corpo-de-prova

A integração no intervalo de $(-d/2, +d/2)$ de ε_x permite calcular o deslocamento total, Δ , na horizontal.

Para $d = 10,16$ cm tem-se a Equação 04:

$$\Delta = \frac{F}{E \cdot t} (\mu + 0,2734) \quad \text{Equação 04}$$

Sendo:

Δ : deslocamento total

E : módulo de elasticidade (M_r para solicitações dinâmicas)

t : altura do corpo-de-prova

O módulo então será, portanto:

$$E = \frac{F}{\Delta.t} (\mu + 0,2734)$$

De forma prática a aplicação da carga ocorre por meio de um friso de 1,27 cm, resultando, segundo Medina (1997), na expressão a seguir:

$$E = \frac{F}{\Delta.t} (0,9976.\mu + 0,2692)$$

Os módulos calculados pelas duas expressões apresentam uma diferença menor que 10%, em vista da variação do coeficiente de Poisson de 0,2 a 0,3 (Medina, 1997).

A tensão de tração normal horizontal, no plano diametral solicitado é dada pela Equação 05, onde também é utilizada para calcular a resistência a tração estática (DNER ME 138/94).

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d} \quad \text{Equação 05}$$

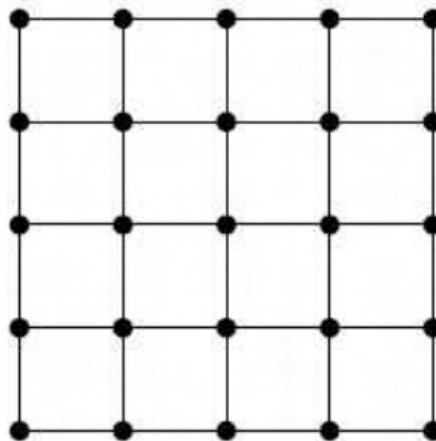
Em que para corpos-de-prova com diâmetro de 10 cm tem-se:

$$\sigma_t = 0,0636 \frac{F}{t}$$

2.8 – Métodos Computacionais

Com a utilização dos computadores para auxiliar nas formulações matemáticas do comportamento dos materiais, houve a implementação do Método dos Elementos Finitos (MEF), que tem sido utilizado para estudar as respostas dos pavimentos flexíveis utilizando qualquer lei constitutiva do material (tanto elástica quanto visco-elástica). No MEF, a geometria em estudo é discretizada em pequenos elementos ligados por nós para assemelhar a geometria real ou domínio, conforme Figura 2.9. Aplica-se então as leis constitutivas que regem o comportamento do material, as tensões e deformações podem ser calculadas.

Figura 2. 9: Exemplo de malha estruturada utilizada no MEF.



Fonte: ALKASAWNEH (2007)

A modelagem mais prática usando o MEF envolve apenas a análise bidimensional da seção do pavimento devido ao custo, tempo e limitações da modelagem associada à análise tridimensional. A análise tridimensional envolve a discretização do domínio utilizando técnicas sofisticadas que afetam o tempo e os custos necessários para o estudo das respostas do pavimento. A análise bidimensional pressupõe equilíbrio axissimétrico das condições que limitam a simulação de toda geometria onde ocorrem descontinuidades (Alkasawneh, 2007).

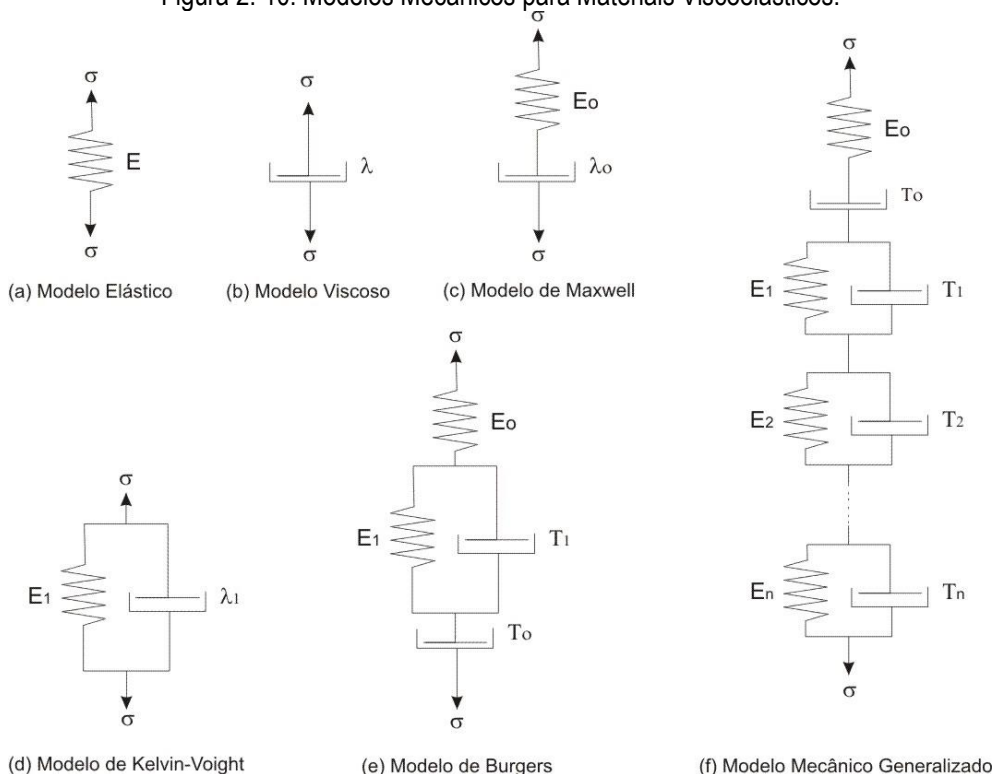
2.9 – Método Viscoelástico

Para a melhoria dos modelos constitutivos do comportamento dos materiais associada a melhoria da capacidade computacional para realização, tanto de ensaios quanto dos cálculos das respostas dos materiais, deu-se início a introdução dos conceitos relativos ao comportamento viscoelástico dos materiais.

Segundo Huang (1993) as deformações nos materiais podem ser elásticas, plásticas, viscosas e viscoelásticas. Com base no comportamento físico, estas deformações podem ser categorizadas como processos de armazenamento de energia e processos de dissipação viscosa.

Tem-se que o comportamento viscoelástico é dependente do tempo, enquanto deformações elásticas podem ser independentes deste fator. Huang (1993) ainda afirma que materiais plásticos são ligeiramente viscosos, mas, por simplificação, seu comportamento pode ser considerado independente do fator tempo. Desta maneira os modelos viscoelásticos são compostos por diferentes partes, representados por molas e amortecedores, conforme ilustrado na Figura 2.10:

Figura 2. 10: Modelos Mecânicos para Materiais Viscoelásticos.



Fonte: HUANG, 1993.

O elemento mola representa a parcela elástica do material. O elemento amortecedor representa a parcela viscosa, produto do processo de dissipação da energia, que ocorre como um resultado do movimento relativo entre as partículas. Este movimento induz atrito onde existir contato entre os elementos ou amortecimento viscoso se este for um fluido intersticial.

2.10 – Teoria das camadas viscoelásticas

Segundo Pellinen (2003a) o dimensionamento de pavimentos utilizando a teoria da elasticidade pressupõe o conhecimento de dois parâmetros para cada camada do pavimento, o módulo elástico e o coeficiente de Poisson. Com a evolução da compreensão do comportamento dos materiais, saindo da consideração do comportamento elástico (linear ou não-linear), para uma consideração viscoelástica, fez-se necessário o conhecimento mais detalhado não somente dos materiais, mas também de quais cargas e de como elas atuam, quando da solicitação de materiais viscoelásticos.

Para isso é utilizada a análise mecânica dinâmica. Conforme Clyne *et. al.* (2003), em 1962, Papazian realizou ensaios aplicando tensão sinusoidal a uma frequência determinada e mediu a resposta em forma de extensão sinusoidal à mesma frequência, concluindo que seria possível aplicar os conceitos de viscoelasticidade na caracterização de misturas.

Pellinen (2003a) descreve que o módulo dinâmico foi escolhido para caracterizar misturas asfálticas no AASHTO 2002 *Guide for the Design of Pavement Structures*, desenvolvido no projeto NCHRP 1-37A, da Universidade do Arizona. Neste documento é destacado que o módulo dinâmico irá substituir o módulo resiliente, frequentemente utilizado para o dimensionamento de pavimentos.

A análise mecânica dinâmica é uma importante técnica para medir tanto as propriedades mecânicas quanto as viscoelásticas de materiais, no qual determina-se seu comportamento mensurando o módulo visco-elástico. Este, como uma função de tempo ou de temperatura, fornece informações sobre as transições de fase, sendo possível medir a dependência da resposta ao estímulo mecânico.

Esta análise consiste em aplicar uma tensão ou deformação mecânica oscilatória senoidal de baixa amplitude, em materiais asfálticos, medindo-se a deformação sofrida ou a tensão resultante. Portanto, quando aplicada uma carga oscilatória senoidal em um corpo de prova, as deformações medidas em resposta apresentaram uma variação também cíclica e senoidal, mas é possível visualizar que a deformação de resposta sempre apresentará defasagem de tempo entre a carga aplicada e sua resposta, ilustrado na Figura 2.11.

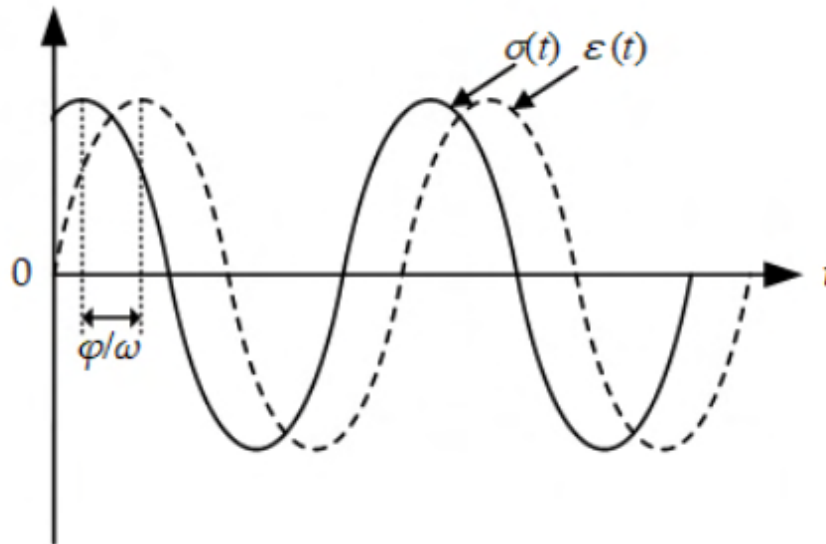
Segundo Pellinen (2003a), foram os números complexos que forneceram uma ferramenta conveniente para resolver as questões relacionadas o comportamento viscoelástico de camadas asfálticas sob efeito de cargas cíclicas. O carregamento unidirecional sinusoidal pode ser representado segundo a Equação 06:

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad \text{Equação 06}$$

Que resulta na deformação apresentada pela Equação 07

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad \text{Equação 07}$$

Figura 2. 11: Curvas de tensão e deformação em um ensaio de módulo complexo



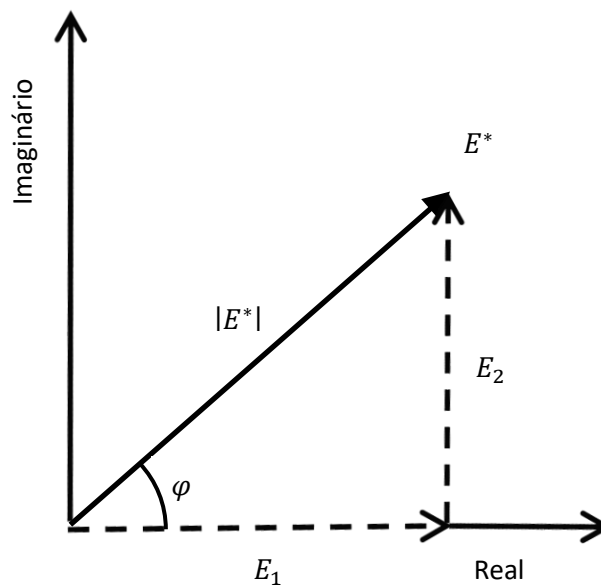
Fonte: NORMA DNIT 416/2019 – ME

O módulo complexo $E^*(i\omega)$ é definido pela Equação 08:

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) e^{i\varphi} = E_1 + iE_2 \quad \text{Equação 08}$$

No plano complexo, a parte real do módulo complexo é chamado estocagem, ou módulo elástico E_1 enquanto a parte imaginária representa a perda ou o módulo viscoso E_2 , ilustrado na Figura 2.12. Para um material elástico tem-se que ângulo $\varphi = 0$, enquanto um material viscoso apresenta um ângulo $\varphi = 90^\circ$.

Figura 2. 12: Plano complexo dos módulos.



Fonte: KIM (2009)

As proporções das amplitudes da relação tensão e deformação definem o módulo dinâmico (ou cíclico). De acordo com Di Benedetto e Roche *apud*. Pellinen (2003a):

“A palavra dinâmico deve ser usada em ensaios com efeitos de inércia não desprezíveis (quando da propagação da onda, por exemplo). Logo, um ensaio de módulo complexo não é um ensaio dinâmico, mas um ensaio cíclico com repetição de cargas e, portanto, interpretado como um ensaio estático. Entretanto o autor utiliza a palavra dinâmico como é utilizado tradicionalmente na literatura dos Estados Unidos”.

2.11 – Definição de módulo dinâmico ($|E^*|$)

Segundo Moreno *et al.* (2015) é de grande importância a compreensão do módulo dinâmico. Uma vez que parte da compreensão de que o comportamento da estrutura do pavimento sob uma carga pré-determinada depende não só da rigidez do pavimento betuminoso, mas também da rigidez das demais camadas. O autor destaca ainda que grande parte das deformações sofridas pelo pavimento são influenciadas pela camada asfáltica, devido a sua localização na estrutura e elevada rigidez, em comparação com solos e materiais granulares. Além disto, o revestimento é quem mais sofre diminuição da sua rigidez como consequência dos danos acumulados devido a passagem das cargas, talvez com exceção quando do uso de camadas tratadas com cimento.

Por esta razão, uma correta interpretação de como ocorrem as deformações na estrutura quando solicitada é requerida para se compreender como ocorre o fenômeno da fadiga na mistura. Esta fadiga do pavimento pode ser quantificada a partir da comparação de ambos os valores de deformação (medida versus teórica sem fadiga) ou, de maneira mais clara, a partir da comparação da rigidez aparente do pavimento betuminoso com aquela que corresponderia se as misturas betuminosas não estivessem fadigadas.

Moreno *et al.* (2015) conclui que a rigidez aparente pode ser estimada utilizando técnicas de cálculo inverso enquanto a rigidez teórica sem fadiga requer o conhecimento do módulo dinâmico das misturas betuminosas para a frequência representativa da carga aplicada. Daí a importância do módulo dinâmico das misturas betuminosas e o interesse em poder estimá-lo com alguma confiabilidade.

O módulo dinâmico ($|E^*|$) é definido como a razão entre a tensão dinâmica máxima induzida (σ_0) e a deformação específica máxima recuperável (ε_0), conforme apresentado na Equação 09.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 09}$$

A determinação da curva mestra da mistura asfáltica é realizada a partir dos resultados de ensaios para determinação do módulo dinâmico. O ensaio de módulo dinâmico foi originalmente desenvolvido pela *Ohio University* (EUA) no início da década de 1960. Em 1979, este ensaio axial foi adotado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como método padrão para sua determinação e em 2002 foi adotado pelo *AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures* como o parâmetro para caracterizar misturas asfálticas. Uma completa caracterização da mistura asfáltica requer a construção da curva mestra, que define o comportamento viscoelástico linear do material como função da temperatura e da frequência de aplicação da carga. De posse dos pares de temperatura, módulo dinâmico e frequência de aplicação da carga pode ser determinada a equação para estimar o módulo

dinâmico, que será utilizada nos métodos de dimensionamento de pavimentos como uma aproximação inicial da rigidez da camada asfáltica.

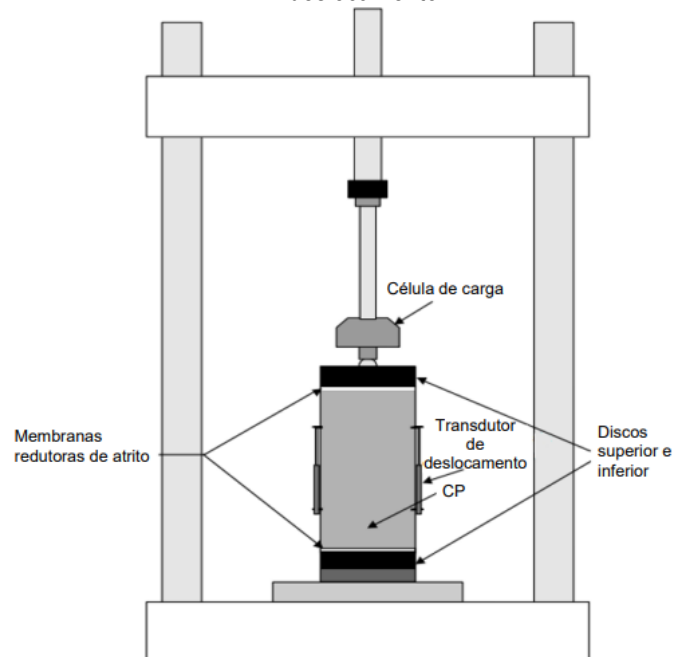
O ensaio de módulo dinâmico foi concebido para estimar as propriedades viscoelásticas lineares dos materiais do pavimento. Dessa forma, o módulo dinâmico é o número complexo que associa à tensão e deformação de um material viscoelástico linear sob carregamento senoidal contínuo no domínio da frequência. Para isto, é exigido que as deformações que irão ocorrer nos corpos-de-prova estejam entre 50 e 75 micras, como também, devem ser descontadas as deformações plásticas, por meio da redução da taxa de acumulação de deformação plástica do transdutor utilizado.

Os métodos de teste da ASTM requerem uma relação altura/diâmetro da amostra de 2:1 com um diâmetro mínimo de 10 cm. Vale ressaltar que o diâmetro deve ser no mínimo 4 vezes o diâmetro nominal máximo do agregado da mistura, caso os corpos de provas forem moldados em laboratório. O aparelho de aplicação de carga deve ser capaz de transmitir ondas senoidais como variação de frequência de 0,1 a 20 Hz e tensão máxima de 0,7 MPa.

As misturas asfálticas são testadas em diferentes temperaturas, portanto, os equipamentos de condicionamento e controle são necessários. Os transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) são comumente usados para medir o deslocamento axial. Na Figura 2.13 é apresentado o esquema do ensaio de módulo complexo.

Pellinen e Crockford (2003b) afirmam que ao comparar três diferentes métodos de determinação do módulo dinâmico, e dois métodos diferentes para calcular o ângulo de fase, que os valores de módulos se apresentaram menos sensíveis a mudança em função da utilização de métodos diferentes, se comparados os resultados analisados por eles em relação as determinações dos ângulos de fase.

Figura 2. 13: Ilustração do esquema geral do corpo de prova no ensaio com dois medidores de deslocamento.



Fonte: NORMA DNIT 416/2019 – ME

O estado de tensão nas condições do ensaio, como ilustrado na Figura 2.14 são para aplicação de uma carga de compressão senoidal a um corpo de prova não confinado a uma determinada temperatura e frequência. Os valores de módulos são obtidos de médias de resultados obtidos em duplicata em temperaturas de 5 °C, 25 °C e 40 °C para frequências de carga de 1 Hz, 4 Hz e 16 Hz. Deformações dinâmicas verticais são registradas com auxílio de LVDTs acoplados por alças no terço central da altura do corpo de prova.

O módulo complexo é definido pela Equação 10:

$$E^* = \frac{\sigma_0 \text{sen } \omega t}{\varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varphi)}$$

Equação 10

Sendo:

σ_0, ε_0 : são a amplitude máxima da tensão e deformação específica

ω : a frequência angular em radianos por segundo

t : o tempo em segundos

φ : ângulo de fase (ângulo de defasagem entre ε_0 e σ_0)

O módulo de cisalhamento dinâmico (E^*), é formado pela parcela real e a parcela imaginária, podendo ser deduzido da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} E^* &= \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{sen } \varphi \\ E' &= \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi \\ E'' &= i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{sen } \varphi \\ E^* &= E' + E'' = |E^*| e^{i\varphi} \end{aligned}$$

A parcela real do módulo complexo para um material elástico ($\varphi = 0$) é chamada de módulo dinâmico, sendo simplesmente o valor absoluto do módulo complexo, descrito na Equação 11:

$$E(\text{dinâmico}) = |E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 11}$$

O “módulo dinâmico” $|E^*|$ é utilizado como base para formulação de modelos de previsão para caracterizar a resposta tensão-deformação específica de misturas asfálticas. O “módulo dinâmico” $|E^*|$ pode ser descrito da seguinte maneira:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{sen } \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

2.12 – Princípio da superposição tempo-temperatura

As propriedades dos ligantes asfálticos possuem clara dependência do tempo e da temperatura. Os conceitos de princípio da superposição tempo-temperatura, do inglês time-temperature superposition principle (tTSP), parte da física dos polímeros, e é usado para determinar propriedades mecânicas dependentes da temperatura de materiais viscoelásticos lineares a partir de propriedades em uma

temperatura de referência. Dessa forma, o efeito do tempo e da temperatura podem ser combinados em um parâmetro único, trasladando horizontalmente as curvas de módulo dinâmico obtidas em diferentes temperaturas e frequências, para uma dada temperatura de referência (T_r), originando a curva mestra, reduzindo significativamente a quantidade de ensaios.

O fator de transição (α_T) é a relação da transição das curvas de módulos dinâmicos em diferentes temperaturas para uma curva com temperatura de referência, que pode ser expresso segundo a Equação 12:

$$\alpha_T = \frac{f}{f_r'} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

f : frequência do carregamento a qualquer temperatura;

f_r' : frequência reduzida para a temperatura de referência.

Na atualidade, as Equações 13, 14 e 15 são comumente utilizadas para fatores de transição para determinação das curvas mestras, incluindo a equação Williams-Landel-Ferry (WLF), a equação de Arrhenius e a equação log-linear.

1 – William-Landel-Ferry (WLF)

$$\log \varphi_T = - \frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)'} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

C1 e C2: valores de ajuste que dependem do material e da temperatura de referência;

T: temperatura do ensaio;

T_r : temperatura de referência.

2 – Arrhenius

$$\alpha_T = A \cdot e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

A: constante do material;

E: energia de ativação;

R: constante universal do gás e usualmente utilizada como 8.314 J/(mol.K)

3 – Log-linear

$$\log \alpha_T = k(T - T_r) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

K: inclinação da reta de $\log \alpha_T$ por T.

2.13 – Construção de Curvas Mestra baseados no Modelo Sigmoidal

As características viscoelásticas das misturas asfálticas podem ser avaliadas em um número maior de situações, baseado na teoria do princípio da superposição tempo-temperatura. A determinação

da curva mestra apresenta o efeito da frequência em uma faixa de frequências maiores. A determinação do fator de transferência é a chave para o tTSP.

De forma resumida, a curva mestra serve para analisar o comportamento de uma propriedade reológica qualquer e virtude da frequência, ou do tempo de aplicação de carga, demonstrando o comportamento reológico do material para uma única temperatura em um amplo número de tempos ou frequências de carregamentos (Silva, 2017).

Por meio de fatores de deslocamento adquiridos na geração das curvas mestras, é possível deslocar horizontalmente a curva mestra gerada na temperatura de referência e obter uma nova curva capaz de descrever as propriedades reológicas do material ao longo do mesmo espectro de frequências ou tempos de carregamentos, em uma dada temperatura (Mello, 2014).

Por meio de curvas de deslocamento horizontal da temperatura e de curva mestra é possível obter a divisão dos efeitos da temperatura e da frequência de carregamentos. O princípio de superposição tempo-temperatura, descreve a equivalência entre estes dois fatores, onde, de acordo com Bechara et. al, 2008, destaca-se como a temperatura e a frequência de aplicação de carga têm efeito similar sobre as propriedades reológicas do material.

Em geral, a análise da curva mestra não é simples, pelo fato de que a representação do comportamento reológico do material é estabelecida em função da frequência de carregamento e não da temperatura. Fazendo-se a consideração de que, em geral, os ligantes asfálticos são termo reologicamente simples, pode-se assumir a validade do princípio da superposição tempo-temperatura.

Nesta situação, os efeitos do tempo e da temperatura nas propriedades reológicas podem ser intercambiados, o que ajuda na interpretação da curva mestra. É possível inferir que os efeitos das altas frequências são semelhantes aos das baixas temperaturas e, inversamente, os efeitos das baixas frequências são semelhantes aos das altas temperaturas (Mello, 2014).

A curva mestra é utilizada para analisar a quanto as tensões e deformações dependem das temperaturas e do carregamento (frequência), em misturas asfálticas quentes, e requer ensaios para determinar em várias temperaturas e carregamentos tipicamente encontrados em pavimentos. Por causa da importância do $|E^*|$, procedimentos padrões da AASHTO (TP 62) foram estabelecidos para o desenvolvimento das curvas mestras.

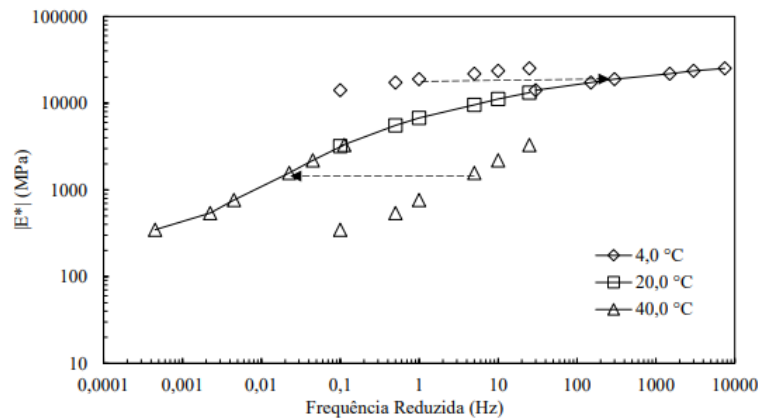
Kim *et al.* (2011) identificou a necessidade do condicionamento do tempo como um fator importante na realização do ensaio para calcular a curva mestra para $|E^*|$. O autor aplicou o conceito da superposição tempo-temperatura, pois o valor do módulo do material pode ser obtido tanto em temperaturas baixas com frequências grandes de carregamento como com altas temperaturas e frequências pequenas de carregamento.

2.14 – Procedimento para desenvolvimento de curva mestra

O procedimento parte do cálculo das médias dos $|E^*|$ e seus coeficientes de variação do $|E^*|$ e além dos ângulos de fase e seus os desvios padrão para os corpos de prova ensaiados para cada par de temperatura e frequência.

Depois de obtidos os parâmetros comentados nos tópicos anteriores, é realizada a plotagem do $|E^*|$ graficamente em função da frequência de carregamento em escala log-log com o objetivo de obter um número de segmentos de curva igual à quantidade de temperaturas ensaiadas, conforme mostra o exemplo da Figura 2.14.

Figura 2. 14: Exemplo de construção da curva mestra de módulo dinâmico.



Fonte: NORMA DNIT 416/2019 - ME

É escolhida uma temperatura de referência (T_r), onde usualmente se emprega 20 °C, conforme recomendação da Norma DNIT 416/2019-ME, em que um segmento de curva permanece fixo e os demais segmentos de curva são transladados no eixo horizontal para gerar uma curva única e contínua, que passa pelo segmento de curva da T_r .

A translação, é realizada utilizando-se a Equação 16, do segmento de curva de cada temperatura de ensaio pela multiplicação da frequência de ensaio por valores entre 0 e 1, para deslocar o segmento de curva para a esquerda, e por valores maiores do que 1, para deslocar o segmento de curva para a direita, de modo a se obter uma curva única, utilizando-se dos fatores de transição (a_T). As novas frequências obtidas são chamadas de frequências reduzidas.

$$f_r = f a_t \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

f_r = frequência reduzida;

f = frequência de ensaio;

a_T = fator de deslocamento.

Após ajustados os segmentos de curvas para a criação da curva mestra na T_r , deve-se plotar o a_T , em escala logarítmica, de cada segmento pela temperatura de ensaio, como indicado na Figura 2.15. Com estes pontos, obtêm-se, por regressão, os coeficientes de uma equação polinomial de segundo grau, de acordo com a Equação 17. A partir dessa equação, é possível deslocar a curva mestra para qualquer outra temperatura, diferente da T_r . Deve-se evitar a extrapolação da temperatura escolhida para a criação da curva mestra, optando por valores intermediários entre a maior e a menor temperatura ensaiada, uma vez que é necessário conhecer os espectros do comportamento da relação tensão vs. deformação para discretizar a curva mestra.

$$\log a_T = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad \text{Equação 17}$$

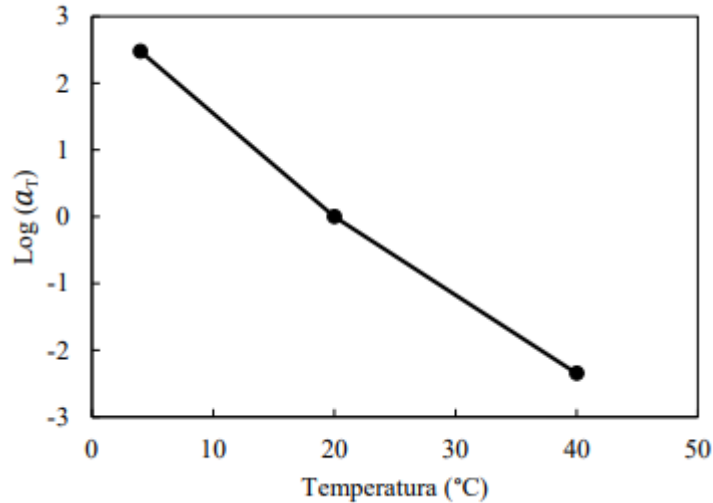
Onde:

a_1, a_2 e a_3 = coeficientes de ajuste;

T = temperatura de ensaio °C;

a_T = fator de deslocamento.

Figura 2. 15: Exemplo da variação do $\log(a_T)$ pela temperatura de ensaio



Fonte: NORMA DNIT 416/2019 - ME

Pode ser feito um ajuste da curva mestra por uma função sigmoidal, como indicado na Equação 18. O ajuste pode ser realizado utilizando a ferramenta “Solver”, no software Excel®. Esse cálculo é realizado para minimizar a soma dos quadrados dos erros existentes entre o $|E^*|$ medido em cada par temperatura - frequência e o $|E^*|$ calculado pela função sigmoidal, como mostrado na Equação 19. Para determinar os coeficientes da função sigmoidal, o objetivo da função *solver* é que o somatório dos erros quadráticos atinja o menor valor possível e que haja somente variação nos coeficientes de ajuste (δ, α, β e γ).

$$\log|\hat{E}^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma\log fr}} \quad \text{Equação 18}$$

$$\sum erro^2 = \sum_1^n (\log|\hat{E}^*| - \log|E^*|)^2 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$|E^*|$ = módulo dinâmico previsto;

$|E^*|$ = módulo dinâmico ensaiado;

δ, α, β e γ = coeficientes de ajuste;

fr = frequência reduzida.

2.15 – Modelo de Fonseca (1995) do Módulo Dinâmico por Compressão Axial ($|E^*|$)

Na Equação 20 se encontra o modelo, proposto por Fonseca (1995), para cálculo do Módulo Dinâmico de misturas asfálticas:

$$\log E = D + \frac{A}{1 + e^{(-0,716 \log f - 0,7425 \log \eta)}} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$$A = 1,87 + 0,002808p_4 + 0,0000404 p_{38} - 0,0001786(p_{38})^2 + 0,0164 p_{34}$$

$$D = -0,261 + 0,008225p_{200} - 0,00000101(p_{200})^2 + 0,00196 p_4 - 0,03157V$$

$$- 0,415 \frac{V_{beff}}{(V_{beff} + V)}$$

Sendo:

E : módulo dinâmico (x105 psi)

f : frequência de aplicação da carga (Hz)

η : viscosidade (x10⁶ poise)

V : porcentagem vazios na mistura asfáltica (%vol)

Vbeff : porcentagem efetiva de CAP na mistura asfáltica (%vol).

P34 : porcentagem de agregado retido na peneira 3/4, (%m).

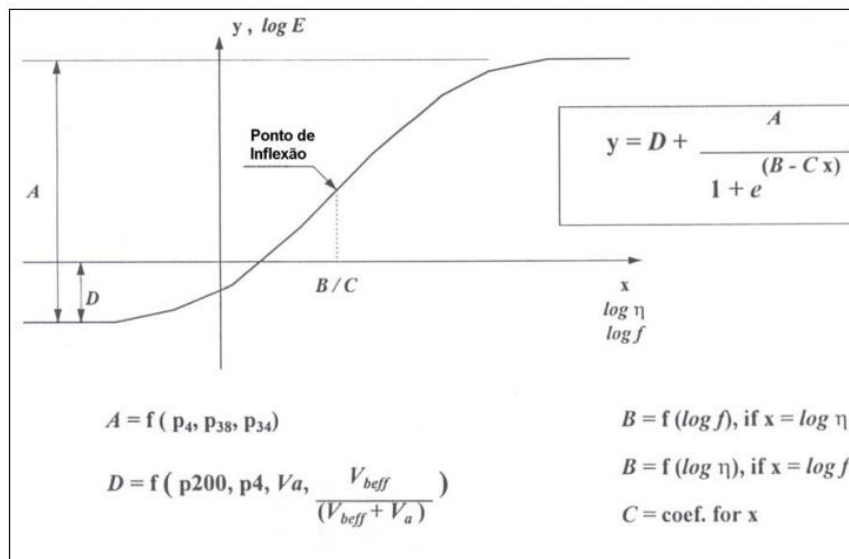
P38 : porcentagem de agregado retido acumulado na peneira 3/8, (%m).

P4 : porcentagem de agregado retido acumulado na peneira N^o4, (%m).

P200 : porcentagem de agregado passante na peneira # 200 (%m)

A representação gráfica desta equação pode ser vista na Figura 2.16 (Fonseca, 1995)

Figura 2. 16: Representação gráfica da equação proposta por Fonseca.



Fonte: FONSECA, 1995.

O parâmetro (D) descreve o módulo mínimo da mistura, que é muito próximo do módulo do agregado sem ligante, pois quando o aglutinante é líquido e tem sua influência reduzida, o módulo é representado pela parcela do agregado. A variação do módulo é representada pelo parâmetro (A) a partir do módulo mínimo (D), onde tem-se que o módulo máximo ocorre pelo limite máximo de viscosidade do ligante de $2,7 \times 10^{10}$ poise. O ponto de inflexão de uma curva sigmoideal simétrica é representada pelo ponto B/C.

O módulo dinâmico da mistura asfáltica é função da viscosidade do ligante, conforme definido pelo tamanho do agregado, as propriedades de mistura e a frequência e duração do carregamento. Em um

determinado momento, essa viscosidade apresenta uma grande mudança em função da temperatura em que é observada. Tomando o tempo como variável independente, a viscosidade aumenta ligeiramente a mesma temperatura, em decorrência do processo de envelhecimento do ligante.

Uma vez definida a granulometria do agregado, as características da mistura, e a frequência e tempo de aplicação de carga, o módulo dinâmico da mistura asfáltica passa a ser função da viscosidade do ligante. Esta viscosidade para um determinado instante apresenta uma forte variação em função da temperatura em que ele se encontra. Se considerada a variável tempo, para uma mesma temperatura, a viscosidade aumenta, de maneira aproximadamente acelerada em função do processo de envelhecimento do ligante.

Para previsão de vida de fadiga de um pavimento, é importante a previsão do módulo da camada asfáltica após sua construção, partindo, portanto, das características do ligante utilizado, e a variação deste módulo ao longo do tempo de vida útil desse pavimento. Para essa previsão, é necessário definir a temperatura que deverá ser considerada, pois o módulo depende da viscosidade do ligante que por consequência é fortemente influenciado pela temperatura.

2.16 – Dimensionamento Empírico- Mecanístico dos Pavimentos

De posse do conhecimento do comportamento dos materiais viscoelásticos, e dos materiais granulares (não-lineares), é destacado neste tópico a utilização destas características em ferramentas computacionais para o dimensionamento mecanístico dos pavimentos.

Com o subsídio dos programas de análise tensão/deformação, tornou-se possível o estudo do comportamento mecanístico da estrutura do pavimento de modo simplificado, permitindo assim realizar seu dimensionamento tendo como critério a compatibilização das tensões e deformações sofridas pelas camadas constituintes da estrutura.

Um exemplo desta evolução pode-se verificar em Cavalcante (2001), que informa sobre o ELSYM5, desenvolvido segundo a formulação matemática da teoria da elasticidade desenvolvida por Burmister de meios semi-infinitos estratificados. Foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley, Califórnia, EUA, na década de 1970, adaptado por Kopperman *et al.* (1985) para computadores pessoais.

Já o PAVE2000 foi desenvolvido por Franco (2000) constituindo um sistema completo de dimensionamento. Baseado no programa AYMA, desenvolvido por Ayres (1997), calcula, para uma determinada estrutura de pavimento, a distribuição de tensões e deformações, considerando os efeitos da variação climática, e estima a vida do pavimento para os efeitos da fadiga e afundamento de trilha de roda.

No caso do *software* MeDiNa, desenvolvido por meio de uma parceria entre o DNIT e a UFRJ entre os anos de 2015 e 2018, que consiste na realização de uma verificação da estrutura de pavimento asfáltico dimensionada, considerando análise elástico linear e não linear simplificada.

Sendo assim, em geral, os métodos mecanísticos de dimensionamento dos pavimentos exigem que os modelos constitutivos, como a relação 'tensão vs. deformação', dos materiais, sejam conhecidos. Este comportamento é conhecido quando de posse dos valores dos módulos resilientes de cada camada.

No método mecanístico, o pavimento é projetado para apresentar, ao final da vida útil, um certo nível de trincamento e deformação permanente nas trilhas de roda. O trincamento é controlado por meio da limitação da tensão (ou deformação) na fibra inferior do revestimento. Já a deformação permanente nas trilhas de roda pode ser controlada de duas maneiras, ou limitando a tensão vertical máxima atuante no topo do subleito, considerada a camada mais deformável e de menor resistência, ou limitando a deformação resultante do somatório das deformações permanentes do subleito e de cada camada, incluindo-se também a capa.

2.17 - Fadiga dos Pavimentos

Cheng *et al.* (2022c) afirmam que a fissuração por fadiga é um dos maiores problemas do pavimento asfáltico em serviço, esta afirmação também é repetida por Hveem (1955), Huang (1993), Kim (2008), Sun (2016) e Wang *et al.*, (2020). Afirmam então que este tipo de desgaste é induzido por aplicações repetitivas de cargas de tráfego no pavimento, sendo assim, a camada asfáltica está diretamente sujeita aos danos por fadiga da carga de tráfego. Ainda, como resultado desta característica, o desempenho da fadiga da camada de mistura asfáltica ganhou ampla atenção de pesquisadores e engenheiros.

Segundo CCRB Science and Technolog Co., Ltd., (2017) *apud*. Cheng *et al.* (2022b), a resistência à fadiga das camadas asfálticas afeta diretamente o dimensionamento da espessura do pavimento. Desta forma, para gerar um projeto de pavimento confiável é necessário avaliar o desempenho da fadiga da mistura asfáltica com precisão.

Conforme Cheng *et al.*, (2019) e Cheng *et al.*, (2021b), para se garantir a confiabilidade da avaliação de desempenho, o teste de fadiga realizado precisa simular a carga e as condições ambientais a que a camada asfáltica é submetida. Ademais, desafios significativos são encontrados ao projetar ensaios de fadiga para mistura asfáltica, devido às propriedades complexas deste tipo de material.

Para Kim (2008), a mistura asfáltica é tipicamente viscoelástica e anisotrópica, com suas propriedades mecânicas mudando devido a vários fatores, como temperatura, frequência de carregamento da carga e modo de carregamento (compressivo ou tracionado). Nesse sentido, as respostas de fadiga da mistura asfáltica também são afetadas por diferentes cenários de carregamento (Kim *et al.*, 2003).

Witczak *et al.*, 2007 descreve que o modelo de vida de fadiga das misturas asfálticas tem sido amplamente incorporado nos procedimentos de projeto de pavimentos para prever a vida útil do pavimento. Além da vida de fadiga, o módulo de rigidez da mistura asfáltica é outro indicador frequentemente utilizado para caracterizar o comportamento da fadiga da mistura asfáltica. Uma variedade de modelos tem sido proposta para descrever a tendência variável do módulo de rigidez com ciclos de carregamento, com base nos quais a tendência de atenuação de desempenho da mistura é analisada quantitativamente. Um exemplo disso é a consideração como critério de parada do ensaio de fadiga a perca de 50% do valor do módulo dinâmico durante a realização do ensaio.

Já Di Benedetto *et al.* (2004) afirma que o módulo de rigidez pode ser utilizado para quantificar o modo de acumulação de danos dentro da mistura asfáltica, uma vez que a vida em fadiga e o módulo de rigidez são dois índices concisos e convenientes para avaliar o desempenho em fadiga da mistura asfáltica.

Entretanto, conforme Cheng *et al.* (2021a), estas características intrínsecas do material asfáltico não conseguem gerar uma lei de fadiga unificada na mistura asfáltica para diferentes cenários de

carregamento. De forma a solucionar esta questão foi desenvolvido o método baseado em energia armazenada/dissipada e o método viscoelástico de dano contínuo (VECD). Segundo o autor, ambas as abordagens têm sido utilizadas para gerar uma lei de fadiga única para a mistura asfáltica. Como resultado, considera-se que eles revelam o mecanismo de fadiga fundamental da mistura asfáltica que não é afetado por configurações de carregamento externo.

Quando os materiais são solicitados por cargas cíclicas, estas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante. Produzem assim falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, porém, a mesma carga é aplicada diversas vezes (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Conforme a ASTM (1079), denomina-se este fenômeno de falhas dos materiais de fadiga e é definido como: “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

Segundo Bernucci *et al.* (2007), “a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (Nf) ou vida de serviço (Ns). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido”.

O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no Brasil para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada, aplicando-se a carga numa frequência de 1Hz, com prensa pneumática (Pinto, 1991; Rodrigues, 1991; Medina, 1997).

Logo, no ensaio de fadiga ocorre um acréscimo da tensão de tração até a ruptura do corpo-de-prova. Devido a predominância de absorção das tensões pelo revestimento em relação às camadas subjacentes, este tipo de ensaio apresenta-se como mais compatível para a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos. (Pinto, 1991; Huang, 1993).

No caso de ensaio sob deformação controlada, a simulação corresponde a revestimentos mais delgados, uma vez que nestes há maior contribuição das subcamadas na absorção das tensões solicitantes. Durante o ensaio a deformação é mantida constante, diminuindo-se a tensão inicial no corpo-de-prova até a sua conclusão. Alguns autores admitem que o limite de ruptura corresponde à redução em 50% do módulo de rigidez à flexão inicial da mistura (Bernucci *et al.*, 2022).

Afirmam ainda Bernucci *et al.* (2022) que:

“no método mecanístico de dimensionamento de pavimentos usado no Brasil, a diferença entre tensão máxima de compressão e de tração na fibra inferior do revestimento ($\Delta\sigma$) é considerada o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento em campo, quando se trata de utilizar como critério resultados de laboratório obtidos com ensaios à tensão controlada em compressão diametral. As tensões calculadas servem de entrada de dados nas curvas de fadiga geradas a partir do número de golpes de carga até a ruptura para diversos níveis de $\Delta\sigma$. Relaciona-se então o número N determinado a partir do tráfego previsto com o número de golpes em laboratório por um fator laboratório-campo FLC”.

Vários são os modelos básicos que relacionam as tensões de tração que ocorrem nos pontos críticos do pavimento concebido. Nas Equações 21, 22, 23 e 24 são apresentados alguns modelos que segundo Pinto (1991), são considerados mais representativos da condição brasileira:

$$N'_f = 9,07 \times 10^{-9} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,65} \left(\frac{1}{Mr}\right)^{-0,033} \quad \text{Equação 21}$$

$$N_f = f'_0 N'_f \quad \text{Equação 22}$$

$$N_L = 5,63 \times 10^5 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,61} \quad \text{Equação 23}$$

$$N_c = f_0 N_L \quad \text{Equação 24}$$

Sendo:

N'_f – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada da mistura asfáltica;

ε_t – máxima deformação específica horizontal na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

Mr – módulo de resiliência do concreto betuminoso;

f_0 – fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_0 = 10^5$;

N_f – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada da camada asfáltica para uma área afetada da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento;

N_L – número de repetições de cargas necessários à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada – Vida de Fadiga;

$\Delta\sigma$ - diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

f_0 – Fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_0 = 10^4$;

N_c – número terminal de solicitações do eixo padrão rodoviário, para uma área afetada por trincas de fadiga da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento.

2.18 - Fatores que influenciam no fenômeno da Fadiga

2.18.1 - Modos de Carregamento

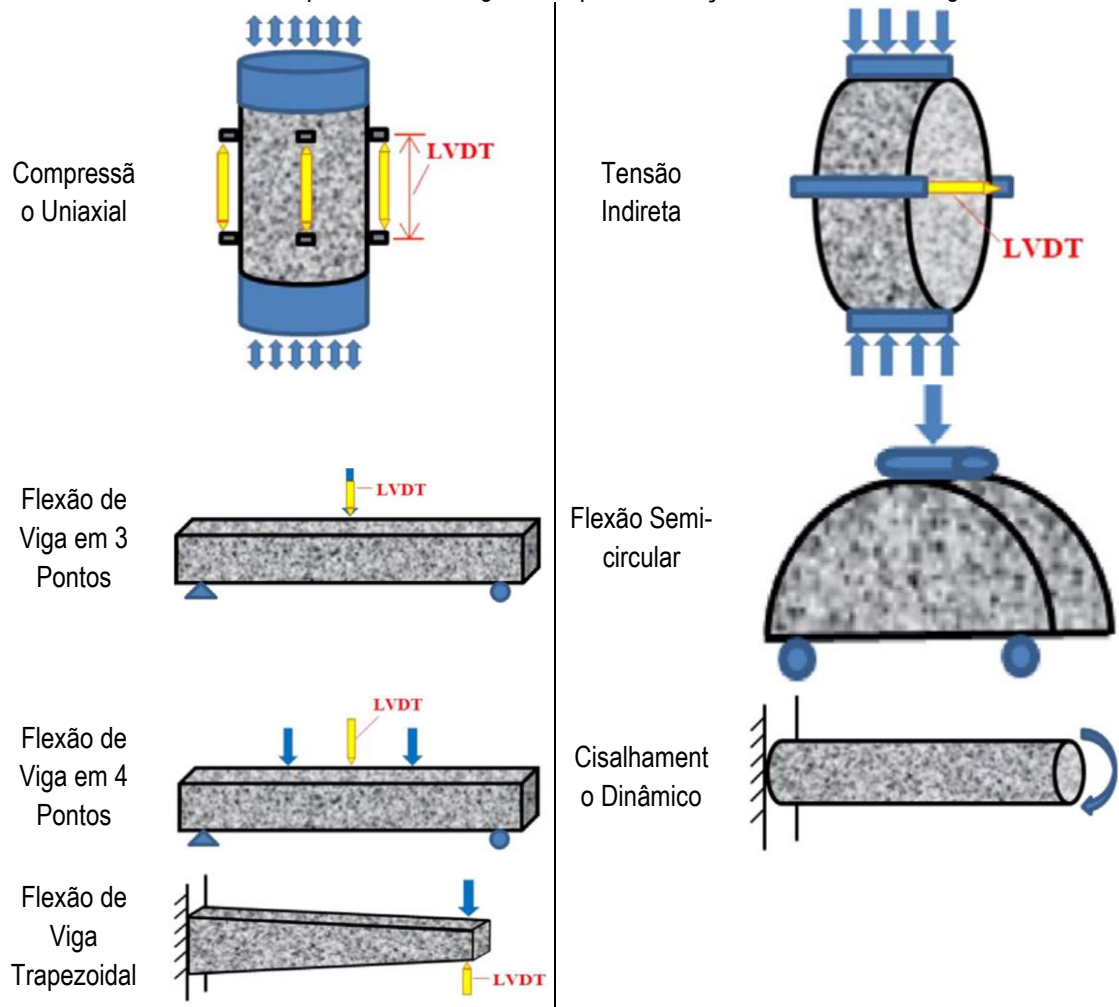
Segundo Zhang *et al.*, (2020), tem-se vários modos de carregamento que podem ser utilizados para calcular a fadiga da mistura asfáltica, das quais destacam-se a compressão/tensão uniaxial (UC/UT), flexão de viga (BB), tração indireta (IDT), flexão semicircular (SCB) e cisalhamento dinâmico (DS). Os diagramas esquemáticos dos padrões de carregamento e dos corpos de prova utilizados nos modos de carregamento acima estão resumidos na Tabela 2.2.

Os LVDTs ou extensômetros são fixados ao lado dos corpos de prova para medir o deslocamento/deformação do corpo de prova. Com base nas tensões de tração/compressão aplicadas e no deslocamento/deformação medidos, os indicadores relacionados à fadiga, como módulo de rigidez e ângulo de fase, são calculados e utilizados para analisar o comportamento em fadiga da mistura asfáltica.

O modo de tensão indireta, muito utilizado no Brasil, segundo Cheng *et al.* (2022c), é melhor em ensaiar o comportamento de fadiga da mistura asfáltica de campo, pois o corpo de prova usado neste modo é facilmente obtido. No entanto, não pode ser operado a temperaturas elevadas, porque a mistura asfáltica perto da faixa de carregamento pode facilmente sofrer deformação de cisalhamento quando a temperatura de teste é alta. Além disso, ao determinar a rigidez do corpo de prova, o coeficiente de Poisson da mistura é comumente assumido inalterada durante todo o ensaio de fadiga, o que pode ocasionar erros no cálculo da rigidez.

Cheng *et al.*, 2020, explicam que estudos recentes identificam que o modo de carregamento de 4PB é muito mais preciso na simulação dos comportamentos mecânicos reais da camada asfáltica de campo sendo então preferido para avaliar o comportamento de fadiga da mistura asfáltica.

Tabela 2. 2: Esquemas de carregamento para realização de ensaios de fadiga.



Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2022c)

2.18.2 - Frequências de Carregamento

Segundo Zhang *et al.* (2019 a, b), a frequência do pulso de carregamento é parâmetro crítico em ensaios de fadiga em misturas asfálticas. Continua afirmando que, para avaliar com maior precisão o desempenho em fadiga da mistura asfáltica, é essencial determinar uma frequência de carregamento adequada no ensaio de fadiga sendo comumente determinada a partir dos pulsos de resposta mecânica da camada asfáltica de campo induzida pela carga do tráfego. De forma a simplificar este parâmetro de influência, a maioria dos testes de fadiga atuais usam apenas uma frequência típica de 10 Hz, devido à dificuldade de simular as características de frequência real da camada asfáltica em diferentes cenários de carregamento.

Cheng *et al.* (2022a) conclui que a frequência de carregamento afeta sincronicamente o módulo de rigidez da mistura asfáltica no ensaio de fadiga, logo, o efeito da frequência de carregamento na vida em fadiga pode ser atenuado, se um critério de falha de fadiga baseado no módulo de rigidez for usado.

2.18.3 - Critério de Parada do Ensaio de Fadiga

Atualmente existem três tipos de critérios de parada dos ensaios de fadiga comumente utilizados, são eles deformação controlada, tensão controlada e deslocamento controlado, respectivamente.

Conforme Zhu (2016), no modo de deformação controlada, a deformação aplicada sobre a mistura asfáltica mantém-se inalterada durante todo o ensaio. Em contraste, a tensão e o módulo da mistura asfáltica diminuem rapidamente na fase inicial do ensaio, mantendo-se quase constantes a um nível baixo no final do ensaio. No modo de tensão controlada, a tensão aplicada na mistura asfáltica é fixada. A deformação da mistura asfáltica aumenta com os ciclos de carregamento seguindo uma tendência trifásica, enquanto o módulo de carga apresenta uma tendência oposta à da deformação. No modo de deslocamento controlado, tanto a tensão quanto a deformação da mistura asfáltica variam com os ciclos de carregamento. A tensão da mistura diminui moderadamente, enquanto a deformação aumenta, à medida que o ciclo de carregamento aumenta. Quanto ao ângulo de fase da mistura, ele mostra uma tendência variável semelhante sob os três modos de carregamento. Ou seja, o ângulo de fase aumenta rapidamente no início do teste e, em seguida, mantém taxa constante com o aumento dos ciclos de carregamento.

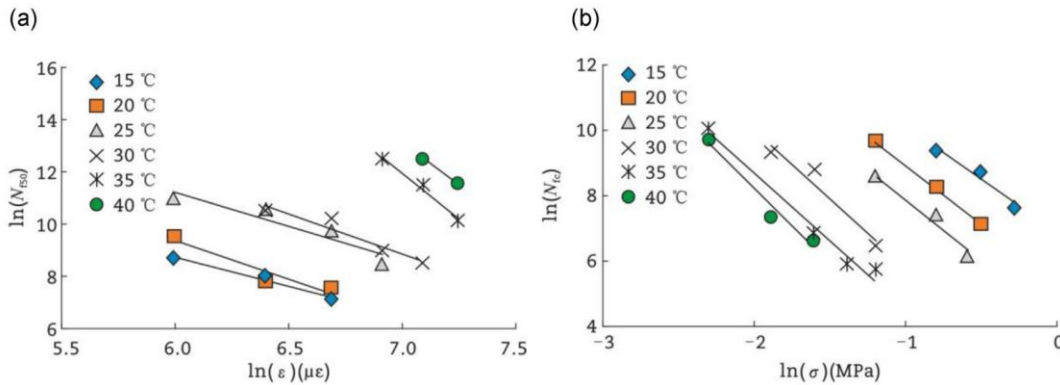
Segundo Cheng *et al.* (2022b), o critério adotado na realização do ensaio de fadiga da camada asfáltica é afetado por múltiplos fatores, incluindo espessura da camada, seu módulo de rigidez, temperatura, profundidade do pavimento e o tipo de camada de base abaixo da camada asfáltica. Assim, a escolha da forma de execução dos ensaios de fadiga precisa considerar cuidadosamente as propriedades da camada asfáltica, a estrutura do pavimento, bem como as condições ambientais a que a camada asfáltica é submetida.

2.18.4 - Temperatura

Como já discutido, se verifica que a temperatura influencia o comportamento de fadiga das misturas asfálticas, devido às propriedades viscoelásticas deste tipo de material. Recentemente, Cheng *et al.* (2021b) realizaram um estudo abrangente para investigar a influência da temperatura nos comportamentos de fadiga da mistura. Em sua pesquisa, foram realizados testes de fadiga em mistura asfáltica em seis temperaturas que variaram de 15°C a 40°C. Além disso, diferentes tipos de modos de carregamento (modo 4BP e Tensão Indireta), misturas asfálticas (asfalto puro e mistura asfáltica modificada por polímero) e níveis de carregamento foram considerados, de forma a investigar minuciosamente os efeitos da temperatura no desempenho em fadiga da mistura sob várias condições.

Cheng *et al.* (2021b) relataram que a vida em fadiga da mistura asfáltica é afetada pela temperatura de forma oposta nos ensaios de 4PB e tensão indireta, conforme ilustrado na Figura 2.17. No teste de 4PB, o aumento da temperatura provoca um aumento na vida de fadiga da mistura. No entanto, no teste tensão indireta a vida em fadiga da mistura asfáltica diminui com o aumento da temperatura.

Figura 2. 17: Fadiga de uma mistura de asfalto para diferentes temperaturas.



Fonte: Cheng *et al.* (2022c).

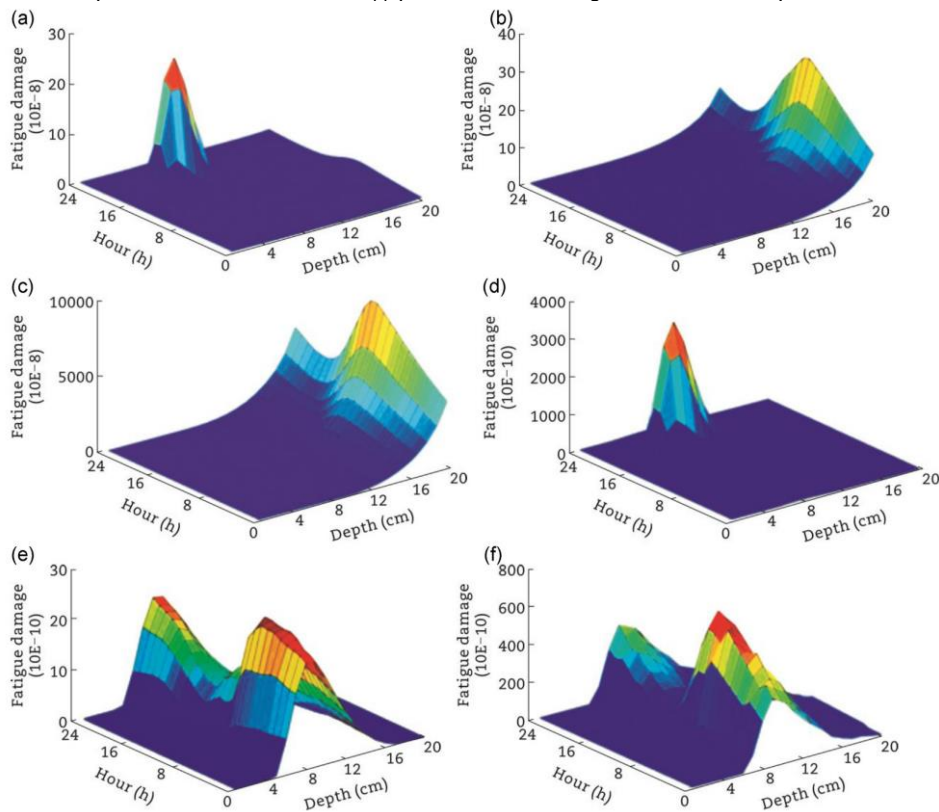
Devido à influência da temperatura no desempenho da fadiga, é essencial estabelecer uma temperatura adequada ao realizar ensaios de fadiga em mistura asfáltica. Para simplificação, algumas especificações recomendam o uso de uma temperatura representativa para avaliar o desempenho em fadiga da mistura asfáltica. No Brasil tem-se a recomendação da temperatura de referência em 25°C. Nos EUA a temperatura recomendada é de 20°C (ASTM, 2010). A especificação de projeto da França adota a temperatura de teste a 10°C. Na China a temperatura de teste de fadiga é de 20°C (CCRB Science and Technology, 2017).

Cheng *et al.* (2021a) afirmam que a aplicação de uma temperatura de referência permite que os engenheiros avaliem o desempenho de fadiga da mistura apenas em uma temperatura inalterada, minimizando o tempo de ensaio. No entanto, as temperaturas de referência adotadas são difíceis de revelar as distribuições reais de temperatura dentro da camada asfáltica do pavimento localizado em diferentes zonas climáticas.

Os autores ainda analisaram a acumulação de danos dentro do pavimento asfáltico sob diferentes condições de temperatura (alta, intermediária e baixa temperatura). Os pesquisadores calcularam os danos por fadiga da camada de pavimento asfáltico combinados com temperaturas de pavimento medidas em campo e modelos de fadiga associados às temperaturas de pavimento correspondentes. Seus resultados de cálculo são superiores na identificação dos danos reais por fadiga da mistura asfáltica sob vários cenários de temperatura.

Verificou-se que a magnitude dos danos por fadiga da camada asfáltica sob altas e baixas temperaturas se aproxima ou mesmo excede a mesma sob temperaturas intermediárias, independentemente do tipo de pavimento asfáltico, conforme ilustrado na Figura 2. 18.

Figura 2. 18: Danos por fadiga para diferentes condições de temperatura. (a) pavimento flexível a elevadas temperaturas. (b) Pavimento flexível a temperaturas intermediárias. (c) pavimento flexível a baixas temperaturas. (d) pavimento semi-rígido a elevadas temperaturas. (e) pavimento semi-rígido a temperaturas intermediárias. (f) pavimento semi-rígido a baixas temperaturas.



Fonte: Cheng *et al.*, 2021a.

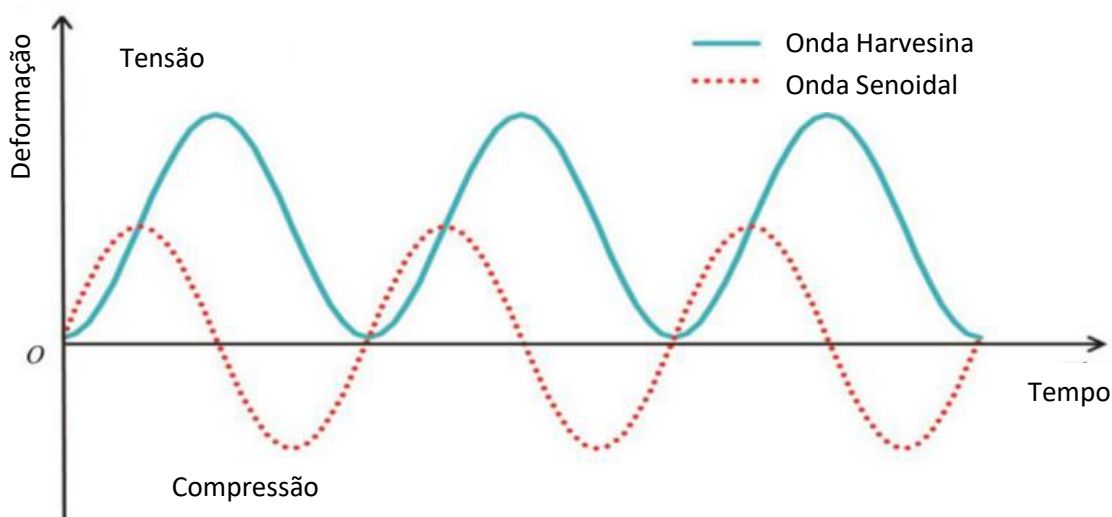
Assim, o acúmulo de danos por fadiga dentro da camada asfáltica sob altas e baixas temperaturas também desempenha um papel dominante na causa de fissuração por fadiga, em comparação com a temperatura intermediária. Esse fato revela que a avaliação da fadiga na mistura asfáltica precisa levar em conta as condições de baixa e alta temperatura.

Cheng *et al.* (2022c) concluíram que a temperatura tem uma forte influência no comportamento à fadiga da mistura asfáltica devido às propriedades viscoelásticas deste tipo de material, sendo essencial estabelecer uma temperatura adequada ao realizar ensaios de fadiga em mistura asfáltica. Portanto, é recomendado que a temperatura do ensaio esteja situada dentro da faixa de temperatura intermediária, pois se considera que a fissuração por fadiga na camada asfáltica ocorre dentro deste escopo de temperatura.

2.18.5 - Formas de Onda do Carregamento

A forma de onda de carregamento refere-se à forma dos pulsos de carregamento aplicados no teste de fadiga. Conforme Mateos *et al.* (2018), as formas de onda de carregamento comumente utilizadas em ensaios de fadiga em mistura asfáltica são a onda “haversina” e a onda senoidal, conforme ilustrado na Figura 2.19.

Figura 2. 19: Tipos de onda de carregamento do ensaio de fadiga.



Fonte: Cheng *et al.*, 2022a.

Segundo Kim *et al.*, 2003 *apud*. Cheng *et al.* 2022a, no ensaio de onda “haversina”, a deformação de um corpo de prova de mistura asfáltica é continuamente tracionada. No ensaio de onda senoidal, o corpo de prova apresenta resposta de deformação tração-compressão. A onda “haversina” /senoidal aplicada no teste pode ser contínua, ou conter um determinado período de descarga para simular o período de descanso entre as cargas de tráfego adjacentes.

Mateos *et al.*, (2017) ao realizar comparações, observaram que a vida em fadiga da mistura asfáltica testada sob uma onda “haversina” difere daquela sob uma onda senoidal na qual a onda senoidal gera uma vida de fadiga maior do que a “haversina”. Os resultados da comparação indicaram que a forma de onda de deformação utilizada no ensaio afeta o comportamento de fadiga da mistura asfáltica. Sendo assim, é necessário escolher a forma de onda de deformação que melhor represente aquela aplicada no pavimento “*in situ*”.

Deste modo, Cheng *et al.* (2022a) afirmam que é difícil testar os reais comportamentos de fadiga da mistura asfáltica ensaiada em laboratório em campo. Principalmente devido as formas de onda de carregamento “*in situ*” exibidas na camada asfáltica precisam ser implementadas no teste de fadiga.

2.19 – Danos por Deformação Permanente

A deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas, granulares, que compõem o substrato do pavimento, podem apresentar deformações permanentes, por densificação causada pelo tráfego como podem também apresentar ruptura por cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados com uma seleção dos materiais, compactação adequada, e um bom projeto estrutural, de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros.

A deformação permanente ocorre com uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano neste material, concebendo a formação e propagação de trincas. Tem-se que a

resistência de uma mistura a esse tipo de deformação depende de vários fatores, dos quais apresentam destaque a consistência do ligante e as características da mistura (agregados e ligantes).

Os modelos desenvolvidos por pesquisadores nacionais e internacionais foram formulados para condições especiais de materiais e níveis de tensões consideradas. Por outro lado, é de conhecimento dos projetistas que a obtenção de dados para a investigação de equações específicas é dificultada pela demora na realização dos ensaios devido ao número de variáveis a serem consideradas e avaliadas.

Tem-se que a previsão da deformação permanente pode então ser considerada conhecendo-se as tensões verticais e deformações causadas pelas cargas aplicadas nos pavimentos. Segundo Pinto (1991), a limitação da tensão vertical no topo do subleito é um critério bastante utilizado devido ser a camada de menor resistência ao cisalhamento e, portanto, com aptidão para plastificação. Heukelom e Klomp (1962) indicam para pavimentos dimensionados pelo método do DNER, o modelo da Equação 25.

$$(\sigma_v)_{adm} = \frac{0,006M_{SUB}}{1+0,7 \log N} \quad \text{Equação 25}$$

Sendo:

$(\sigma_v)_{adm}$ - Tensão vertical admissível no topo do subleito, Mpa;

M_{sub} – Módulo de Resiliência do subleito, MPa;

N – Número de repetições de carga.

2.20 – Instrumentação de Pavimentos

Uma vez que vários são os fatores que influenciam o comportamento das camadas asfálticas, como também a determinação de suas características intrínsecas (relação tensão/deformação, vida de fadiga etc.), é justificada a necessidade de conhecimento das respostas “*in situ*” dos materiais constituintes do pavimento, mensuração da relação tensão vs. deformação.

Logo, necessário se faz constatar em campo todo o conhecimento adquirido em laboratório, e para esta etapa lança-se mão da instrumentação de pavimentos, com a utilização de equipamentos adequados para a medição das tensões, deformações, temperaturas etc., experimentadas *in situ*, com cargas controladas ou não.

Para Barriera *et al.* (2020) a seleção atenta e a instalação correta de dispositivos para a detecção das respostas do pavimento aos efeitos do carregamento são fundamentais pré-requisitos para coleta de dados de qualidade, sendo, portanto, essenciais para o sucesso de um projeto de instrumentação.

Van Deusen *et al.* (1992) *apud.* Gonçalves (2002) afirma que não é possível afirmar o método ideal para instalação de sensores. Entretanto, vários estudos apontam que implantar os sensores no interior de estruturas de pavimentos durante sua construção possui melhor desempenho que aquelas implantadas no pavimento construído, sendo que Colpo (2019), afirma que os locais mais comuns de instalação de sensores são o fundo da camada asfáltica e o topo do subleito.

Ademais, estudos *in situ* em pistas experimentais ocorrem devido à incerteza dos vários modelos utilizados para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos. Estes modelos só podem ser considerados confiáveis na medida em que prevejam de forma adequada o desempenho do pavimento durante a sua vida útil. Além disto, estes dimensionamentos dependem fortemente dos diversos fatores regionais do

pavimento, tal como os materiais disponíveis, fatores climáticos e as solicitações de tráfego (Gonçalves, 2002).

Outro fator de interesse na instrumentação é o do desenvolvimento das patologias no pavimento. Devido à dificuldade na previsão adequada em laboratório das patologias ocasionadas pela fadiga e pela deformação permanente, a instrumentação mecanística é uma ferramenta muito útil para o monitoramento de pistas experimentais ou rodovias já existentes.

O projeto de instrumentação para medição de deformações do pavimento realizado entre o DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil, 2008) afirma que a instrumentação tem a sua origem na indústria aeroespacial, e apenas recentemente tem sido adaptada para a Engenharia Civil. Portanto, alguns medidores utilizados têm a sua origem em outras ciências, além da adaptação de tecnologias já utilizadas em outras áreas da Engenharia Civil.

Segundo Ziegler (2020), uma das principais tecnologias adaptadas da instrumentação aeroespacial são os “*strain gauges*”. Esse instrumento, também conhecido como extensômetro elétrico de resistência, é um medidor de deformação. A deformação é medida por meio da variação da resistência elétrica de um filamento metálico.

As células de pressão, utilizadas em várias áreas da engenharia civil, como na análise de aterros e de fundações, tem como objetivo a leitura das tensões as quais o pavimento é submetido. A instrumentação em pavimentos flexíveis é uma técnica disseminada em vários países atualmente, para a validação de modelos de dimensionamento. Gonçalves (2002), afirma que o primeiro caso de instrumentação em escala real ocorreu em uma seção teste na cidade de Detroit nos Estados Unidos, no ano de 1909. Sendo esta técnica depois disseminada e utilizada cada vez mais em diversos países do mundo.

2.21 - Seções Instrumentadas

2.21.1 - Virginia Smart Road

Conforme relatado por Barriera *et al.* (2020), este projeto começou em 1998 e terminou em novembro de 1999, foi conduzido pelo Departamento de Transportes da Virgínia. Consistiu na construção de uma estrada de 3,2 quilômetros de extensão. Ao longo de toda a extensão, foram monitorados 12 trechos de 100 m de comprimento por meio da incorporação de diferentes tipos de sensores em diferentes profundidades. A instrumentação ocorreu durante os procedimentos de construção. “*Strain Gauges*” (em forma de H e de fibra óptica), células de pressão, termopares, foram integrados. Completando o sistema de monitoramento, foram implantados um sistema de aquisição de dados.

Os autores relatam ainda que foi realizada uma campanha experimental com um caminhão de carga conhecida com o objetivo de estudar as respostas do pavimento sob diferentes cargas e condições ambientais. O pavimento foi carregado realizando diversas passagens com três pressões diferentes de pneus (724 kPa, 655 kPa e 552 kPa); três configurações de carregamento diferentes; e quatro velocidades diferentes (8 km/h, 24 km/h, 40 km/h e 72 km/h). Os resultados indicaram que a resposta em termos de deformação foi afetada pela temperatura e velocidade. Por fim, um modelo de elementos finitos foi utilizado para modelar o comportamento do pavimento e comparar os resultados experimentais e numéricos.

Verificou-se que um cálculo viscoelástico que leva em conta as condições efetivas de aderência nas interfaces entre as camadas da estrada pode prever melhor a resposta do pavimento.

2.21.2 - Seção teste de Maine

De acordo com Barriera *et al.* (2020), em 2005, o Departamento de Transportes do Maine construiu a primeira seção de teste de pavimento flexível instrumentado do estado. A instrumentação ocorreu durante trabalhos de reconstrução de uma estrada danificada. Os sensores instalados foram: 12 extensômetros de asfalto, 6 termopares de asfalto, 4 extensômetros de solo, 4 células de pressão de solo, 6 medidores de umidade de solo, 24 termopares de solo e 2 sondas de resistividade de gelo. Cada tipo de sensor foi conectado ao seu próprio sistema de aquisição de dados. Os sistemas permitiram a coleta de dados dinâmicos e estáticos.

Este estudo comprovou que a instalação de extensômetros de asfalto é um processo muito delicado. Na verdade, entre os 12 sensores embarcados, 3 deles não sobreviveram às fases de construção. Um modelo para previsão de temperatura subterrânea foi desenvolvido com base em dados de temperatura coletados ao longo de 5 meses. Relata ainda que os dados de tensão e deformação foram coletados percorrendo diversas passagens com um caminhão com carga por eixo conhecida, sendo considerados três casos de carregamento. Cada caso incluiu passagens de caminhões em cinco velocidades diferentes, realizadas em temperaturas distintas, a fim de medir o efeito da velocidade e da temperatura na resposta do pavimento.

Verificou-se que o tempo de carregamento (devido às diferentes velocidades) não varia em diferentes profundidades, enquanto a variação da velocidade tem um impacto significativo na deformação. Finalmente, um modelo elástico (BISAR, [38]) foi utilizado para modelar a campanha experimental. Uma boa correspondência entre resultados experimentais e numéricos foi obtida para baixas temperaturas e velocidades.

2.21.3 - A Instrumentação da Autoestrada A41N na França

Continua Barriera *et al.* (2020) em seu relato, afirmando que a instrumentação da autoestrada francesa A41N fez parte de um projeto de investigação realizado em parceria entre a AREA, a EIFFAGE Infrastructures e a Universidade de Lyon/ENTPE. A obra foi realizada em 2012 durante algumas operações de manutenção. Duas seções foram instrumentadas com 47 extensômetros (extensômetros asfálticos horizontais e verticais), 12 sondas de temperatura e 2 sensores FBGs. Os sensores foram localizados em diferentes profundidades na estrutura da estrada para obter informações sobre o desgaste, a base e a sub-base. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados MGCplus fornecido pela HBM com 5 módulos de aquisição. As medições foram adquiridas a 600 Hz.

Uma campanha de medições *in situ* com um caminhão de carga conhecida foi realizada realizando passagens em 3 velocidades diferentes (10 km/h, 50 km/h e 90 km/h) e ao longo de 3 trajetórias diferentes, para avaliar o comportamento estrutural do pavimento. Não foram registradas perdas de sensores neste estudo. A análise dos dados adquiridos durante a campanha experimental mostrou que, em pavimentos flexíveis, as deformações medidas foram fortemente impactadas pela velocidade do veículo, bem como pela trajetória do caminhão.

2.21.4 - Seção Instrumentada na China

Em novo exemplo de trecho instrumentado, Barriera *et al.* (2020) nos relata o caso do trecho instrumentado na China. Realizado para investigar a resposta à deformação do pavimento asfáltico sob diferentes configurações de eixo, cargas por eixo, velocidades e temperaturas do pavimento, uma estrada de 900 m de comprimento foi instrumentada na China. Uma estrada de 4 pistas e 2 vias foi construída utilizando 3 tipos de estruturas de pavimento (asfalto semirrígido, invertido e composto) com extensão de 300 m cada. Cada trecho foi instrumentado com 4 extensômetros de asfalto com 2 orientações diferentes em relação ao sentido do tráfego.

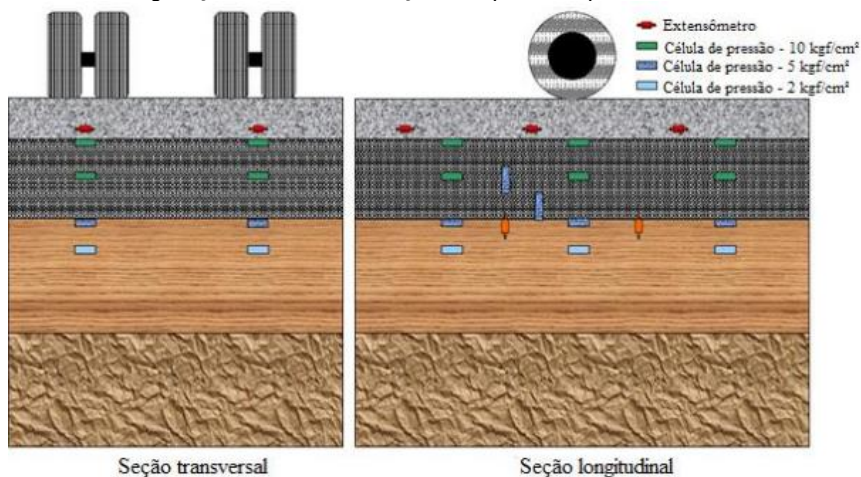
Os resultados mostraram como a deformação aumenta com o aumento da carga por eixo, diminui com o aumento da velocidade e aumenta com o aumento da temperatura. Assim, uma combinação de altas cargas e altas temperaturas poderia acelerar a ocorrência de danos por fadiga. Ademais, um modelo de regressão multivariada foi utilizado para prever as respostas de deformação, e foi encontrada uma boa correspondência entre resultados numéricos e experimentais.

2.21.5 - Segmentos Instrumentados no Brasil

De acordo com Silva e Motta (1999), a primeira experiência em instrumentação no Brasil ocorreu em 1976, em um trecho experimental da BR – 101, em Santa Catarina. O objetivo da instrumentação era o de analisar misturas pozolânicas. Duas seções de pavimento foram instrumentadas com espessuras diferentes.

Gonçalves (2002) fez uma instrumentação de seis pistas experimentais localizadas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A instrumentação foi feita com células de carga e extensômetros dos tipos roseta a 45°, transversalmente e longitudinalmente. Detalhes da configuração de instrumentação destas pistas podem ser observadas na Figura 2.20.

Figura 2. 20: Configuração da instrumentação das pistas experimentais do LAPAV-UFRGS



Fonte: GONÇALVES, 2002

Em 2008 o DNIT, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina, fez um projeto de identificação de sistemas de pesagem em movimento (Brasil, 2008). Onde foram instalados 27

Diante do exposto, é possível afirmar que o monitoramento em tempo real e de longo prazo das infraestruturas rodoviárias é de grande relevância. A avaliação das condições “*in situ*” dos pavimentos permite-nos planejar ações de manutenção adequadas e eficientes que conduzam à melhoria da segurança rodoviária e ao prolongamento da sua vida útil.

Ademais, pode-se perceber nos relatos realizados que a taxa de perda de sensores ainda é elevada, especialmente durante o processo de construção. Isto aponta para uma deficiência de robustez dos sensores, uma vez que se pretende incorporar estes dispositivos aos pavimentos rodoviários.

operação durante a pesquisa. Caso fosse escolhido um trecho em área rural, todos estes elementos deveriam integrar a pesquisa e serem providenciados, o que poderia acarretar sua inviabilidade, ou falta de garantia de seu funcionamento durante todo o período planejado para a pesquisa.

3.2 - Obra

Para a realização da instrumentação houve o aproveitamento de investimentos em infraestrutura que estariam ocorrendo no trecho escolhido para instrumentar, de forma a otimizar os custos da pesquisa. O segmento estava sendo restaurado estruturalmente, em consórcio entre o DNIT e o Governo do Estado de Pernambuco, em Convênio iniciado em 2018, com previsão de duração de 24 meses.

O pavimento existente antes da intervenção de restauração neste trecho apresentava uma camada de Concreto Asfáltico Faixa C de 5,0 cm sobre uma Placa de Concreto, assentada sobre uma camada de Concreto Compactado a Rolo (CCR). Inicialmente, para a execução da intervenção de restauração, foi removida a camada asfáltica existente, por meio de fresagem contínua, e inspecionada as placas existentes, e verificada sua integridade, foi executada a solução de restauração.

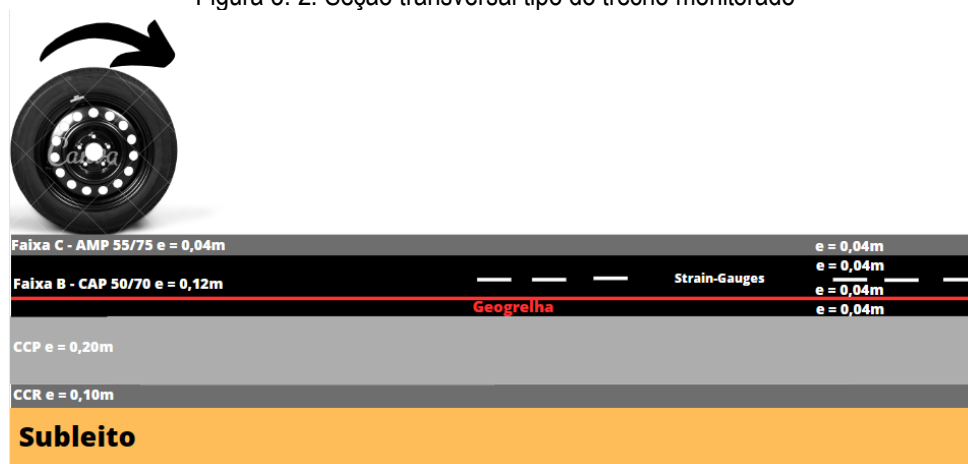
A solução de restauração do pavimento apresentou uma estrutura constituída de uma camada de Concreto Asfáltico com 16,0 cm de espessura, com a implantação de uma Geogrelha na profundidade 12,0 cm, sobre a placa de concreto, conforme esquema apresentado na Tabela 3.1 e Figura 3.2.

Tabela 3. 1: Espessuras das camadas do pavimento monitorado

Estrutura	Espessura (cm)
Faixa C – AMP 55/75 (revestimento)	4,0
Faixa B – CAP 50/70 (Binder)	8,0
Geogrelha Hatelit	-
Faixa B – CAP 50/70 (Binder)	4,0
Revestimento de Concreto Portland (pré-existente)	20,0
Concreto compactado a rolo CCR	10,0

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 2: Seção transversal tipo do trecho monitorado



Fonte: Arquivo pessoal

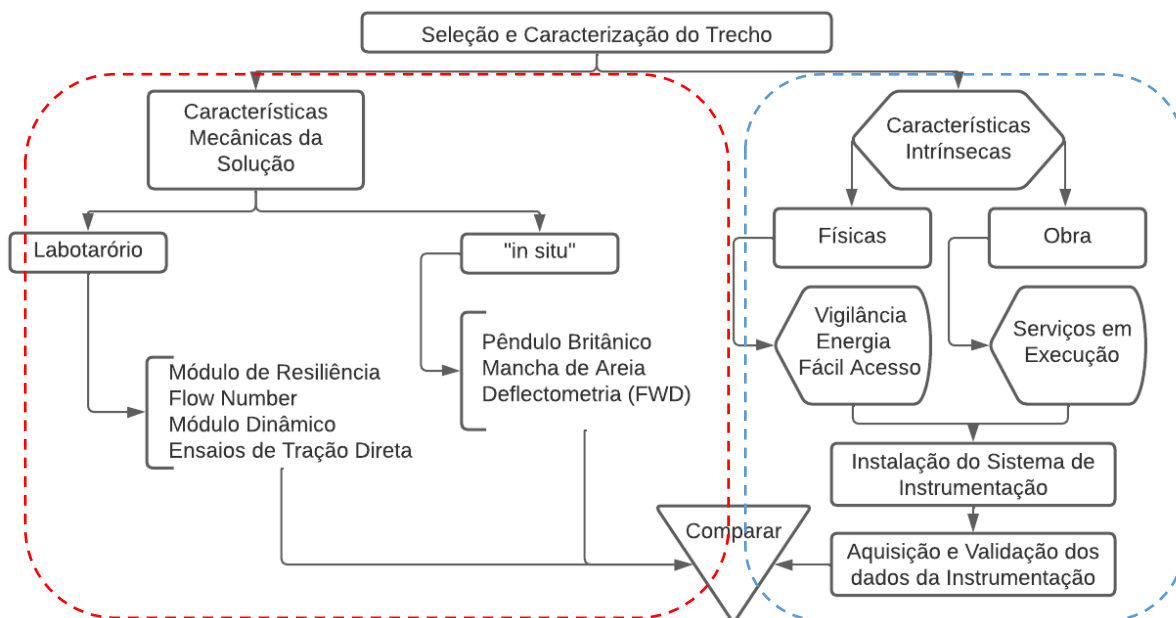
O Concreto Asfáltico Faixa B foi indicado devido a elevada espessura de reforço, servindo de camada para distribuição de cargas, como também, de preparação para receber a camada de Concreto Asfáltico Faixa C com AMP. O uso da Geogrelha objetivou minimizar a ação da reflexão tanto de trincas das placas de concreto quanto das juntas longitudinais e transversais das placas. Esta solução foi proposta quando da execução da duplicação do Corredor Nordeste (Duplicação da BR-101/PE da Div. PB/PE até o km 40,4 e do km 104,6 a Div. PE/AL) e decorreu do aprendizado com a duplicação da BR-232/PE de Recife a Caruaru, quando a solução de reforço das placas com execução de camada asfáltica apresentou o espelhamento das trincas e juntas das placas existentes. Conforme orientação do fabricante, sua utilização deve ser utilizada imersa na Camada Asfáltica, motivo pelo qual a solução indicou a execução indicada na Figura 3.2.

De posse dos projetos e das ocorrências de materiais que seriam utilizadas na realização da Restauração, foi solicitado do Consórcio Construtor a elaboração do traço da mistura asfáltica que seria utilizado na obra ser definido pela metodologia SUPERPAVE, como também tornou possível antes do início das intervenções a caracterização dos materiais que seriam utilizadas no decorrer das obras.

3.3 - Caracterização do Trecho Instrumentado

Conhecidos os materiais da mistura asfáltica (ligante asfáltico, britas e filler) , definido o traço pela metodologia SUPERPAVE, foi possível a realização da caracterização do trecho. De forma a auxiliar a compreensão da presente pesquisa, estruturou-se o fluxograma da Figura 3.3, que identifica a coleta das características físicas e mecânicas do trecho experimental em laboratório e "in situ" bem como das características intrínsecas da fase de instrumentação.

Figura 3. 3: Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor.

Importante destacar que se teve por premissa inicial realizar o monitoramento de todos os veículos de carga que estariam passando sobre o trecho experimental durante o período de 01 ano compreendendo os meses de dezembro de 2019 a dezembro de 2020.

3.4 - Características Mecânicas da Camada Asfáltica

Uma vez que se tem por objetivo a verificação do comportamento “in situ” da camada asfáltica, optou-se primeiramente pela caracterização em laboratório e, posteriormente, a análise e comparação dos resultados registrados em campo com os medidos em laboratório.

Para conhecer as características mecânicas da camada asfáltica em laboratório foram coletadas amostras de Cimento asfáltico de petróleo (CAP), Asfalto modificado por polímero (AMP), Agregados graúdos, miúdos e Fíler para a reprodução da camada asfáltica executada na restauração da BR-101/PE e estes resultados subsidiaram a presente pesquisa com os parâmetros de laboratório.

Passa-se então a apresentação dos ensaios de caracterização em laboratório realizados para subsidiar o presente estudo.

3.4.1 - Ensaios de Laboratório

Em laboratório, foram procedidos ensaios de caracterização mecânica para as Faixas B (Binder) e C (revestimento), para o trecho experimental da BR-101/PE. Os ensaios realizados para caracterização das camadas, como por exemplo os ensaios de módulo de resiliência, *Flow Number* e o módulo dinâmico, foram realizados no momento da formulação do traço utilizado no segmento instrumentado, cujas normas estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2: Ensaios laboratoriais executados na presente pesquisa.

Normas		
Mistura	AASHTO T 283/14	Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage
	ASTM 4123/95	Standard test method for indirect tension test for Resilient Modulus of bituminous mixtures
	ASTM D2041/11	Standard Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures
	DNIT 135/2018	Determinação do módulo de resiliência
	DNIT 136/2010	Determinação da resistência à tração por compressão diametral
	DNIT 184/2018	Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente
	DNIT 416/2019	Determinação do módulo dinâmico
	NBR 16018/11	Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida
Ligantes	ASTM D4402/15	Standard Test for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer
	DNIT 155/10	Determinação da penetração
	DNIT 439/2022	Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep)
	DNIT 078/94	Adesividade a Ligante Betuminoso
	ASTM C1252/03	Angularidade de Agregado Miúdo
Agregados	ASTM D4791/10	Partículas Alongadas e Achatadas
	DNIT 035/98	Determinação da Abrasão “Los Angeles”
	DNIT 054/97	Equivalente Areia
	DNIT 083/98	Análise granulométrica
	DNIT 424/2020	Determinação de Índice de Forma
	DNIT 195/97	Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.1 Caracterização dos Agregados

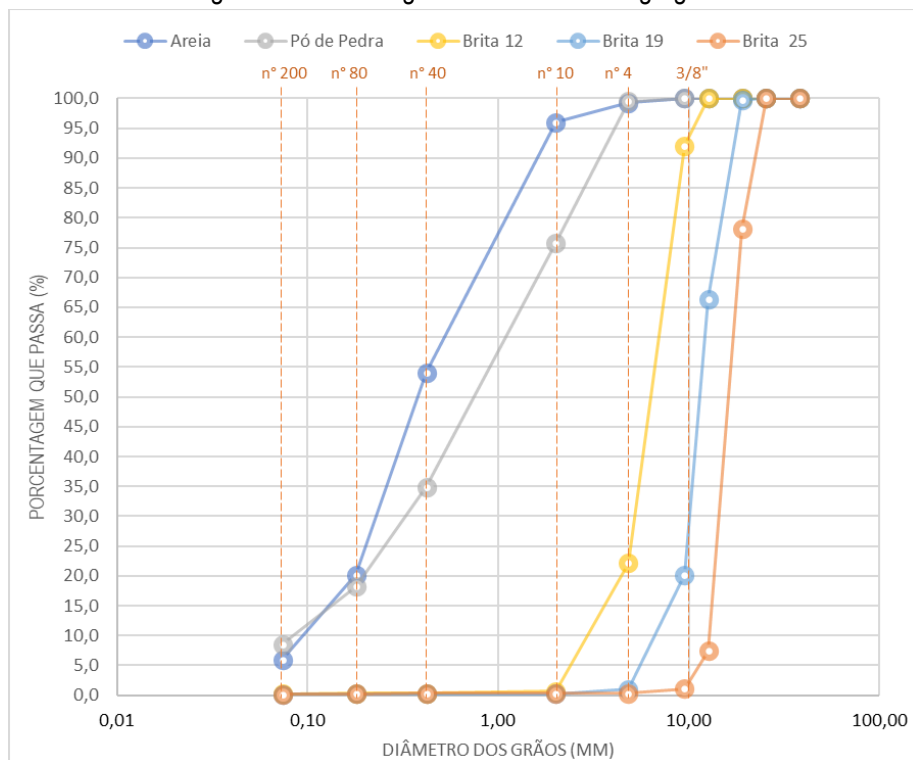
A Tabela 3.3 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados utilizados na mistura Asfáltica instrumentada. Na Figura 3.4 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados estudados. A nomenclatura das britas não segue a apresentada por Bernucci et. al, 2007, de que o tamanho nominal máximo é a maior abertura de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso. As britas nominadas de Brita 25 e Brita 12 não se enquadram na nomenclatura utilizada, mas adotou-se esta nomenclatura, vez que foram assim utilizadas durante a usinagem do material asfáltico.

Tabela 3. 3: Granulometria dos agregados

Peneiras	Brita 25	Brita 19	Brita 12	Pó de Pedra	Areia
POL	mm			% Passante	
1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	78,1	99,8	100,0	100,0
1/2"	12,7	7,4	66,4	100,0	100,0
3/8"	9,5	1,1	20,2	92,1	100,0
4	4,8	0,3	1,0	22,2	99,5
10	2,0	0,3	0,2	0,7	75,8
40	0,42	0,3	0,2	0,3	34,9
80	0,18	0,3	0,2	0,3	18,2
200	0,07	0,2	0,2	0,2	8,5

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 4: Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 3.4 resume os resultados dos ensaios de caracterização físicos e mecânicos realizados nos agregados estudados.

Tabela 3. 4: Caracterização física dos agregados

Ensaio		Brita 25	Brita 19	Brita 12	Pó de Pedra	Areia	Limites
ME Real	g/cm ³	2,721	2,683	2,689	2,480	2,654	-
ME Aparente	g/cm ³	2,690	2,654	2,647	2,480	2,637	-
Absorção	%	0,43	0,40	0,59	0,64	0,24	-
Adesividade (CAP 50/70)	-	Satisfatório com adição de 0,1% de DOPE					-
Adesividade (AMP 55/75)	-	Satisfatório					-
Índice de Forma	-	0,87	0,89	0,77	-	-	>0,5
Los Angeles	%	21,10	29,60	29,90	-	-	<40
Durabilidade	%	0,09	0,47	0,78	-	-	<12
Equivalente de Areia	%	-	-	-	62,40	56,60	>55
Angularidade de Agregado Miúdo	%	-	-	-	42,00	38,50	>40
Partículas Alongadas e Achatadas	%	0,00	0,00	0,00	-	-	<10

Fonte: Próprio Autor.

Os ensaios realizados demonstram que o material atende as exigências normativas para utilização em materiais asfálticos, realizando-se a recomendação de, na usinagem do concreto asfáltico com o CAP 50/70, utilizar melhorador de adesividade, o que foi realizado durante a execução da obra.

3.4.1.2 Caracterização dos Ligantes Asfálticos

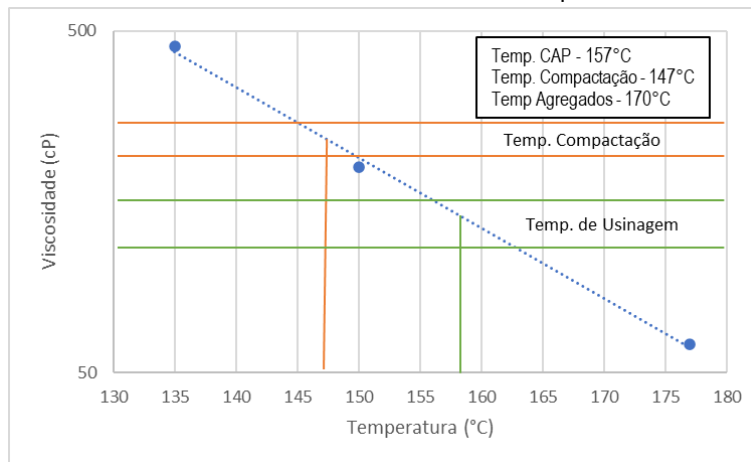
A Tabela 3.5 apresenta os resultados médios de caracterização do CAP para os ensaios de Penetração e Viscosidade Rotacional. Os ensaios de Viscosidade Rotacional (Brookfield) foram realizados a partir de duas amostras de oito (8) gramas, de acordo com as Normas da ABNT: NBR 15184 e da ASTM: D4402-06, bem como de acordo com a Resolução da Agência Nacional de Petróleo (ANP) de nº 19. Na Figura 3.5 está apresentada a curva de viscosidade Brookfield, com as faixas de temperatura de usinagem e compactação. Os ensaios atenderam aos preceitos normativos, possibilitando o uso do CAP 50/70 disponibilizado pelo fornecedor escolhido para a obra (Asfalto Nordeste).

Tabela 3. 5: Caracterização do CAP 50/70

CAP 50/70			
Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação
Penetração	0,1mm	52,00	50 a 70
Ponto de Amolecimento	°C	47,00	Mín. 46
Viscosidade Rotacional	135°C (20rpm, spd21)	480,00	>214
	150°C (20rpm, spd21)	238,00	>97
	177°C (20rpm, spd21)	87,00	28 a 114

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 5: Curva de viscosidade rotacional versus temperatura do CAP 50/70



Fonte: Próprio Autor.

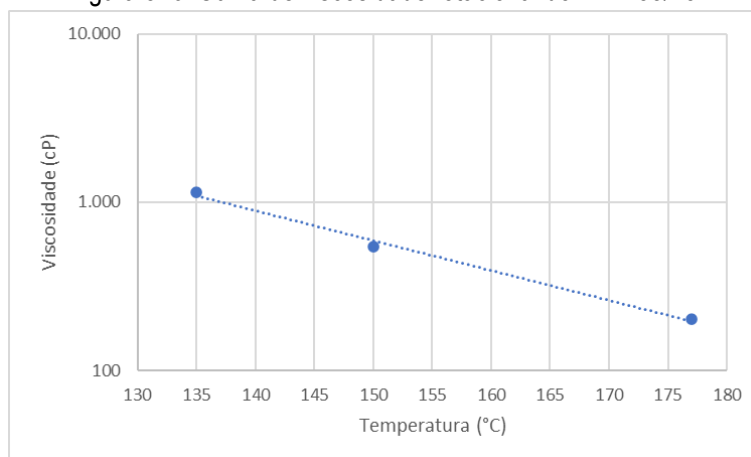
Os ensaios de caracterização do AMP, utilizado para a usinagem do CBUQ Faixa C, estão apresentados na Tabela 3.6, e na Figura 3.6 está apresentada a curva de viscosidade rotacional.

Tabela 3. 6: Caracterização do AMP 55/75

AMP 55/75			
Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação
Penetração	0,1mm	62,00	45 a 70
Recuperação Elástica	%	94,00	Mín 75
Ponto de Amolecimento	°C	56,00	Mín. 55
Viscosidade Rotacional	135°C (20rpm, spd21)	1151,30	<3000
	150°C (20rpm, spd21)	544,00	<2000
	177°C (20rpm, spd21)	202,30	<1000

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 6: Curva de viscosidade rotacional do AMP 55/75.



Fonte: Próprio Autor.

Para a determinação das temperaturas de usinagem e de compactação utilizou-se como referência as viscosidades adotadas para o CAP 50/70, resultando nas temperaturas de 157°C para a temperatura do CAP para usinagem e de 147°C para compactação.

3.4.1.3 Verificação da Dosagem do Binder

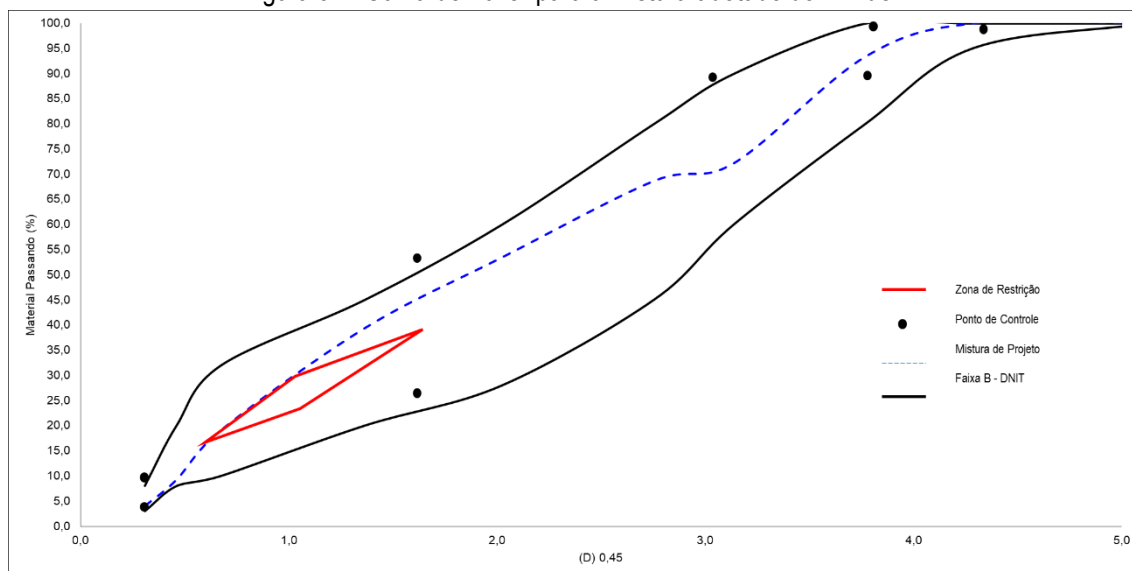
Para a mistura asfáltica Binder adotou-se o enquadramento na Faixa B do DNIT. A Tabela 3.7 apresenta a proporção dos materiais enquadrados na Faixa indicada por meio da avaliação da curva de Fuller (Figura 3.7), bem como a granulometria real da mistura conforme o traço aprovado para o empreendimento.

Tabela 3. 7: Mistura adotado para a dosagem do "Binder"

Peneiras		Brita 25		Brita 12		Pó de Pedra		Areia		Projeto	FAIXA"B" DNIT	
POL	mm	Total	30,0%	Total	21,0%	Total	39,0%	Total	10,0%		031/2006- ES	
1 1/2"	38,1	100,0	30,0	100,0	21,0	100,0	39,0	100,0	10,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	100,0	30,0	100,0	21,0	100,0	39,0	100,0	10,0	100,0	95,0	100,0
3/4"	19,1	78,1	23,4	100,0	21,0	100,0	39,0	100,0	10,0	93,4	80,0	100,0
1/2"	12,7	7,4	2,2	100,0	21,0	100,0	39,0	100,0	10,0	72,2	60,0	90,0
3/8"	9,5	1,1	0,3	92,1	19,3	100,0	39,0	100,0	10,0	68,7	45,0	80,0
4	4,8	0,3	0,1	22,2	4,7	99,5	38,8	99,3	9,9	53,5	28,0	60,0
10	2,0	0,3	0,1	0,7	0,1	75,8	29,6	96,0	9,6	39,4	20,0	45,0
40	0,42	0,3	0,1	0,3	0,1	34,9	13,6	54,1	5,4	19,2	10,0	32,0
80	0,18	0,3	0,1	0,3	0,1	18,2	7,1	20,2	2,0	9,3	8,0	20,0
200	0,074	0,2	0,1	0,2	0,0	8,5	3,3	5,9	0,6	4,0	3,0	8,0

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 7: Curva de Fuller para a mistura adotado do “Binder”



Fonte: Próprio Autor.

Foram moldados corpos de prova para verificação dos parâmetros volumétricos da mistura, para confirmação dos parâmetros volumétricos de projeto, com determinação de Gmm por meio de Rice Test. A Tabela 3.8 apresenta os parâmetros encontrados.

Tabela 3. 8: Parâmetros Volumétricos obtidos na dosagem do “Binder”.

Teor de Ligante (%)	4,5	
Densidade Máxima Medida - Gmm	2,469	Especificação (SUPERPAVE)
Densidade Aparente - Gmb (g/cm³)	2,386	
Volume de Vazios - Vv (%)	4,2	= 4%
Vazios com Betume - VCB (%)	110,46	-
Vazios do Agregado Mineral - VAM (%)	15	Min 13
Relação Betume/Vazios - RBV (%)	71	Entre 65 e 75

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.4 Verificação da Dosagem da Mistura Faixa C

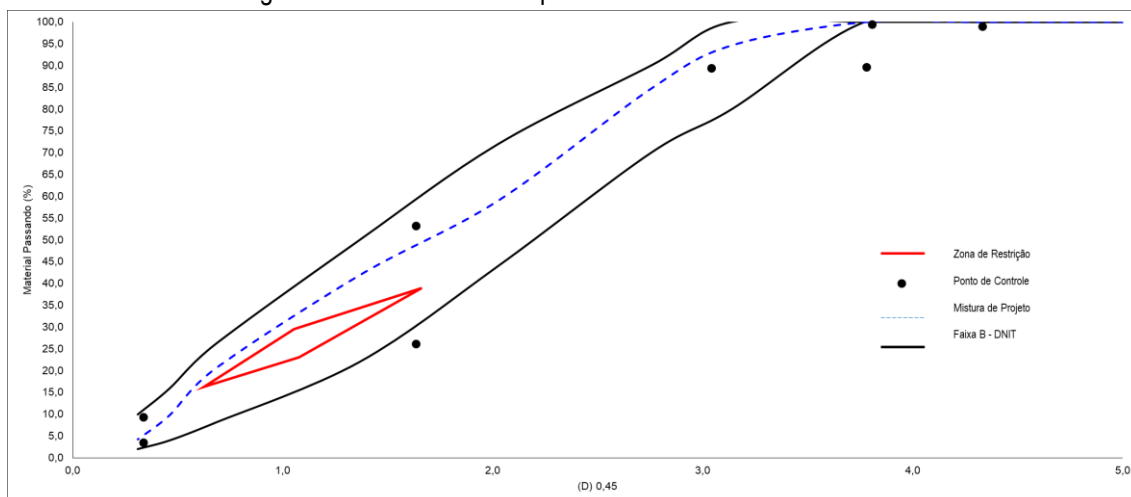
Para a mistura asfáltica da Capa adotou-se o enquadramento na Faixa C do DNIT. A Tabela 3.9 apresenta a proporção dos materiais enquadrados na Faixa indicada por meio da avaliação da curva de Fuller (Figura 3.8), bem como a granulometria real da mistura conforme o traço aprovado para o empreendimento. Para o Faixa C foi utilizado o Filler Cal Hidratada.

Tabela 3. 9: Mistura adotado para a dosagem do Faixa C.

Peneiras	Brita 19		Brita 12		Pó de Pedra		Areia		Filer		Projeto	Especificação		
	POL	mm	Passando%	16,0%	Total	32,0%	Total	41,0%	Total	9,0%		Total	2,0%	FAIXA "C" DNIT
1 1/2"	38,1	100,0	16,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	9,0	100,0	2,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	100,0	16,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	9,0	100,0	2,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	99,8	16,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	9,0	100,0	2,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	66,4	10,6	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	9,0	100,0	2,0	94,6	80,0	100,0
3/8"	9,5	20,2	3,2	92,1	29,5	100,0	41,0	100,0	9,0	100,0	2,0	84,7	70,0	90,0
4	4,8	1,0	0,2	22,2	7,1	99,5	40,8	99,3	8,9	99,3	2,0	59,0	44,0	72,0
10	2,0	0,2	0,0	0,7	0,2	75,8	31,1	96,0	8,6	96,0	1,9	41,9	22,0	50,0
40	0,42	0,2	0,0	0,3	0,1	34,9	14,3	54,1	4,9	54,1	1,1	20,4	8,0	26,0
80	0,18	0,2	0,0	0,3	0,1	18,2	7,5	20,2	1,8	20,2	0,4	9,8	4,0	16,0
200	0,074	0,2	0,0	0,2	0,1	8,5	3,5	5,9	0,5	5,9	0,1	4,3	2,0	10,0

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 8: Curva de Fuller para a mistura adotada na Faixa C



Fonte: Próprio Autor.

De forma idêntica ao Binder, foram moldados corpos de prova para verificação dos parâmetros volumétricos da mistura Faixa C, para confirmação dos parâmetros volumétricos de projeto, com determinação de Gmm através de Rice Test. A Tabela 3.10 apresenta os parâmetros encontrados.

Tabela 3. 10: Parâmetros Volumétricos obtidos na dosagem do Faixa C

Teor de Ligante (%)	4,9	
Densidade Máxima Medida - Gmm	2,469	Especificação (SUPERPAVE)
Densidade Aparente - Gmb (g/cm ³)	2,369	
Volume de Vazios - Vv (%)	4,06	= 4%
Vazios com Betume - VCB (%)	11,3	-
Vazios do Agregado Mineral - VAM (%)	15,35	Min 13
Relação Betume/Vazios - RBV (%)	73,56	Entre 65 e 75

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.5 Resistência a Tração

Na Tabela 3.11 apresenta-se os resultados de Resistência a Tração para os corpos de prova da camada de Binder e para o concreto asfáltico Faixa C. O material atendeu as exigências da norma DNIT 136/2010. Os resultados apresentaram resistência maior que a especificada na norma, indicando que a mistura está adequada para utilização por este parâmetro.

Tabela 3. 11: Ensaio de resistência à tração indireta das camadas de “Binder” e Faixa C

		“Binder”	Faixa C
RT (MPa)	I	1,43	0,88
	II	1,21	1,36
	III	1,23	0,9
	Média	1,29	1,05
Especificação		> 0,65	> 0,65

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.6 Dano por Umidade Induzida

A Tabela 3.12 indica os resultados de Lottman para os corpos de prova da camada de Binder sem a utilização de dope, e na Tabela 3.13 com acréscimo de 1% de dope. Na Tabela 3.14 apresenta-se os resultados de Lottman para o CA Faixa C. Os resultados mostram que a camada de Binder é susceptível a presença de água, devido a baixa adesividade entre os agregados e o CAP, justificando a necessidade de utilização de melhorador de adesividade.

Tabela 3. 12:Ensaio de Lottman

	RT (MPa)	Rtu (MPa)	Lottman (%)	Especificação (SUPERPAVE)
Binder sem DOPE	0,98	0,70	72	
Binder com DOPE	0,64	0,59	93	> 80
CA Faixa C	0,76	0,59	78	

Fonte: Próprio Autor.

O “Binder” não previu o uso de filler, e o Consórcio Construtor, após análise econômica, informou ao DNIT da opção de utilização de melhorador de adesividade. Para o CA Faixa C, como o ensaio de adesividade com o AMP foi satisfatório, não foi realizado com a utilização do melhorador de adesividade.

3.4.1.7 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência seguiu as especificações das normas ASTM-D 4123-82, que calcula o módulo com o deslocamento resiliente total (MR Total), NBR 16018, que mede o módulo utilizando o deslocamento instantâneo (MR Instantâneo) e DNIT 135/2018, que mede o módulo resultante de solicitações entre 5% e 30% da sua resistência a tração. Para a realização dos ensaios foram moldados corpos de prova distintos. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3. 13: Características das camadas do pavimento monitorado

	Faixa B		
	ASTM-D 4123-82	NBR 16018	DNIT 135/2018
CP1 (MPa)	4684	6525	8737
CP2 (MPa)	2994	4435	8727
CP3 (MPa)	3942	6007	7877
Média	3873	5656	8447

	Faixa C		
	ASTM-D 4123-82	NBR 16018	DNIT 135/2018
CP1 (MPa)	2232	3307	6865
CP2 (MPa)	2500	3778	7618
CP3 (MPa)	2755	4077	7037
Média	2496	3721	7173

Fonte: Próprio Autor.

Este parâmetro, que é utilizado como o principal indicador de resposta da camada asfáltica, foi utilizado para comparação com as determinações obtidas por meio da retroanálise, como também com os valores determinados com os sensores em campo. É perceptível que as misturas utilizadas para essa solução possuem elevado módulo de resiliência, logo elevado grau de rigidez. Pode-se atribuir esta escolha na composição da massa devido ao trecho apresentar uma alta incidência de tráfego pesado, operando com temperaturas elevadas.

3.4.1.8 Flow Number

O ensaio do Flow Number seguiu as especificações das normas DNIT 184/2018, tendo as curvas dos ciclos vs. deformação plástica ajustadas pelo modelo de Franken, definindo-se o *Flow Number* para cada um dos corpos de prova ensaiados, com o resumo dos resultados apresentados na Tabela 3. 14.

Tabela 3. 14: Características das camadas do pavimento monitorado

Revestimento	CP 1 (Ciclo)	CP 2 (Ciclo)	CP 3 (Ciclo)	Média (Ciclo)
Faixa B	68	91	96	85
Faixa C	210	180	144	178

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

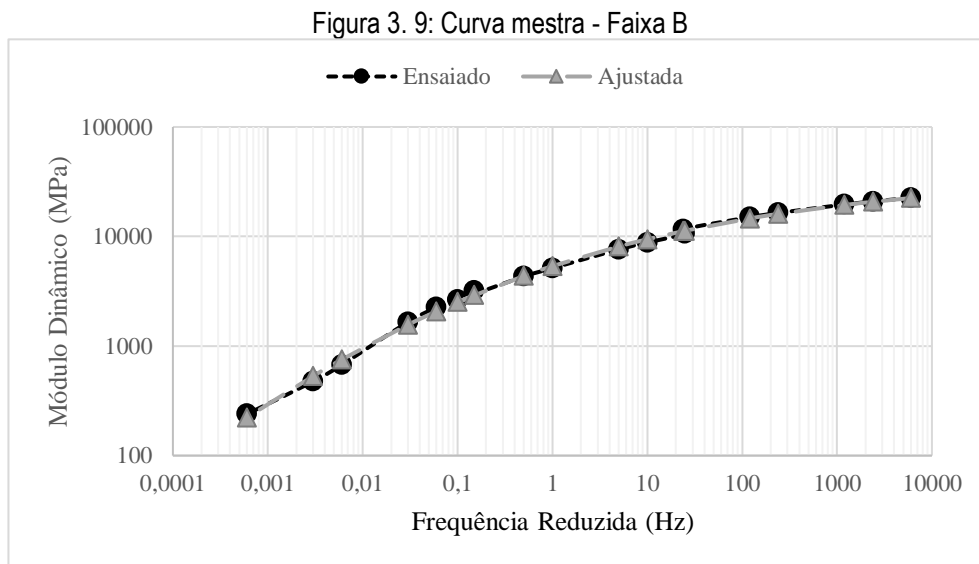
Esperava-se um resultado de *Flow Number* para a Faixa C melhor, devido a utilização do ligante AMP 55/75, entretanto, além do baixo resultado, a diferença deste para o Faixa B foi pequeno. Este comportamento do Faixa C pode ser atribuído a sua granulometria, que possui um esqueleto mineral mais fino, o que torna a mistura mais susceptível a deformações permanentes. Os baixos valores do Faixa B

também não eram esperados, devido a sua maior robustez granulométrica, entretanto, a utilização do CAP 50/70 pode ser o indicador direto dos valores medidos no ensaio.

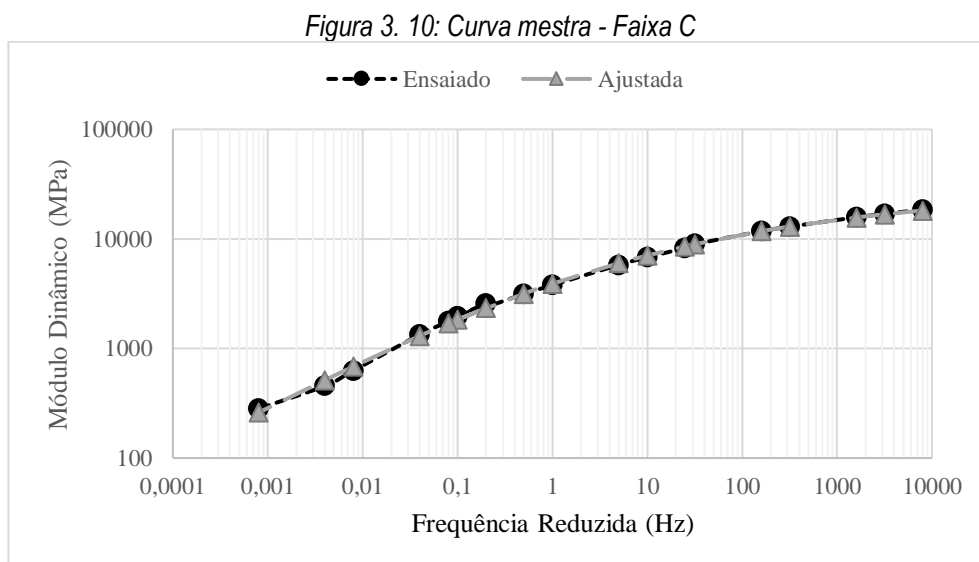
Buscou-se obter maior resistência a deformação plástica, de forma que o revestimento pudesse apresentar melhor desempenho, devido a operação da camada ocorrer com tráfego pesado ($N = 9,3.10^7$) e temperaturas elevadas (temperatura do ar de 40°C em determinados horários do dia).

3.4.1.9 Módulo Dinâmico

O ensaio seguiu as especificações da norma DNIT 416/2019, utilizando a prensa AMPT, nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C. Nas Figuras 3.9 e 3.10 estão apresentados os resultados das curvas mestras do módulo dinâmico das misturas para as Faixas B e C.



Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022



Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

As curvas mestras espelham o comportamento da camada asfáltica com a variação da frequência, o que forneceu um indicativo de como ocorrem as tensões e deformações com a variação das cargas solicitantes, para uma temperatura de referência, que neste ensaio foi de 20°C. Conforme ilustrado, foi obtido um comportamento para a camada de ligação com módulos maiores que a camada de revestimento.

Ao verificar o valor do módulo dinâmico para uma frequência de 10 Hz, verifica-se que ocorreram maiores valores de rigidez para a Faixa B. Apesar de se esperar um valor de módulos dinâmicos com maiores valores para a mistura asfáltica da Faixa C, devido a utilização de AMP na sua constituição, isto não ocorreu, o que se pode ser atribuído a presença de um esqueleto mineral mais robusto na Faixa B. Outra importante informação obtida com o ensaio são os coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para a determinação do módulo dinâmico, como também dos fatores de ajuste da frequência reduzida, que serão utilizados para análise das respostas do pavimento utilizando os sensores da instrumentação, apresentados na Tabela 3.15.

Tabela 3. 15: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo dinâmico

Mistura	Shift Factor			Coeficiente do modelo sigmoidal			
	a_1	a_2	a_3	δ	α	β	γ
Capa	0,0012	-0,1819	3,1585	3,18	4,32	1,33	0,39
Binder	0,0015	-0,1949	3,2907	2,65	4,76	1,60	0,50

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

3.4.1.10 Ensaio de Fadiga à Tração Direta – Modelo S-VECD

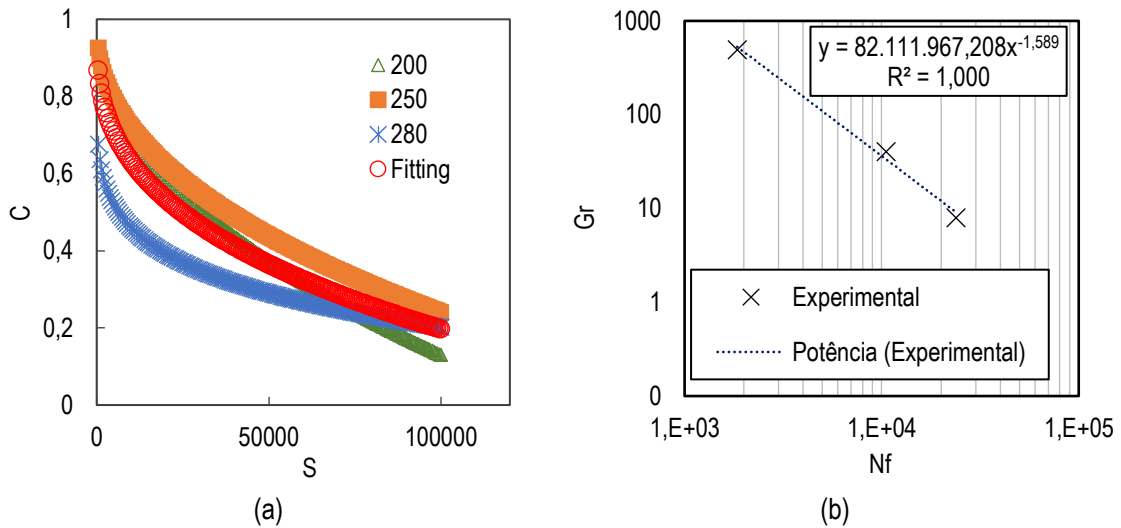
Na Tabela 3.16 são apresentados os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos para cada uma das deformações conduzidas durante o ensaio de tração direta, bem como os coeficientes obtidos para a curva de ajuste para amostras de CA Faixa C do Trecho Experimental da BR 101. Na Figura 3.11 (a) e (b) são apresentadas as curvas C vs. S e o critério de falha do Gr, que é calculado a partir do histórico de carregamento, a cada ciclo, da taxa de mudança média da energia de pseudodeformação, apresentando um protocolo para previsão de fadiga com elevada eficácia.

Tabela 3. 16: Coeficientes C_{11} e C_{12} das amostras de Faixa C da BR 101

Parâmetro de ajuste	Deformação (μs)			Fitting
	200	250	280	
C_{11}	0,0036	0,0049	0,1121	0,0160
C_{12}	0,4766	0,4374	0,1705	0,340

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

Figura 3. 11: (a) Curvas C vs. S e (b) Curva de Gr das amostras de Faixa C da BR 101



Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

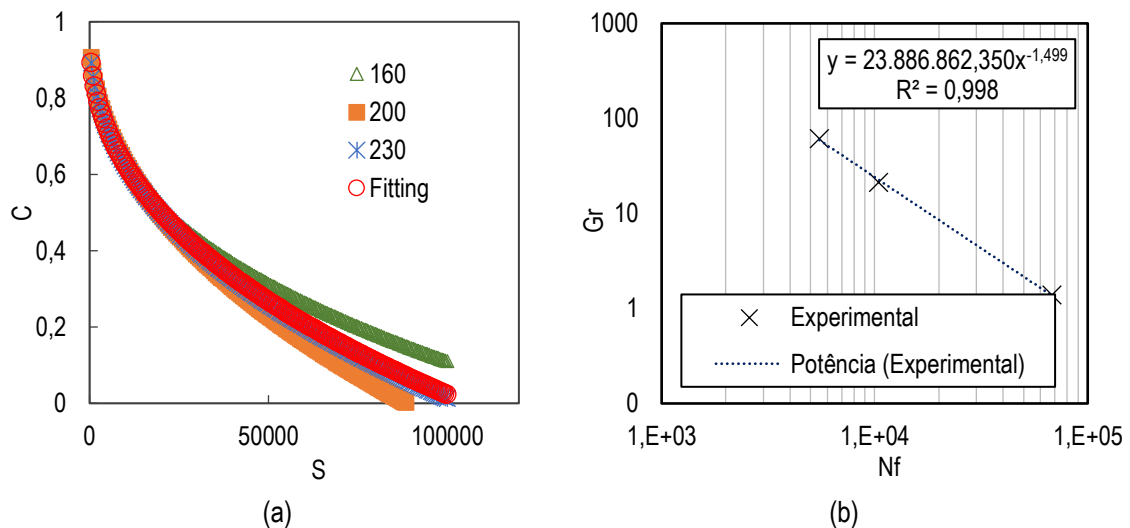
Na Tabela 3.17 são apresentados os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos para cada uma das deformações conduzidas durante o ensaio de tração direta, bem como os coeficientes obtidos para a curva de ajuste para amostras de Binder do Trecho Experimental da BR 101. Na Figura 3.12 (a) e (b) são apresentadas as curvas CxS e o critério de falha do Gr, também apresentando um protocolo para previsão de fadiga com elevada eficácia..

Tabela 3. 17: Coeficientes C_{11} e C_{12} das amostras de Binder da BR 101

Parâmetro de ajuste	Deformação (μs)			Fitting
	160	200	230	
C_{11}	0,0119	0,0055	0,0080	0,00794
C_{12}	0,3747	0,4574	0,4187	0,4180

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

Figura 3. 12: (a) Curvas C x S e (b) Curva de Gr das amostras de Binder da BR 101



Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

3.4.2 - Ensaio “in situ”

Neste tópico estão apresentados os ensaios de caracterização “in situ” realizados no trecho instrumentado: ensaios de Pêndulo Britânico, Mancha de Areia e Levantamento Deflectométrico com uso do FWD. Os ensaios foram realizados após a conclusão da restauração, e são ensaios que podem ser repetidos periodicamente para acompanhar o desempenho do pavimento em função do tempo.

Tabela 3. 18: Ensaio “in situ” executados na presente pesquisa.

Normas	
NBR 16780 ISO - 2019	Pêndulo Britânico
NBR 16504 - 2016	Mancha de Areia
DNER PRO 273/96	Levantamento Deflectométrico

Fonte: Próprio Autor.

3.4.2.1 Pêndulo britânico

O Ensaio de Pêndulo teve como objetivo determinar o valor da aderência dos pneus, em quaisquer tipos de situação, sendo medido pelo equipamento chamado Pêndulo Britânico. De forma a subsidiar sua caracterização, o trecho estudado, composto por 200 metros, foi dividido em 11 estacas, distando entre si 20 metros. A Tabela 3.19 apresenta os valores medidos durante o levantamento em campo.

Tabela 3. 19: Características das camadas do pavimento monitorado

Estaca	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Valor 5	Média	Classificação
867	107	103	108	115	114	109	Muito rugosa
868	114	118	114	120	117	117	Muito rugosa
869	114	115	120	123	124	119	Muito rugosa
870	116	111	107	118	115	113	Muito rugosa
871	104	103	104	104	105	104	Muito rugosa
872	104	110	106	107	108	107	Muito rugosa
873	110	107	110	111	110	110	Muito rugosa
874	113	113	113	115	116	114	Muito rugosa

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

De posse dos resultados, torna-se evidente que o revestimento apresenta uma superfície muito rugosa quanto a resistência a derrapagem. O manual de restauração de pavimentos asfálticos DNIT – IPR-

720, 2006, recomenda valores maiores que 55. Logo, os requisitos de microtextura normalizados são satisfeitos.

3.4.2.2 Mancha de Areia

O ensaio de Mancha de Areia é um método volumétrico que avalia a macro textura do revestimento, que influencia diretamente na aderência dos pneus, realizado de forma semelhante ao pêndulo britânico. Espalha-se uma quantidade padronizada de uma areia calibrada e mede-se o diâmetro da área circular resultando do espalhamento. Na Tabela 3.20 estão apresentadas as alturas médias da mancha de areia e suas respectivas classificações.

Tabela 3. 20: Características das camadas do pavimento monitorado.

Estaca	Valor 1 (cm)	Valor 2 (cm)	Valor 3 (cm)	Valor 4 (cm)	Hs (mm)	Classificação
867	30,00	30,00	25,00	29,00	0,39	Fina
868	30,00	30,50	29,00	30,50	0,35	Fina
869	31,00	33,50	29,00	28,00	0,34	Fina
870	31,00	32,00	29,00	33,00	0,33	Fina
871	27,50	33,00	29,00	29,50	0,36	Fina
872	36,00	31,00	33,00	32,00	0,29	Fina
873	30,00	35,00	30,00	35,00	0,30	Fina
874	28,00	32,00	31,00	33,00	0,33	Fina

Fonte: Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, 2022

Para altura da mancha de areia, o manual de restauração de pavimentos asfálticos DNIT – IPR-720 (2006), sugere limites da ordem de 0,6mm a 1,2mm. Seguindo a classificação do manual, foi observado que a textura do revestimento é classificada como fina, logo, os valores encontrados estão abaixo do recomendado, o que indica uma textura muito fechada, podendo diminuir a aderência pneu/pavimento. Um dos fatores que pode contribuir para esta resposta é a granulometria da mistura asfáltica da Faixa C, que possui uma estrutura bastante densa.

3.4.2.3 Levantamento deflectométrico com Falling Weight deflectometer (FWD)

O ensaio de campo com uso do FDW foi procedido seguindo a norma do DNER PRO 273, com auxílio do DNIT do estado de Pernambuco e da empresa JBR Engenharia. Na Figura 3.13 está ilustrado o aparelho FWD em sua passagem sobre o trecho experimental analisado.

Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacias de deflexão), apresentados na Tabela 3.21, foram medidos por 14 geofones dispostos ao longo de uma barra metálica com os seguintes espaçamentos: 0; 20; 30; 45; 65; 90, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 235 e 250 (centímetros), vale ressaltar, que para o procedimento de retroanálise citado a seguir só foram utilizadas as 7 primeiras leituras, uma vez que são suficientes para a delineação da bacia de deformação e a realização da retroanálise. Os níveis de carregamento utilizados para o ensaio foram em torno de 41KN, 80KN e 100KN.

Figura 3. 13: Trecho experimental analisado com o FWD



Fonte: Arquivo Pessoal.

Tabela 3. 21: Levantamento deflectômetro pelo Falling Weight Deflectometer (FWD)

Estaca	Carga (KN)	Geofones ($\times 10^{-3}$ mm)						
		D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)
1	42,66	207	130,2	105,4	99,5	82,6	70,3	54,5
1	41,20	193,5	124,3	101,2	95,3	79	67,4	52,3
1	84,47	365,5	250,9	219,9	204,1	172,7	144	113,5
1	86,09	358,5	248,2	217	200,9	170,6	141,2	111,1
1	95,62	546,9	373,9	319,3	293,4	255,6	212,8	168,2
1	96,92	538,1	378,4	323,1	296,4	258,2	215,2	170,3
1	92,67	502,8	299,8	244,2	237,4	211,1	179	141,9
1	88,32	478,3	295,6	242,4	234,2	208,2	176,6	140,1
2	41,91	186,7	109,2	88,1	82,6	72,2	62	48,3
2	42,69	186,2	112	91,3	85,8	74,8	64,8	50,9
2	97,28	502	290	253,6	238,8	212,2	181,5	144,3
2	86,85	496,5	292,5	255,5	240,4	213,1	182,7	145,7
2	91,65	473,7	297,4	255,5	237,5	205,9	172,2	136,8
2	97,30	471,8	293,3	253	235,5	203,7	170	135
3	41,92	182,5	131,1	100	86,3	73	61,5	47,1
3	41,77	181,9	131	102,1	89,1	75,9	64,6	50,6
3	96,02	444,8	290,3	257,2	239,2	208,5	177,7	141,7
3	97,72	440,8	289,3	256,4	238,1	207,2	176,4	140,2
3	96,62	464,4	297,4	240,2	215,1	189,3	160,9	128,7
3	94,93	461	294,9	241,1	216,2	190,6	161,9	130,1
3	94,76	330	264,3	246,8	233,4	208,5	181,8	147,7
3	96,76	362	265,4	247	234,2	210,1	183	149,5

Fonte: Arquivo Pessoal

As bacias deflectométricas obtidas pelo ensaio do FDW foram corrigidas em relação a carga aplicada pela placa na superfície do pavimento. Segundo Rocha Filho (1996), mesmo mantendo a configuração do carregamento, quanto menor a temperatura da superfície do revestimento maior a rigidez da camada asfáltica, por outro lado, quanto maior a temperatura menor e a rigidez da camada asfáltica. Essa correção foi realizada com uso da equação 26.

$$DN = DM \cdot \frac{Q1}{Q2} \quad \text{Equação 26}$$

Sendo:

DN – Deflexão normalizada;

DM – Deflexão medida no campo;

Q1 – Carga padrão;

Q2 – Carga medida.

Essa correção é importante, pois mesmo mantendo constante a configuração de aplicação de carregamento do FWD, a carga real aplicada é modificada em função da rigidez do pavimento. Na Tabela 3.22 estão apresentados os valores obtidos no ensaio de FWD e sua respectiva correção em relação a carga.

Tabela 3. 22: Correção em relação a carga para levantamento deflectométrico pelo Falling Weight Deflectometer (FWD)

Estaca	Carga (KN)	Geofones ($\times 10^{-3}$ mm)						
		D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)
1	41	198,95	125,13	101,30	95,63	79,39	67,56	52,38
1	41	192,56	123,70	100,71	94,84	78,62	67,07	52,05
1	80	346,16	237,62	208,26	193,30	163,56	136,38	107,49
1	80	333,14	230,64	201,65	186,69	158,53	131,21	103,24
1	100	571,95	391,03	333,93	306,84	267,31	222,55	175,90
1	100	555,20	390,43	333,37	305,82	266,41	222,04	175,71
1	80	434,06	258,81	210,81	204,94	182,24	154,53	122,50
1	80	433,24	267,75	219,57	212,14	188,59	159,96	126,90
2	41	182,65	106,83	86,19	80,81	70,63	60,65	47,25
2	41	178,83	107,57	87,69	82,40	71,84	62,23	48,88
2	100	516,04	298,11	260,69	245,48	218,13	186,57	148,33
2	80	457,34	269,43	235,35	221,44	196,29	168,29	134,21
2	100	516,86	324,50	278,78	259,14	224,66	187,89	149,26
2	100	484,89	301,44	260,02	242,03	209,35	174,72	138,75
3	41	178,49	128,22	97,81	84,41	71,40	60,15	46,07
3	41	178,55	128,59	100,22	87,46	74,50	63,41	49,67
3	100	463,24	302,33	267,86	249,11	217,14	185,07	147,57
3	100	451,08	296,05	262,38	243,66	212,03	180,52	143,47
3	100	480,65	307,80	248,60	222,62	195,92	166,53	133,20
3	100	485,62	310,65	253,98	227,75	200,78	170,55	137,05
3	100	348,25	278,92	260,45	246,31	220,03	191,85	155,87
3	100	374,12	274,29	255,27	242,04	217,14	189,13	154,51

Fonte: Arquivo Pessoal

3.4.2.4 Retroanálise dos Módulos de Resiliência das Camadas do Pavimento

Para a retroanálise dos módulos de resiliência foi utilizado o programa BackMeDiNa. Este *software* foi desenvolvido para auxiliar na retroanálise de bacias deflectométricas obtidas com levantamentos realizados com FWD e está disponibilizado pelo DNIT no site <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/solicitacao-de-download-do-medina>.

Inicialmente, é preenchido o modelo de arquivo de bacias, disponibilizado pelo programa, contendo os dados do levantamento deflectométrico, temperatura do ar e pavimento, carga aplicada, raio do carregamento, faixa e localização da rodovia que devem ser importados para o programa. Para o coeficiente de Poisson foram utilizados os valores de acordo com o material constituinte de cada camada. O cálculo pode ser iniciado após a importação do arquivo com as bacias deflectométricas e o cadastramento da estrutura das camadas do pavimento existente, visando a obtenção de bons resultados é necessário retro analisar até que o erro se torne constante. A interface do programa é apresentada na Figura 3.14.

Figura 3. 14: Tela inicial do software BackMeDiNa

The screenshot shows the BackMeDiNa v.1.2.0 (July 2020) interface. It features a 'Projeto' tab and a 'Ajuda' link. The main area is divided into several sections:

- SEÇÃO HOMOGÊNEA:** A table with columns for 'BACIA', 'ESTACA', 'FAIXA', and 'TRILHA'.
- Input Fields:** Fields for 'ENSAIO:', 'CARGA (kgf):', 'RAIO (cm):', 'T AR: °C', 'T PAV: °C', and 'SENSORES:' (0-8).
- Deflection Data:** Fields for 'DISTÂNCIA (cm):', 'DEFLEXÕES (µm):', 'CALCULADAS (µm):', 'DIFERENÇAS (µm):', and 'ERRO (%):'.
- Buttons:** 'ESTRUTURA >>', 'RETROANALISAR', and 'RETROANALISAR TODAS >>'.
- Layer Table:** A table with columns: 'CAMADA', 'MATERIAL', 'ESPESSURA (cm)', 'MÓDULO (MPa)', 'COEF POISSON', and 'ADERÊNCIA'. Row 1 is highlighted.
- Graph:** A plot titled 'DEFLEXÕES NORMALIZADAS' with 'distância (cm)' on the x-axis (0-180) and a grid for y-axis values.

Fonte: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.6/manual-backmedina-1-3-0.pdf>

Sobre a interface do programa, é possível visualizar na parte superior esquerda a aba “Projeto”, onde após selecionada aparecem as opções de importar arquivos de bacias, o qual o usuário pode adicionar uma planilha Excel® salva na extensão CSV com os dados a serem retroanalisados.

O programa também permite que o usuário faça a entrada de dados de forma manual, caso opte por não importar um arquivo. Na linha 1 visualiza-se a identificação do programa BackMeDiNa, na linha 2 é inserido o nome da seção homogênea, na linha 3 é indicado o raio do carregamento aplicado pelo

equipamento no pavimento, na linha 4 contêm o título dos dados e a partir da linha 5 são inseridos os dados de até 100 bacias de um mesmo segmento homogêneo.

Após inserir os dados no programa, foi preenchida a configuração da estrutura do pavimento em questão, para que dessa forma seja dada início a retroanálise e definição da bacia teórica (retro analisada). Para a situação da pesquisa foi adotado para a camada de revestimento a espessura de 16 cm (4cm de CA faixa C e 12cm de CA faixa B), para base adotou-se uma camada com espessura de concreto em cimento Portland de 20 cm, e para a sub-base uma camada de concreto compactado a rolo (CCR) com 10cm de espessura e, por fim, o subleito com espessura semi-infinita.

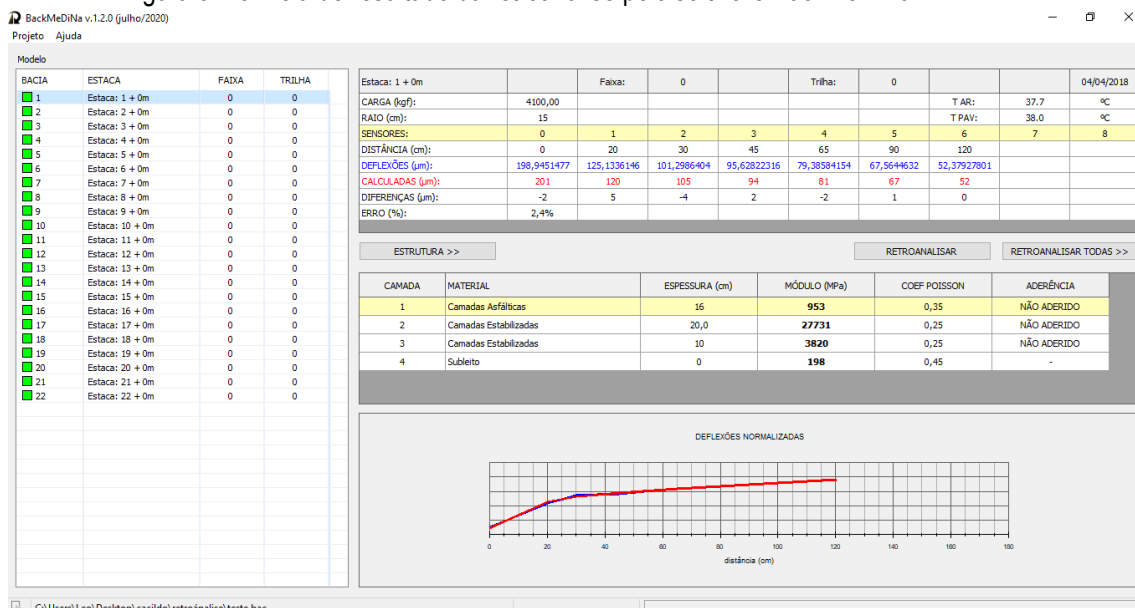
Os valores de módulos de resiliência iniciais e coeficientes de Poisson estão apresentados na tabela 3.23.:

Tabela 3. 23: Módulos de Resiliência iniciais e Coeficientes de Poisson das camadas da estrutura do pavimento.

	MR Min (MPa)	MR Max (MPa)	Coeficientes de Poisson
Revestimento	2000	5000	0,30
Base	15000	25000	0,25
Sub-Base	10000	15000	0,25
Subleito	100	200	0,45

Na Figura 3.15 é apresentada a tela de resultado da retroanálise pelo software BackMeDiNa.

Figura 3. 15: Tela de resultado da retroanálise pelo software BackMeDiNa



Fonte: Arquivo Pessoal.

Após o término da rotina do programa são exibidos os resultados obtidos, como módulos de resiliência e o erro. As cores indicadas abaixo do ícone Bacia, indicam a compatibilidade da bacia medida em campo com a teórica, onde a cor verde indica erro inferior a 5%, valor considerado excelente; a cor amarela indica erro entre 5 e 10%, sendo considerado aceitável, e a cor vermelha indica erro superior a 10%, na Tabela 3.24 estão apresentados os módulos obtidos na retroanálise e seus respectivos erros.

Tabela 3. 24: Módulos obtidos por retroanálise no BackMeDiNa (MPa)

N°	MR _{CA}	M _{CCP}	MR _{CCR}	MR _{SL}	RMS(%)	N°	MR _{CA}	M _{CCP}	MR _{CCR}	MR _{SL}	RMS(%)
1	953	27.731	3.820	198	2,4	12	787	32.551	16.409	147	0,9
2	1.028	27.025	4.264	201	2,4	13	953	28.457	8.791	168	0,9
3	1.410	27.102	3.868	190	0,9	14	1.001	30.893	5.172	181	0,8
4	1.489	27.745	4.716	196	0,9	15	1.205	20.804	3.931	232	5,0
5	989	21.576	11.718	143	1,3	16	1.214	24.678	2.294	214	4,6
6	1.095	20.813	10.210	145	1,5	17	1.161	33.965	3.974	169	0,6
7	797	35.378	7.915	161	2,3	18	1.221	33.364	3.057	175	0,6
8	838	33.069	15.449	155	2,2	19	953	30.210	6.167	193	2,9
9	929	37.321	14.890	218	2,1	20	953	31.324	2.824	187	2,6
10	990	39.200	13.155	210	2,1	21	3.050	44.952	2.124	156	0,7
11	849	38.283	7.421	166	1,1	22	2.013	49.212	2.372	156	0,8

Fonte: Arquivo Pessoal.

De posse dos módulos pelo processo de retroanálise, procedeu-se a correção em relação da temperatura, tendo em vista que o ligante asfáltico é um material termo sensível e sofre interferência dos resultados devido a esta variável.

Corrigiu-se os módulos de resiliência em função de uma temperatura de referência, com finalidade de regularizar os resultados obtidos na retroanálise para uma temperatura padrão (25°C), utilizou-se a equação 27, experimental, desenvolvida por Rodrigues (1991) que relaciona a temperatura com a profundidade no revestimento:

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar}) \cdot [1 - \exp^{(0,06855x - 0,002633x^2)}] \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

T(x) é a temperatura na profundidade x do revestimento, em °C;

T_{sup} é a temperatura da superfície do revestimento, em °C;

T_{ar} é a temperatura do ar, em °C;

x é a profundidade no revestimento onde se deseja conhecer a temperatura, em cm.

Para o cálculo do módulo corrigido, foi adotada a temperatura no centro da camada como sendo a temperatura média. Utilizou-se a equação 28, definida em laboratório por Pinto (1991) por ensaios por compressão diametral, foi realizada a correção para a temperatura de referência. Na Tabela 3.25 estão apresentados os valores de módulos de resiliência corrigidos.

$$M_R = e^{0,051(T_C - T_R)M_C} \quad \text{Equação 28}$$

Sendo:

MR é o módulo de resiliência convertido para a temperatura padrão;

MC é o módulo de obtido em campo;

TR é a temperatura de referência, 25 °C;

TC é a temperatura de campo.

Tabela 3. 25: Módulos após correção em relação a temperatura

N° da bacia	MÓDULOS RETROANALISADOS (MPa)				
	MR _{CA}	M _{CCP}	MR _{CCR}	MR _{SL}	RMS(%)
1	1.832	27.731	3.820	198	2,4
2	1.985	27.025	4.264	201	2,4
3	2.836	27.102	3.868	190	0,9
4	3.019	27.745	4.716	196	0,9
5	1.925	21.576	11.718	143	1,3
6	2.160	20.813	10.210	145	1,5
7	1.554	35.378	7.915	161	2,3
8	1.672	33.069	15.449	155	2,2
9	1.804	37.321	14.890	218	2,1
10	1.953	39.200	13.155	210	2,1
11	1.680	38.283	7.421	166	1,1
12	1.595	32.551	16.409	147	0,9
13	1.937	28.457	8.791	168	0,9
14	2.101	30.893	5.172	181	0,8
15	2.307	20.804	3.931	232	5
16	2.359	24.678	2.294	214	4,6
17	2.408	33.965	3.974	169	0,6
18	2.604	33.364	3.057	175	0,6
19	2.038	30.210	6.167	193	2,9
20	2.068	31.324	2.824	187	2,6
21	6.398	44.952	2.124	156	0,7
22	4.303	49.212	2.372	156	0,8

Fonte: Arquivo Pessoal.

Ao concluir a retroanálise verificou-se que os resultados de módulo para a camada asfáltica apresentaram valores menores que aqueles esperados em campo para camadas asfálticas novas, ensaiados em laboratório. Este comportamento é esperado, pois os módulos de resiliência das camadas asfálticas executadas sobre placas de concreto, pavimentos compostos, apresentam valores relativamente baixos, quando comparados com os valores encontrados para o material em laboratório, atribuindo-se este comportamento a camada asfáltica trabalhar unicamente a compressão. Os módulos das camadas de Placa, CCR e subleito estão condizentes com o comportamento destes materiais.

3.5 - Características Intrínsecas

3.5.1 - Instalação do Sistema de Instrumentação

Para acompanhamento da evolução do comportamento mecânico da estrutura do pavimento, torna-se imprescindível avaliar como ocorre a distribuição de tensões e deformações impostas pelo tráfego ao longo do tempo de aplicação da carga. A função da combinação do revestimento asfáltico, a base e sub-base é de minimizar as tensões e deformações que chegam ao topo do subleito, surgindo a necessidade de avaliar como a dissipação das tensões ocorre ao longo da estrutura do pavimento, buscando garantir que o subleito não deve apresentar deformações plásticas excessivas.

Ademais, no revestimento ainda ocorrem tensões e deformações de tração, oriundas da repetição cíclica do tráfego, que podem causar trincamento por fadiga, o que leva a necessidade de conhecer o comportamento do material asfáltico e os níveis de tensão e deformação a que está submetido, de forma a ter um indicador confiante de que não apresentará trincamento precoce.

Dessa forma, destacam-se na análise mecanística o conhecimento da resposta do pavimento sob carregamento. Como o presente estudo propõe um aprofundamento na caracterização do comportamento da camada asfáltica de revestimento, esta foi escolhida para ser instrumentada.

Foram escolhidos os sensores necessários e a forma de armazenamento dos dados, de maneira a subsidiar o conhecimento das características desejadas. Sendo assim, foram adquiridos “*strain gauges*”, células de tensão, termopares e sensores de temperatura, como também o desenvolvimento de uma cabine de armazenamento de respostas com a variação do tempo.

A determinação da quantidade de sensores foi elemento bastante discutido durante o planejamento da execução do trecho experimental. Silva e Motta (1999), quando da instrumentação da pista experimental do IPR no Rio de Janeiro, informam que houve grande perda de sensores durante a fase de implantação, como também houve grande perda de resposta com o passar do tempo, atribuindo este comportamento as cargas atuantes durante a montagem do trecho instrumentado, como também as solicitações do trecho instrumentado. As autoras reforçam que, caso desejem realizar trechos instrumentados, que o façam com bastantes redundâncias, isto é, que tenham sensores em backup, de forma a não prejudicar o avanço da pesquisa planejada.

Como o planejamento inicial seria o acompanhamento do comportamento da camada asfáltica durante o período de 01 ano, a nível de planejamento considerou-se que 1/3 dos sensores apresentariam falha durante a sua implantação e que ocorreria uma perda de sinal de 1 sensor a cada 4 meses. Esta estimativa de vida dos sensores possibilitou definir a implantação de 4 células de carga, avaliando-se que 1 célula poderia ser perdida na implantação, e que, com a perda de 1 célula a cada 4 meses, ainda seria possível obter dados suficientes para avaliar o comportamento do pavimento ao longo do período planejado de 01 ano.

Para cada célula de carga foi providenciado um conjunto de 3 “*strain gauges*” para promover o conhecimento das deformações nos planos longitudinal, transversal e inclinado 45° em relação ao sentido axial de aplicação da carga. Como também foi escolhido o uso de sensores de temperatura e termopares

para o monitoramento da temperatura da camada asfáltica na profundidade em estudo. Aproveitando-se do estudo em curso, foram adquiridos 06 sensores “*strain gauges*” adicionais para comparar o comportamento da camada asfáltica sobre a junta transversal do pavimento com e sem Geogrelha.

A determinação da capacidade de cada célula de carga foi determinada por meio de modelagem numérica utilizando o AEMC, onde, para um eixo tandem simples, na profundidade a ser instrumentada, haveria uma solicitação da ordem de 0,96 MPa. Desta forma escolheu-se a capacidade de 1,0 MPa para a célula de carga, de forma a possibilitar leituras mais precisas. Entretanto, por tratar de rodovia sem controle de pesagem, o receio de redução da vida útil destes sensores acarretou no planejamento de instalação de outro conjunto de 4 células de carga, com capacidade de 2,5 MPa, servindo de redundância para as células anteriores, também acompanhadas de conjuntos de 3 “*strain gauges*” cada um. Desta forma, o planejamento inicial propôs a implantação de 8 células de carga, 24 “*strain gauges*”, 2 termopares e 2 sensores de temperatura na camada de Binder, e um conjunto de 6 “*strain gauges*” sobre a junta transversal da placa de concreto com e sem Geogrelha.

O principal desafio do dimensionamento dos equipamentos foi a etapa de implantação dos sensores na camada asfáltica, sem que houvesse interferência no processo executivo da mistura asfáltica, logo, tornou-se necessário conciliar uma etapa inicial com altas temperaturas, seguido de uma etapa de compactação, e logo após, o início das solicitações pelo tráfego, sempre tendo como diretriz a garantia da resposta dos sensores para possibilitar caracterizar a camada asfáltica.

A instalação dos sensores procedeu-se no mês de abril de 2019, tendo a participação do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, da Universidade Federal de Campina Grande e do DNIT de Pernambuco, entretanto, devido as dificuldades do avanço da obra, foi necessário aguardar execução da camada de CA Faixa C sobre a camada instrumentada para a conclusão da instrumentação. A montagem do sistema de aquisição de dados ocorreu no mês de outubro do mesmo ano, um mês após a conclusão dos serviços de pavimentação no trecho instrumentado. Passa-se então a apresentar, de forma individualizada, os materiais utilizados na instrumentação do trecho experimental localizado no km 69,9 da BR-101/PE no estado de Pernambuco.

3.5.2 - Materiais

3.5.2.1 *Strain Gauge*

O “*strain gauge*” é um equipamento, do tipo extensômetro, que permite avaliar as deformações observadas na fibra da camada em que estiver imersa. São dispositivos frágeis, quando comparados com a resistência de solos granulares e misturas betuminosas, dessa forma se faz necessária a proteção devida para sua utilização (DNIT, 2008). Na Tabela 3.26 apresenta-se as características dos “*strain gauges*” utilizados na presente pesquisa.

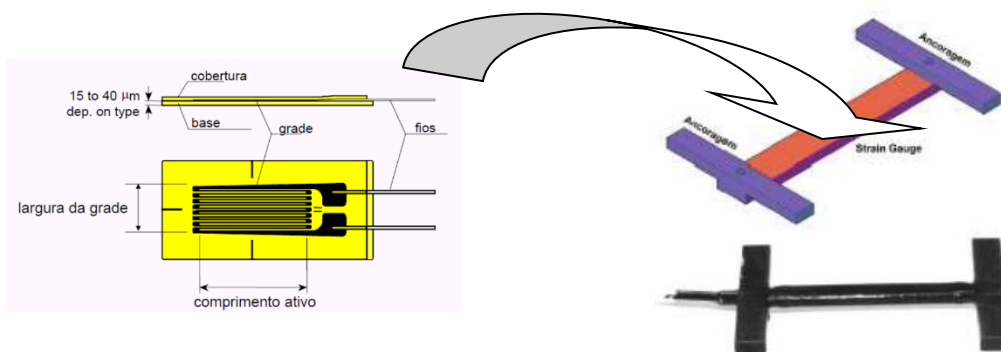
Tabela 3. 26: Características técnicas dos extensômetros.

Tipo	"Strain gauge" de imersão
Temperatura de compensação	-20 a 70°C
Comprimento	50 a 120 mm
Largura de base	próximo a 15 mm
Resistência	pelo menos 350 ohms
Material da Base	acrílica
Coefficiente de expansão linear	próximo a $10,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Cabos e fios	revestidos

Foram instalados no trecho 30 "strain gauges". Devido a fragilidade destes sensores, foi utilizado um sistema de proteção, em perfil H, contendo barras chatas de acrílico, rebites metálicos, cola epóxi, fita isolante de auto fusão e pintura selante, como indicado na Figura 3.16.

As barras de ancoragem utilizadas tiveram as dimensões da seção transversal de 25,4 x 6,35 mm e o comprimento de 75 mm. Após a fixação das barras de ancoragem aos extensômetros com o auxílio dos rebites e da cola epóxi, procedeu-se com o envelopamento completo do perfil em modelo H com a fita isolante de auto fusão.

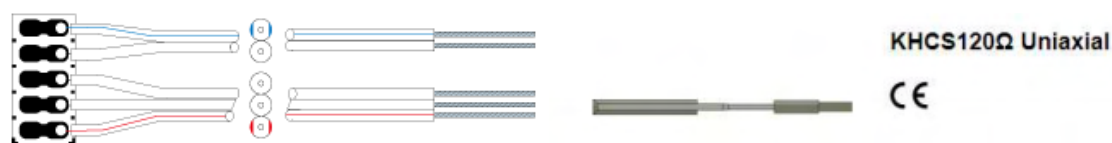
Figura 3. 16: Sistema de proteção em perfil H



Fonte: ZANETIC (2020).

Informações técnicas acerca do extensômetro utilizado nesta pesquisa podem ser verificadas na Figura 3.17.

Figura 3. 17: Informações comerciais dos extensômetros adquiridos da marca Kyowa



Modelo	Dimensões (mm)				Observações
	Grade		Base		
	Comprimento	Largura	Comprimento	Largura	
KHCS-10-120-G12-11	10	-	20	3	Cabo 2,0m
KHCS-10-120-G12-13	10	-	20	3	Cabo 2,0m
KHCS-10-120-G12-16	10	-	20	3	Cabo 2,0m

Fonte: KYOWA (2022)

3.5.2.2 Células de Tensão

Na fase que compreendeu os registros das tensões em uma camada da estrutura investigada, foram utilizadas células de carga, que são sensores de elevada precisão. Estes dispositivos são constituídos por duas membranas de aço com o interior preenchido por um fluido (óleo). Quando solicitada, a membrana sofre deformação na superfície, gerando um deslocamento do fluido, que ao registrar a variação de pressão do óleo, a transforma em sinal elétrico por um transdutor de pressão acoplado, do tipo semiconductor. Suas características estão elencadas na Tabela 3.27 e encontram-se ilustradas na Figura 3.18

Tabela 3. 27: Características técnicas das células de tensão em solo, concreto e outros materiais maciços.

Forma de uso	Valores de referência
Limites máximos da capacidade de carregamento	1 MPa e de 2,5 MPa
Temperatura de trabalho	-40 e 120°C
Precisão	de 0,1% de F.S
Tamanho	entre 10 e 32cm

Fonte: Ziegler, 2020.

Figura 3. 18: Células de tensão adquiridas



Fonte: Arquivo pessoal

3.5.2.3 Termopares

Outra variável, necessária para melhor compreender as variáveis do estudo foi a temperatura, que no local apresentam temperatura do ar variando entre 20°C e 40°C. Para registro da temperatura foram utilizados termopares. Conhecer a temperatura que a camada asfáltica é solicitada é importante neste estudo devido as características visco-elásticas do material asfáltico.

O Termopar é um equipamento simples, robusto, barato e de fácil manuseio, que registra temperaturas de -200°C a 1800°C. O equipamento com dois fios condutores de eletricidade, quando unidos em uma de suas extremidades, geram tensões elétricas que podem ser medidas, indicando assim a variação de temperatura sofrida naquele ponto. Os termopares utilizados nesta pesquisa foram os do tipo J e os sensores LM 35 que possuem um limite de erro de 1°C ou até 0,75% e escala de temperatura entre -55°C e 150°C.

3.5.2.4 Sistema de Aquisição de Dados

Uma vez escolhidos os equipamentos, faz-se necessário o adequado registro de seus valores. Para tanto, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados, constituído de uma CPU, com uma placa condicionadora de aquisição, responsável pela coleta de sinais, e controladores, responsáveis pela comunicação com o microcomputador e registro dos canais de aquisição de dados.

O gabinete de aquisição de dados dimensionado foi composto por 1 condicionador e 2 controladores, com fonte incorporada. Além destes equipamentos, também foi estipulado um “trigger” com a função de disparar a aquisição dos dados, quando solicitado pela passagem de um veículo comercial leve, pois os veículos de passeio não são contabilizados quando do dimensionamento dos pavimentos.

Além do *Hardware* elencado, também foi elaborado um *software* para aquisição e análise dos dados, como indicado na Figura 3.19, de forma a propiciar o adequado armazenamento dos dados para posterior análise do comportamento do pavimento.

O sistema para aquisição de dados seguiu as devidas especificações:

- Taxa de leituras de 800 por segundo (0,8kHz);
- Resolução de 16 bits;
- 24 canais para “*strain gauges*” de 120 ohms e 4 canais para células de pressão com capacidade de 1 MPa e 2,5 MPa, com taxa de leituras de 800 por segundo;
- 2 canais para os termopares tipo J com taxa de leitura de 1 por segundo;
- 2 canais de sensores de temperatura LM 35 com taxa de leitura de 1 por segundo.

Nas Figuras 19(a) e 19(b) é possível observar o sistema de aquisição de dados instalado e em operação.

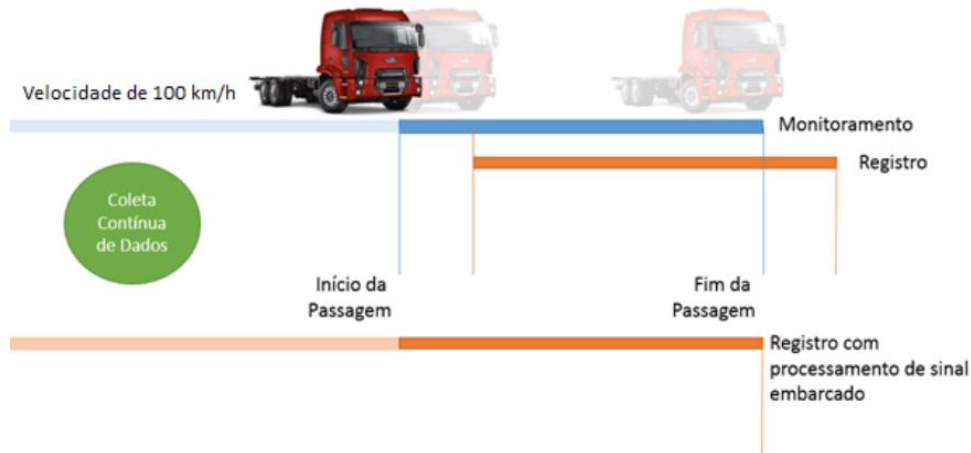
Figura 3. 19: a) e (b): Sistema de aquisição de dados



- *Fonte: Arquivo pessoal*

O Sistema de aquisição dos dados foi programado para identificar o começo e o fim da passagem dos veículos (Figura 3.20). Nele, foram realizadas leituras constantes dos sensores e somente registrados os dados quando identificado ser um veículo comercial. Dentre os pontos críticos possíveis de identificar nesta etapa do processo de instrumentação relatados por Colpo (2019), destacou-se: a dificuldade na coleta dos dados de rodovia em serviço devido à velocidade operacional, a heterogeneidade do tráfego, preocupação com a topologia da via para instalação dos sensores e sistema de coleta e a variação da posição transversal dos veículos na rodovia.

Figura 3. 20: Ilustração do monitoramento e aquisição do sinal



Fonte: Colpo (2019).

Devido a ocorrência ininterrupta do sistema de leitura de dados, surgiu outro desafio no sistema de coleta de dados, pois não são relevantes as contribuições de veículos de passeio ao monitoramento. Desta forma, para que houvesse o registro dos veículos de carga ao longo do tempo, foi necessário estabelecer um critério que possibilitasse, ao sistema de coleta, identificar se a carga solicitando o pavimento seria de um veículo de carga ou de um veículo de passeio.

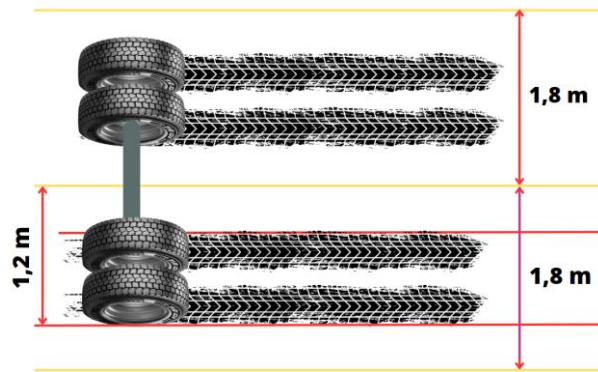
Para determinar o início do registro da passagem dos veículos, foi simulado, com auxílio do AEMC, qual seria a tensão vertical exercida por um eixo simples de rodas duplas, carregado com 8,2t, na estrutura final da restauração em curso, na profundidade 8,0 cm. Os módulos das camadas utilizados para a determinação das tensões na estrutura foram os apresentados no Projeto Executivo de Engenharia. A simulação estimou que um eixo simples de rodas duplas geraria uma tensão de 0,4 MPa na profundidade 8,0 cm, logo, este foi o valor utilizado para que fosse realizado o registro das leituras da passagem dos veículos.

3.5.3 - Instalação do Sistema de Instrumentação

Após a realização dos serviços preliminares à execução da camada asfáltica de reforço (fresagem e inspeção das placas), houve os preparativos para a instalação dos sensores no trecho. Foi realizada a demarcação com topografia da trilha de roda, como também das juntas transversais das placas de concreto que situados sob a camada asfáltica, conforme indicado na Figura 3.21.

De forma a aproveitar a oportunidade em curso, houve a iniciativa de se instrumentar as juntas transversais, de forma a compreender a contribuição efetiva gerada pela Geogrelha no ganho estrutural da camada asfáltica, sendo assim, foram instalados "strain gauges" em uma junta transversal com e outra sem a Geogrelha aplicada.

Figura 3. 21: Croqui de locação adotado para a instalação dos sensores.



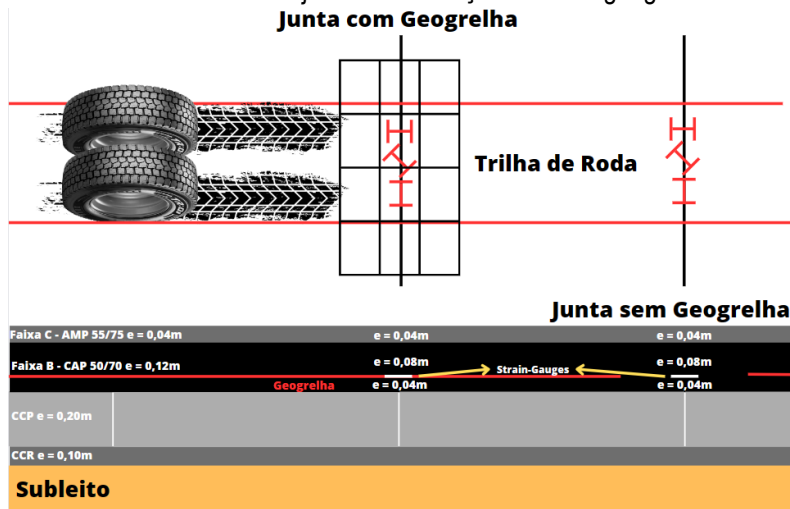
Fonte: Arquivo pessoal.

Esta iniciativa guarda fundamento pois, mesmo que existam modelagens que norteiam a efetiva utilização de Geogrelha, a determinação do quanto efetivamente a Geogrelha reduz em campo as deformações na estrutura, mitigando assim a propagação de trincas, ainda não foi realizado. Conhecer este comportamento pode possibilitar a utilização deste tipo de solução em métodos de dimensionamentos de pavimentos.

De forma a implantar os sensores os mais próximos da placa possível, como também, da Geogrelha na camada asfáltica, a execução da camada de Binder, que totalizaria 12,0 cm, foi dividida em camadas de 4,0 cm. Isto decorre da necessidade da Geogrelha estar imersa na camada asfáltica para seu adequado funcionamento.

Assim, sobre a placa de concreto, fez-se a instalação entre a primeira camada de Binder, com 4,0 cm de espessura, e a segunda camada de Binder, com mais 4,0 cm de espessura, de 3 “strain gauges” em uma junta de dilatação com a aplicação da Geogrelha e mais 3 em uma junta sem a instalação da Geogrelha, como pode ser observado na Figura 3.22.

Figura 3. 22: Posicionamento das juntas de dilatação – “strain gauges” sobre as juntas



Fonte: Arquivo pessoal

Para a instalação dos sensores foram utilizados adesivos epóxi e preparação dos cabos com reforço para isolamento térmico(Figuras 3.23 (a) a (d)).

Figura 3. 23: Instalação dos sensores



Fonte: Arquivo pessoal

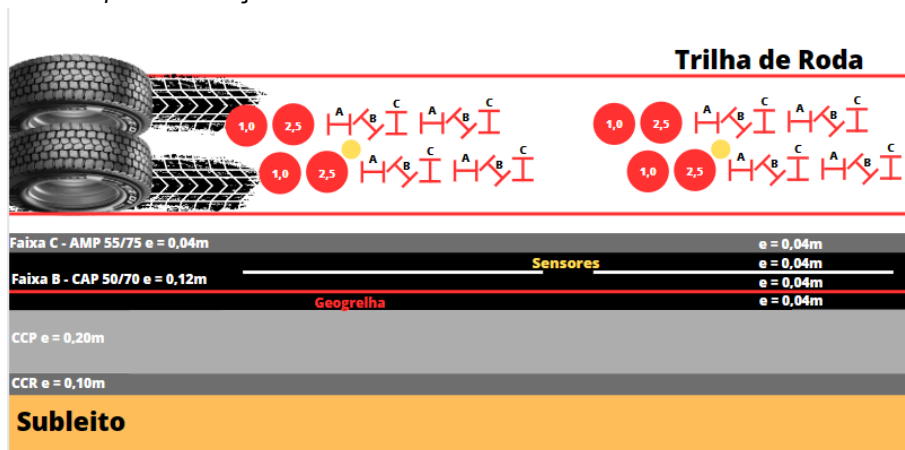
Após a execução da segunda camada de Binder, com 4,0 cm de espessura, foram instalados 8 conjuntos de 3 "strain gauges", 8 células de tensão e 2 termostatos e 2 termopares, como pode ser observado na Figura 3.27.

De forma semelhante a primeira etapa realizada, foi locada topograficamente a trilha de roda e identificados os locais para a instalação dos demais sensores, afastados de quaisquer juntas da placa inferior, conforme ilustrado na Figura 3.24. Todos os sensores foram testados antes da sua instalação, de forma a avaliar também a perda de comunicação com o sistema de aquisição de dados devido a execução da camada asfáltica. Foi utilizada serra policorte para realização dos sulcos necessários para proteção do cabeamento e proteção dos sensores com massa antes da passagem da vibro acabadora, conforme ilustrado nas Figuras 3.25 de (a) a (d).

A principal preocupação durante a execução da instrumentação foi a etapa da execução da camada asfáltica, devido a combinação da elevada temperatura e compactação sobre os cabos e conexões, pois mesmo usando fita de auto fusão e proteção mecânica, não seria possível garantir seu adequado funcionamento. Desta forma, foram executadas etapas de verificação de tensão durante e após

a construção da camada de revestimento asfáltico, de forma a verificar o sucesso da instalação dos sensores.

Figura 3. 24: Croqui da instalação dos sensores entre as novas camadas do Binder e do revestimento



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 3. 25: Proteção e verificação dos sensores durante a instalação

(a) verificação do funcionamento dos sensores após a instalação



(b): Colagem dos sensores na camada de Binder



(c) Marcação do eixo da trilha de roda



(d) Aplicação de massa asfáltica para proteção dos sensores

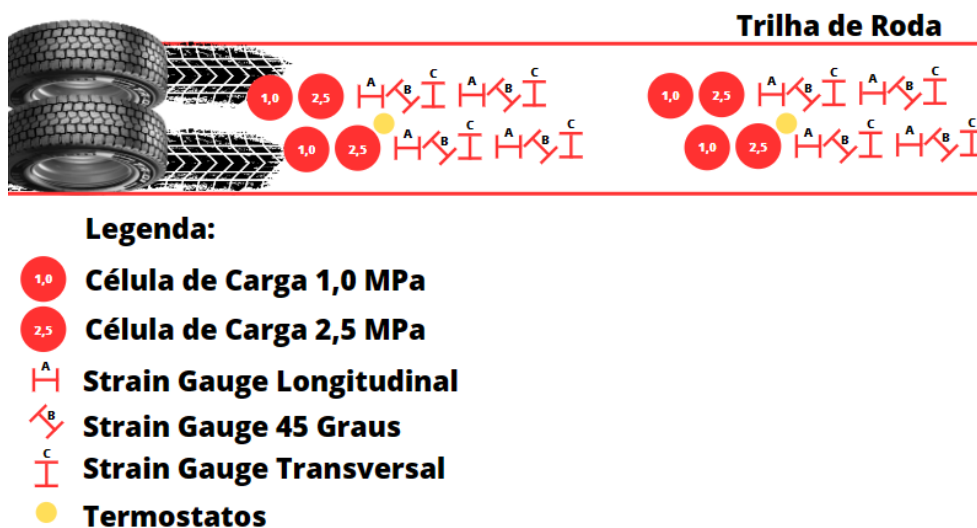


Fonte: Arquivo pessoal

3.6 – Disposição dos Sensores da Instrumentação

Os sensores instalados seguiram o detalhamento e identificação ilustrados na Figura 3.26 e o detalhamento dos canais de coleta dos dados utilizados na instrumentação estão descritos nas Tabelas 3.28 a 3.30.

Figura 3. 26: Sensores instalados com sua respectiva legenda



Fonte: Arquivo pessoal

A partir da conclusão das instalações, observou-se que dos 30 “strain gauges” instalados inicialmente, somente 17 permaneciam em funcionamento, correspondendo a cerca de 57% dos sensores. Com relação às células de tensão, classificadas com a numeração de 1 a 8, foi verificada uma taxa de falha de 50%. Notadamente falharam as células com capacidade de 1MPa e, atribuiu-se esta falha à contribuição da etapa executiva, como também às elevadas cargas do tráfego que não foram controladas.

Com relação aos termopares, os do tipo J apresentaram falha imediatamente após a execução da camada asfáltica, provavelmente devido a esforços mecânicos ou à magnitude das temperaturas na fase de compactação, causando ruptura da fiação de alimentação dos sensores. Enquanto os sensores do tipo LM (termostatos) funcionaram perfeitamente desde a sua instalação.

Como já mencionado, as falhas eram esperadas, corroborando com o registro realizado acerca da instrumentação de trechos pavimentados por Silva e Motta (1999). A estimativa inicial de 1/3 dos sensores apresentarem falha no momento da instrumentação se mostrou equivocada, chegando a montantes de 50% a 57% dos sensores apresentando algum tipo de problema. Infelizmente não foi possível realizar o resgate dos sensores para avaliar a real causa de sua falha de funcionamento.

Tabela 3. 28: Inventário dos canais associados aos “strain gauges”

“Strain gauge”	Canal	“Strain gauge”	Canal
Geogrelha A	Falha	04 A	CH 14
Geogrelha B	CH 13	04 B	CH 24
Geogrelha C	Falha	04 C	Falha
Sem Geogrelha A	Falha	05 A	CH 12
Sem Geogrelha B	CH 22	05 B	CH 2
Sem Geogrelha C	CH 9	05 C	CH 1
01 A	Falha	06 A	CH 3
01 B	Falha	06 B	CH 7
01 C	Falha	06 C	CH 23
02 A	CH 4	07 A	CH 10
02 B	CH 5	07 B	CH 6
02 C	Falha	07 C	Falha
03 A	Falha	08 A	Falha
03 B	Falha	08 B	Falha
03 C	CH 16	08 C	CH 15

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 3. 29: Inventário dos canais associados as células de carga

Célula de tensão	Canal	Célula de tensão	Canal
1	CH 20	5	Falha
2	Falha	6	CH 19
3	Falha	7	CH 18
4	CH 17	8	Falha

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 3. 30: Inventário dos canais associados aos termopares

Termopar	Canal
Tipo J 1	Falha
Tipo J 2	Falha
Tipo LM 1	TT1
Tipo LM 2	TT2

Fonte: Arquivo pessoal

3.6.1 – Uso da Roseta de Deformações

Para a instalação dos “strain gauges”, uma vez que se faz necessário a determinação das deformações normais no ponto estudado, foi escolhida a roseta de deformações de 45° ou retangular, disponibilizados transversal, longitudinal e 45° em relação aos eixos transversal e longitudinal.

O objetivo seria determinar as deformações no eixo x e y, entretanto, também foi possível a determinação da deformação cisalhante xy, conforme pode-se inferir na equação 29;

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \varepsilon_x \cos^2 0^\circ + \varepsilon_y \sin^2 0^\circ + \gamma_{xy} \sin 0^\circ \cos 0^\circ \\ \varepsilon_b &= \varepsilon_x \cos^2 45^\circ + \varepsilon_y \sin^2 45^\circ + \gamma_{xy} \sin 45^\circ \cos 45^\circ \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_x \cos^2 90^\circ + \varepsilon_y \sin^2 90^\circ + \gamma_{xy} \sin 90^\circ \cos 90^\circ\end{aligned}\quad (29)$$

A equação 31 nos possibilita a equação 30:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_a \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_c \\ \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)\end{aligned}\quad (30)$$

Entretanto, para a presente pesquisa, que objetiva a determinação da Curva Mestra “in situ”, não se fez necessária a utilização das deformações cisalhantes, logo, estes dados foram tratados e armazenados para utilização em pesquisas futuras.

3.6.2 - Relato de acompanhamento da vida útil dos sensores

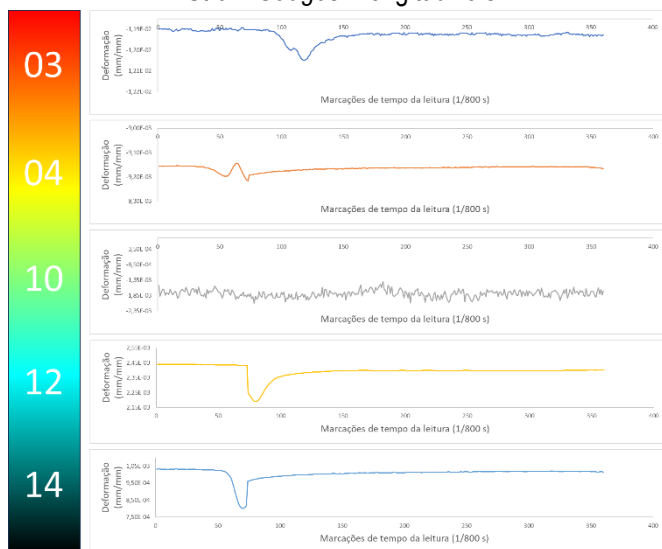
Após a etapa de instalação dos sensores e identificação daqueles remanescentes, gerando resposta para o sistema de aquisição de dados, passou-se a acompanhar as respostas produzidas pelos sensores ao longo do tempo. Esta etapa do estudo serviu para a identificar se os sensores estavam trabalhando de forma adequada, ou se havia registro de ruídos.

Houve também a preocupação de acompanhar as respostas devido a problemas recorrentes de fornecimento de energia elétrica que ocorrem na região, pois o sistema não foi provido de equipamento para auto religamento.

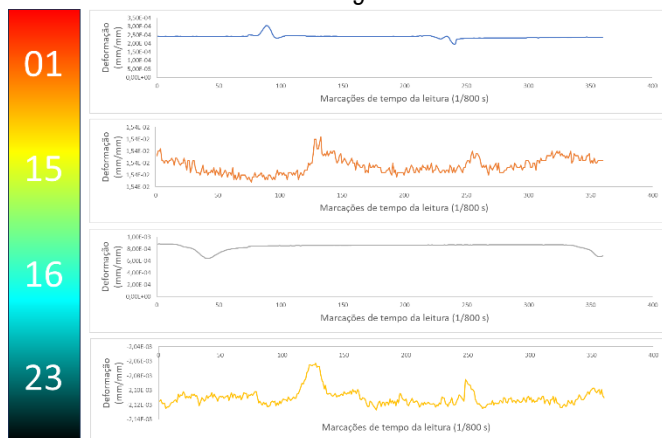
Conforme ilustrado na Figura 3.27, abaixo, e Figuras A1.1 a A1.8, presentes no Apêndice 1, os sensores “*strain gauges*” dos canais 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 09, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 23, e 24 apresentaram leitura em dezembro, de acordo com os dados obtidos do registro de 15 de dezembro de 2019, às 00:01:13. Entretanto, verifica-se que os sensores 06 e 10 já apresentam leituras inadequadas, representando ruído. Isto decorre da não apresentação de uma linha de base bem definida, como também a falta de um pico de leitura decorrente da passagem dos veículos registrados.

Houve um desligamento em 16 de dezembro de 2019, devido a indisponibilidade de pessoal o sistema foi religado e os registros retomados em 05 de janeiro de 2020. Houve nova falha de fornecimento de energia elétrica em 05 de janeiro, o sistema de registro foi retomado em 07 de janeiro, funcionando ininterruptamente até 17 de janeiro, quando ocorreu nova falta de energia. O sistema foi retomado em 20 de janeiro e voltou a faltar energia elétrica em 22 de janeiro. O sistema então foi retomado em 27 de janeiro e realizou leituras até 02 de fevereiro, quando ocorreu nova interrupção por faltar energia elétrica.

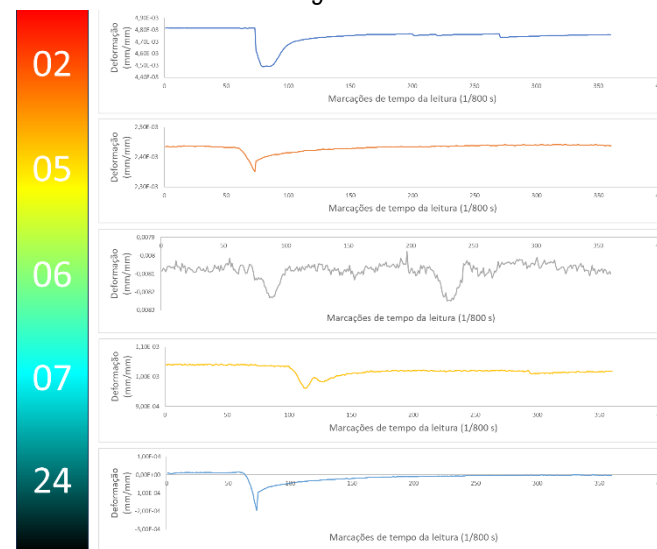
Figura 3. 27: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 15 de Dezembro de 2019 às 00:01:13
 “Strain Gauges” Longitudinais



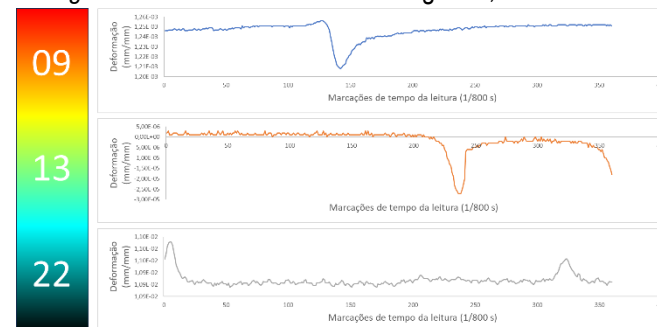
“Strain Gauges” 45°



“Strain Gauges” Transversais



“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha



Fonte: Próprio Autor.

As leituras foram retomadas em 07 de janeiro e funcionaram até o dia 12 de fevereiro, quando ocorreu nova falha elétrica. As leituras então foram reiniciadas em 25 de fevereiro e continuaram até o dia 29 de fevereiro, voltando a falhar novamente. O sistema foi então reiniciado em 09 de março, permanecendo realizando leituras até 23 de março, quando houve nova falha elétrica e necessidade de manutenção do sistema de coleta de informações.

O sistema então foi reiniciado em 05 de maio, realizando leituras até o dia 20 de maio, quando voltou a falhar por falta de energia elétrica. Várias tentativas de contornar as faltas de energia recorrentes foram implementadas, mas infelizmente não foi possível de contornar, principalmente devido aos grandes períodos necessários para o retorno do fornecimento de energia.

O sistema foi religado novamente em 25 de maio e registrou a passagem dos veículos até o dia 02 de junho, quando voltou a falhar. Retomou em 09 de junho e voltou a falhar em 16 de junho. Foi religado em 25 de junho mas veio a falhar no mesmo dia. O mesmo comportamento ocorreu no dia 10 de julho.

Quando religado no dia 14 de julho, ele veio a funcionar e realizar leituras até o dia 05 de agosto, quando voltou a falhar. Foi religado em 19 de agosto, mas voltou a falhar no mesmo dia. Foi reiniciado em 31 de agosto, mas veio a falhar em 01 de setembro. Foi religado dia 03 de setembro, mas faltou energia no mesmo dia. O mesmo ocorreu nos dias 05, 08, 11, 15, 21 e 25 do mesmo mês.

Comportamento semelhante nos dias 01, 06, 22, 27 e 29 de outubro, com religamentos e falhas devido à falta de energia. O sistema então foi religado dia 06 de novembro, quando voltou a falhar, situação recorrente nos dias 09, 17 de novembro. Em 21 de novembro o sistema foi religado e realizou registros até o dia 30 de novembro, quando houve a perda da célula de carga que era utilizada como gatilho para o registro dos veículos.

A falha no fornecimento de energia elétrica foi situação que estava fora do planejamento, não possível de ser previsto em etapa anterior, e que, mesmo com a utilização de nobreaks, não foi suficiente para sanear o fornecimento de energia. Foi situação imprevisível que necessitou de contínuo acompanhamento, de forma a mitigar seus efeitos na aquisição dos dados pela instrumentação em operação.

Foram realizados 283.984 registros de passagens de veículos sob o trecho instrumentado, gerando 42,6 GB de informações, com armazenamento de Tensões, Deformações, Temperatura e Frequência das cargas que passaram ao longo de 01 ano no trecho experimental. Cada registro constituiu uma matriz de informações com 30 colunas e aproximadamente 500 linhas de informações, sendo armazenados aproximadamente 4 bilhões de leituras.

Com base nas Figuras 3.30 e A1.1 a A1.8, verifica-se quais dos sensores “*strain gauges*” falharam devido à perda de comunicação ao longo do tempo, o que propicia o detalhamento dos canais válidos para estudos conforme Tabelas 3.31 a 3.34.

Tabela 3. 31: Canais apresentando leituras – “strain gauges” Longitudinais.

Meses	Ch 03	Ch 04	Ch 10	Ch 12	Ch 14
Dezembro	✓	✓	✗	✓	✓
Janeiro	✓	✓	✗	✓	✓
Fevereiro	✓	✓	✗	✓	✗
Março	✓	✓	✗	✗	✗
Maio	✓	✓	✗	✗	✗
Junho	✓	✓	✗	✗	✗
Julho	✓	✓	✗	✗	✗
Agosto	✗	✗	✗	✗	✗

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3. 32: Canais apresentando leituras - “strain gauges” 45°.

Meses	Ch 01	Ch 15	Ch 16	Ch 23
Dezembro	✓	✓	✓	✓
Janeiro	✓	✓	✓	✓
Fevereiro	✗	✓	✗	✓
Março	✗	✓	✗	✓
Maio	✗	✗	✗	✓
Junho	✗	✗	✗	✓
Julho	✗	✗	✗	✓
Agosto	✗	✗	✗	✓

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3. 33: Canais apresentando leituras - “strain gauges” Transversais.

Meses	Ch 02	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 24
Dezembro	✓	✓	✗	✓	✓
Janeiro	✓	✓	✗	✓	✓
Fevereiro	✓	✓	✗	✗	✓
Março	✗	✓	✗	✗	✓
Maio	✗	✓	✗	✗	✗
Junho	✗	✓	✗	✗	✗
Julho	✗	✓	✗	✗	✗
Agosto	✗	✓	✗	✗	✗

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3. 34: Canais apresentando leituras - “strain gauges” Fibra Inferior.

Meses	Ch 09	Ch 13	Ch 22
Dezembro	✓	✓	✓
Janeiro	✓	✓	✓
Fevereiro	✓	✓	✗
Março	✗	✗	✗
Maio	✗	✗	✗
Junho	✗	✗	✗
Julho	✗	✗	✗
Agosto	✗	✗	✗

Fonte: Próprio Autor.

De forma análoga, foi realizado o acompanhamento das células de carga, que apresentaram o comportamento da Tabela 3.35. O funcionamento da célula de carga do canal 20 foi preponderante para a realização do presente trabalho.

Tabela 3. 35: Canais apresentando leituras – Células de Carga

Meses	Ch 17	Ch 18	Ch 19	Ch 20
Dezembro	X	X	X	✓
Janeiro	X	X	X	✓
Fevereiro	X	X	X	✓
Março	X	X	X	✓
Maio	X	X	X	✓
Junho	X	X	X	✓
Julho	X	X	X	✓
Agosto	X	X	X	✓

Fonte: Próprio Autor.

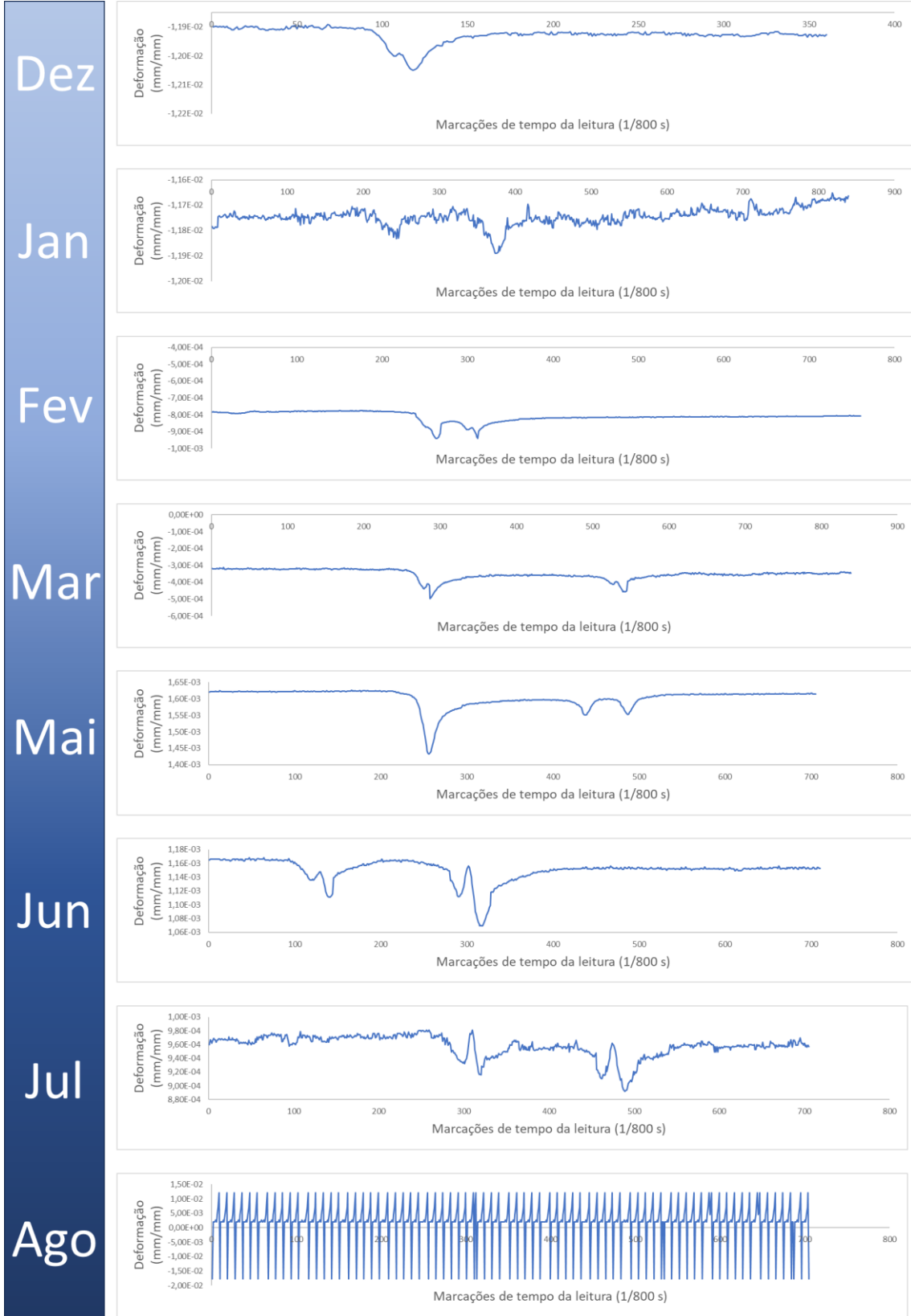
Com relação aos sensores de temperatura, houve ausência de registros em 19 de agosto de 2020, quando do religamento do sistema. Desta forma notou-se que, devido a falha dos sensores ao longo do tempo, a possibilidade de realização do estudo necessitou ter sua abrangência de tempo adequada a possibilidade dos dados de leitura adquiridos.

Mesmo com a redução do tempo de consideração das leituras úteis, de 01 ano para 08 meses, 149.089 dados de veículos foram possíveis de aproveitamento.

De forma a determinar o módulo dinâmico, é necessário o conhecimento da deformação longitudinal do pavimento quando solicitado pelas cargas do tráfego, por este motivo, foram separadas as deformações longitudinais e transversais para análise mais aprofundada e determinação da deformação axial.

Conforme apresentado na Figuras 3.28, abaixo, e Figuras A2.1 a A2.4, presentes no Apêndice 2, é possível verificar como ocorreu o funcionamento das deformações longitudinais, realizando registro das leituras e a partir de quando apresentaram leituras de ruídos ao longo dos meses de execução da pesquisa.

Figura 3. 28: Deformações ao longo dos meses para o canal 03.



Fonte: Próprio Autor.

A partir das figuras apresentadas, torna-se notório como as deformações estavam sendo medidas, como são criadas as linhas de base e os picos de tensão e deformação que ocorrem com a passagem dos veículos. Quando as medidas deixam de apresentar uma linha de base bem definida, entendeu-se que está espelhando somente ruído, com leituras sem possibilidade de aproveitamento. Estimou-se então, que dos dados medidos durante o período da instrumentação foram aproveitados 52,5% destes, o que resulta em aproximadamente 25% dos dados esperados, valor que deve ser avaliado no momento da realização do planejamento de instrumentação de novos trechos experimentais.

Diante disto, serão detalhados nos tópicos a seguir acerca da realização da análise dos dados obtidos com os sensores, de forma a possibilitar a comparação entre os resultados obtidos por meio da instrumentação com os resultados determinados com os ensaios de laboratório e retro analisados.

3.7 – Qualidade dos dados

Os dados obtidos com a instrumentação apresentaram valores de deformação que variaram em função da tensão medida, da temperatura a que a camada asfáltica está submetida e da frequência de aplicação da carga. Portanto, mediu-se a deformação dinâmica total, contemplando as parcelas elásticas, viscosas e plásticas, sendo este um dos elementos da presente pesquisa, o de conhecer e caracterizar os efeitos reais do tráfego solicitando a camada asfáltica instrumentada.

Em sequência, houve a tentativa de tratamento dos dados obtidos, entretanto, devido a diferença de variação das medidas em função da temperatura, a realização de um tratamento estatístico dos dados realizadas poderia interferir na determinação do comportamento da camada. Devido as variações de deformações mudarem ao longo do dia, o estabelecimento de faixas de trabalho para os sensores de deformação poderia eliminar os valores menores de deformação que ocorrem na temperatura mais baixa e/ou os valores maiores, que ocorrem nas temperaturas de operação maiores.

Adicionalmente, de forma a limpar os dados registrados pelo sistema de leitura de dados, foi realizada uma filtragem, logo, todos os sensores que apresentaram leituras na forma de ruído, tiveram seus dados desconsiderados no presente estudo, restando unicamente registros de linhas de base bem definidas, medidas de tensão, deformação e temperatura.

De forma a verificar a qualidade do comportamento da camada asfáltica determinada com os dados obtidos com a instrumentação, já que as medidas de deformação que são obtidas pelo equipamento contemplam as parcelas elásticas, viscosas e plásticas, foi realizado levantamento deflectométrico com FWD. Este teve por objetivo realizar a retroanálise para conhecer os módulos das camadas constituintes do pavimento e avaliar os parâmetros medidos na instrumentação.

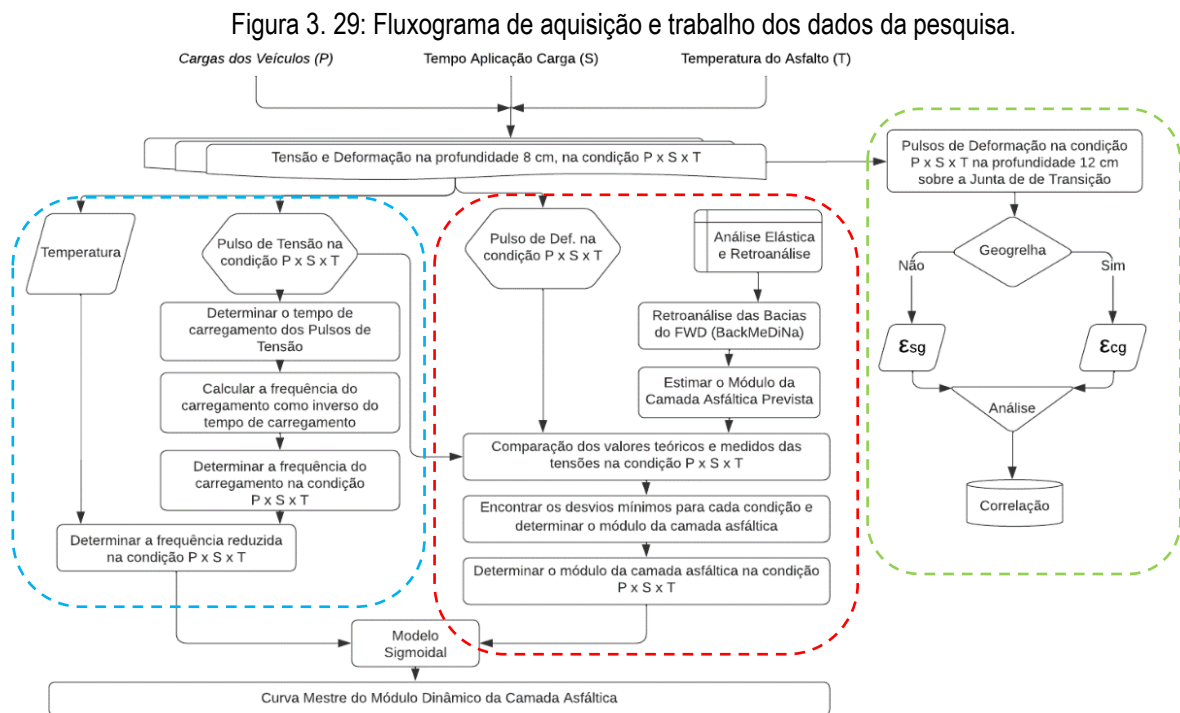
Devido a influência da frequência e, principalmente, da temperatura, nos dados medidos pelos sensores de deformação, avaliou-se a utilização de tratamentos estatísticos nos dados obtidos, pois, dependendo do horário em que a leitura estaria ocorrendo, as medidas apresentam faixas distintas de trabalho. Optou-se assim, por considerar todos os dados obtidos na instrumentação para a determinação da curva mestra “in situ”.

Destaque tem que ser dado aos regimes de obtenção de dados, tanto do ensaio em laboratório quanto aos fornecidos com a instrumentação. São comportamentos que funcionam em regimes de tensão/deformação diferentes, com comportamentos que não podem ser comparados com facilidade, vez que, o ensaio de laboratório que determina a curva mestra dentro do regime viscoelástico com tensão, frequência e temperatura controladas, enquanto o comportamento identificado “in situ” contempla o regime viscoelastoplástico, sem controle das tensões, frequências e temperatura.

Adiciona-se as diferenças no comportamento das misturas quando em campo e em laboratório, isto é, viscoelástico em laboratório e viscoelastoplástico em campo, a grande dispersão de leituras de frequência e tensão que são registradas, muito diferente do regime de tensões controladas imposta em laboratório.

3.8 – Metodologia para Obtenção dos Valores Medidos pelos Sensores

A Figura 3.29 apresenta o fluxograma que norteou a aquisição dos dados e o trabalho dos dados obtidos com os sensores.



Fonte: Próprio Autor.

Apresenta-se no fluxograma o detalhamento de como os dados foram tratados após seu registro no sistema eletrônico de coleta de dados, que armazenou as tensões de cada passagem de veículos (P), da frequência (S) e da temperatura (T) da camada asfáltica, de forma que deformações ocorridas para cada combinação de carga (P), frequência (S) e temperatura (T) estivessem aptas a ser utilizadas.

Durante o período de levantamentos de dados do trecho experimental, foram realizadas medições de tensões, tempo de aplicação da carga, deformações longitudinais, deformações transversais e temperatura, ao longo de oito meses (Dezembro a Julho), objetivando entender como a camada asfáltica recém executada iria se comportar quando solicitada pelo tráfego real.

Apresenta-se, nos tópicos de 3.8.1 a 3.8.6, a metodologia adotada para a realização da leitura dos dados fornecidos pelos sensores.

3.8.1 – Frequência

A frequência do pulso de carga é um fator crítico na compreensão do comportamento da camada asfáltica. Ela é comumente determinada pelo pulso de resposta mecânica da camada asfáltica induzida pelo carregamento do tráfego. A Equação 31 foi utilizada para a determinação da frequência:

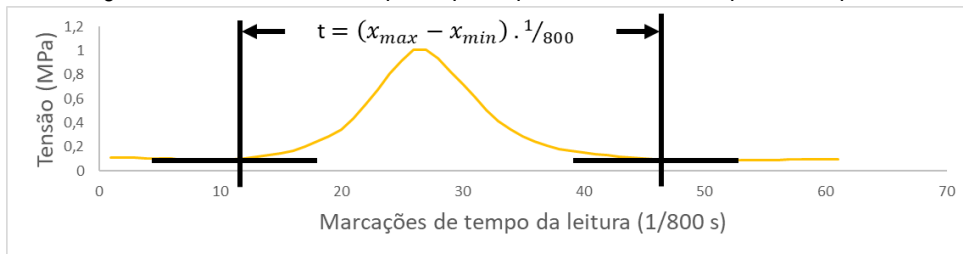
$$f = \frac{1}{t} \quad \text{Equação 31}$$

Sendo:

f a frequência do carregamento (Hz) e t o tempo do pulso (s)

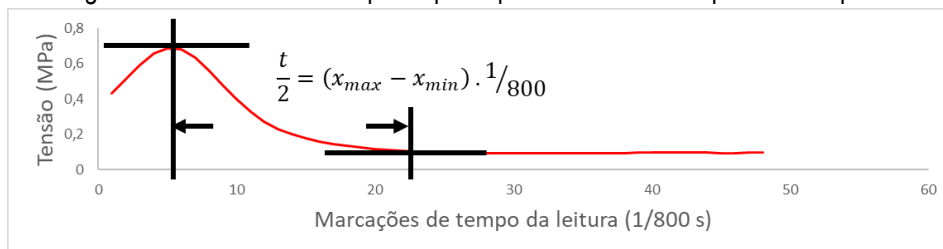
Como, por meios da coleta de dados, é possível determinar o tempo de aplicação das cargas conforme ilustrado nas Figuras 3.30 e 3.31, determinou-se as frequências de aplicação das cargas, de maneira a subsidiar a construção da curva mestra da camada instrumentada com os dados de campo.

Figura 3. 30: Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso completa.



Fonte: Próprio Autor

Figura 3. 31: Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso incompleta.



Fonte: Próprio Autor

O registro de pulsos de carga incompletos, como exemplificados na Figura 3.46, ocorreram devido a escolha do critério para registro dos dados dos sensores ter sido escolhido com a tensão de 0,4MPa. Entretanto, considerando que o tempo de carregamento é idêntico ao de descarregamento, torna-se possível a determinação do tempo total do pulso de carga.

3.8.2 – Frequência Reduzida

Para a construção da curva mestra de módulo dinâmico foi escolhida uma TR, em que um segmento de curva permanece fixo e os demais segmentos da curva são transladados no eixo horizontal para gerar uma única curva.

De posse dos dados de campo, foi realizada a determinação dos fatores de transferência da temperatura utilizada como referência, de 20°C, com a determinação dos coeficientes de ajuste a_1 , a_2 e a_3 , para a determinação do fator de deslocamento a_t . Para a demonstração da influência da temperatura no deslocamento das frequências, foram utilizados os dados de laboratório para calcular as frequências reduzidas, com uso da Equação 32:

$$f_r = f a_t \quad \text{Equação 32}$$

Sendo:

f_r – Frequência Reduzida

f – Frequência de aplicação do pulso de carga

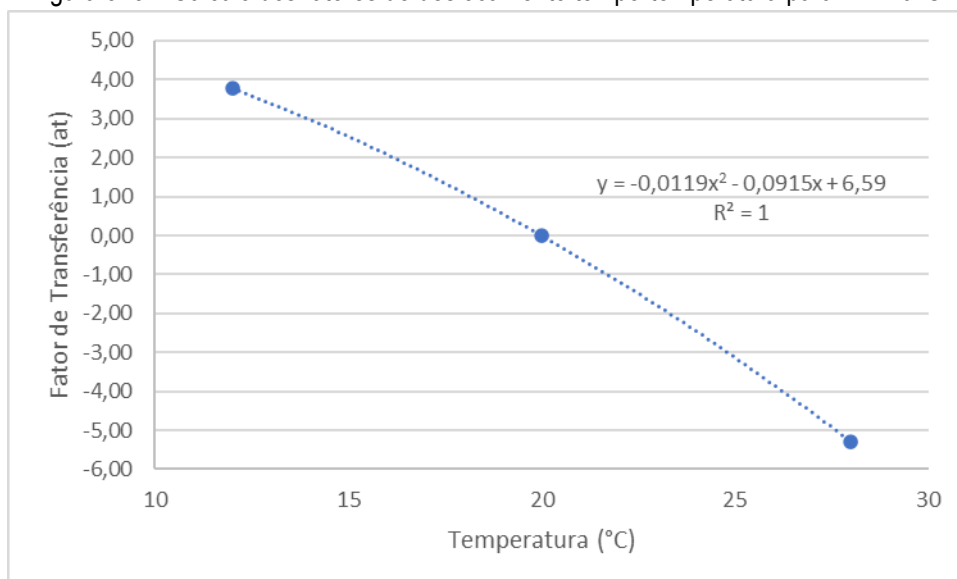
a_t – Fator de transferência.

Uma vez que:

$$\log a_t = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad \text{Equação 33}$$

Os resultados do ensaio de Módulo Dinâmico resultaram em fatores $a_1 = -0,0119$, $a_2 = -0,0915$ e $a_3 = 6,59$, conforme o ajuste realizado na Figura 3.32.

Figura 3. 32: Cálculo dos fatores de deslocamento tempo-temperatura para TR=20°C.



Fonte: Próprio Autor.

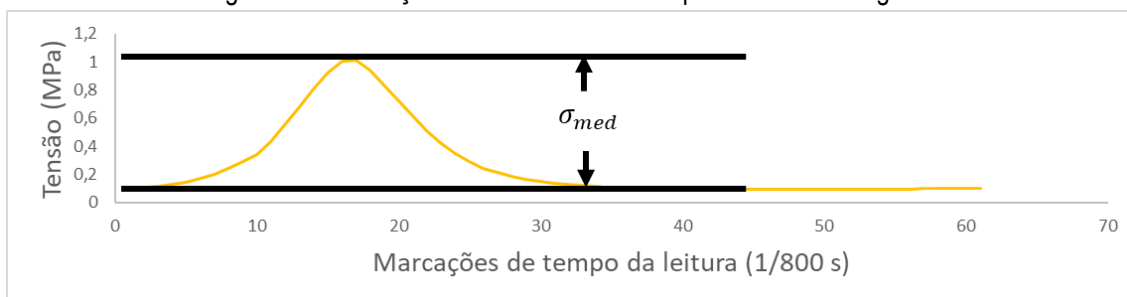
Desta forma, para cada valor de temperatura registrada, foi possível deslocar o valor do módulo dinâmico, de maneira a corresponder uma resposta do pavimento a frequência na temperatura de referência, e

assim construir uma curva de módulo dinâmico de maneira análoga a construída quando da realização do ensaio em laboratório.

3.8.3 – Tensões

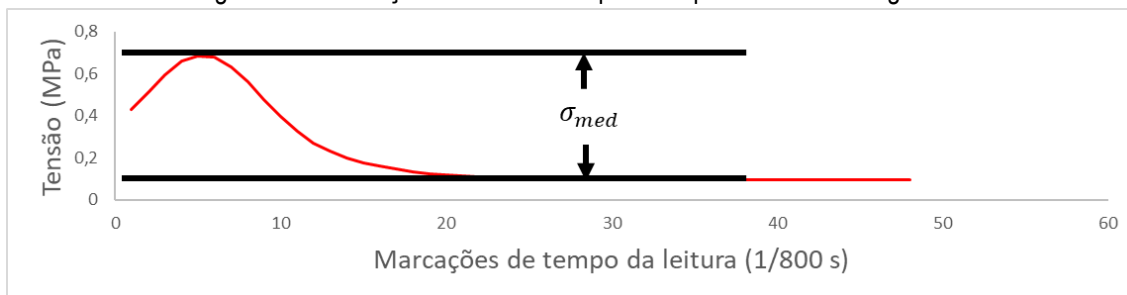
O registro das tensões que ocorreram na profundidade 8,0 cm da estrutura foi realizada com uso das células de carga, e os registros de suas leituras só ocorreram com a identificação de que a tensão era superior a 0,4 MPa. Esta tensão foi identificada na simulação numérica por meio do AEMC que corresponde a passagem de um eixo simples de veículo comercial descarregado. Nos registros realizados, foi possível identificar dois tipos de onda que ocorrem nas leituras do sensor de tensões, que estão ilustradas nas Figuras 3.33 e 3.34.

Figura 3. 33: Medição da tensão com todo o pulso durante o registro.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3. 34: Medição da tensão com parte do pulso durante o registro.



Fonte: Próprio Autor.

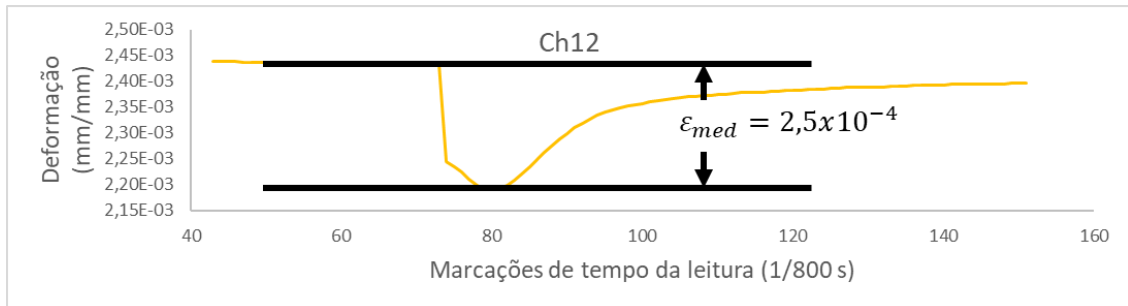
Para o presente estudo foram consideradas apenas as leituras dos valores máximos do sensor de tensão, para correlacionar com a deformação registrada correspondente, sendo assim, o conhecimento de toda a envoltória da leitura da tensão não se mostrou necessária, embora tenham sido registradas. Quando da simulação da estrutura no AEMC, com os módulos estimados pelo dimensionamento, eram esperados valores de tensão na profundidade instrumentada da ordem de 0,86 MPa, entretanto, os valores máximos registrados foram mais elevados. A falta de controle de pesagem das cargas que trafegam neste trecho contribui para a ocorrência de tensões fora daquelas esperadas pela modelagem.

3.8.4 – Deformações Longitudinais e Transversais

O registro das deformações longitudinais que ocorreram na profundidade 8,0 cm da estrutura foi realizada pelos “*strain gauges*”, em microstrains, monitorados nos canais 03, 04, 10, 12 e 14. As leituras foram

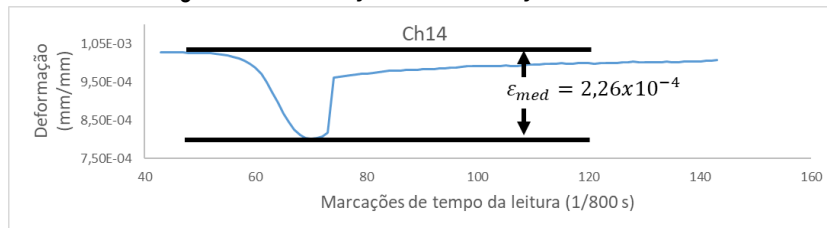
realizadas por meio da diferença registrada entre a linha de base do “strain gauge” e o seu pico de leitura, conforme ilustrado nas Figuras 3.35 e 3.36, que apresentam a leitura registrada para a mesma carga para os canais 12 e 14.

Figura 3. 35: Medição da deformação no canal 12



Fonte: Próprio Autor.

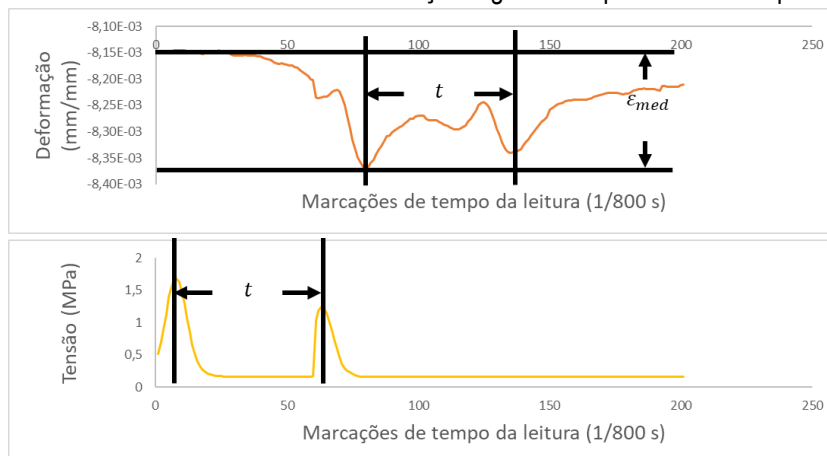
Figura 3. 36: Medição da deformação no canal 14



Fonte: Próprio Autor.

De posse destas deformações registradas, foi considerada como a deformação para a carga aplicada a média das deformações registradas pelos canais ativos, que já foram detalhados no capítulo anterior. Quando da passagem de pulsos de carga que demandavam a estrutura em tempos muito curtos, gerando registro único destes pulsos, o valor considerado foi o par de tensão vs. deformação de maior valor. De maneira a ilustrar a situação, a Figura 3.37 demonstra o registro ocorrido no dia 14 de julho às 14:50:05, que denota dois pulsos de carga e a ilustração da deformação ocorrida no canal 03 devido a estes pulsos de carga.

Figura 3. 37: Detalhamento da Tensão e Deformação registrados quando ocorrem pulsos múltiplos.



Fonte: Próprio Autor.

3.8.5 – Deformações Axiais

De posse das deformações longitudinais e transversais, para possibilitar o cálculo do módulo dinâmico para o presente estudo, constatou-se a necessidade do conhecimento da deformação axial, atuante no mesmo sentido da tensão, espelhando o ensaio de módulo dinâmico. Para isso, foi utilizado o coeficiente de Poisson.

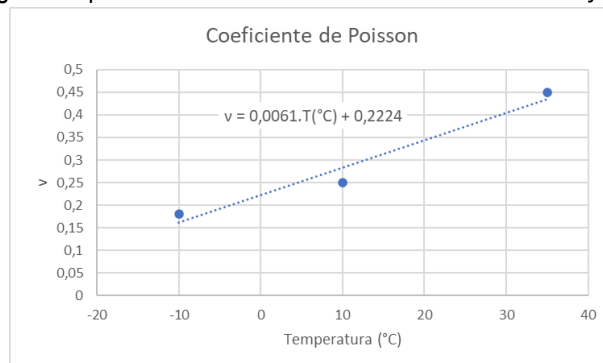
O coeficiente de Poisson estabelece a razão entre a deformação vertical e a transversal de um material homogêneo e isotrópico (HIBBELER, 2008), definido como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad \text{Equação 34}$$

Sendo ε_j a deformação vertical e ε_i a deformação transversal. Logo, com o conhecimento das deformações longitudinais, transversais a aplicação da carga, é possível conhecer a deformação vertical. Kim *et al.* (2004) explicam que quando da investigação de ensaios de módulo dinâmico por meio de tensão indireta, verificou que o coeficiente de Poisson variava em função da temperatura da camada asfáltica e da frequência da aplicação da carga. Entretanto, afirmam serem considerados os valores de 0,18 para uma temperatura de -10°C, 0,25 para uma temperatura de 10°C e em torno de 0,45 para 35°C. Destaca, inclusive, que alguns valores de Poisson medidos a 35°C, com baixas frequências, excedam o limite linear elástico de 0,5, indicando que nestas condições o corpo de prova sofria dano durante a execução do ensaio de módulo dinâmico.

De posse destes valores, foi construída uma curva de regressão linear, de forma a estimar o coeficiente de Poisson adequado de ser utilizado em função da temperatura registrada na instrumentação, apresentado na Figura 3.38.

Figura 3. 38: Regressão para cálculo do Coeficiente de Poisson em função da temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Adotando que o material trabalha no regime elástico, homogêneo e isotrópico, calculou-se o coeficiente de Poisson para cada leitura realizada, e determinadas a deformação vertical utilizando a deformação longitudinal e a deformação transversal, em microstrains. De maneira e manter a correlação, foi adotado como ε_ν a média dos valores medidos entre a deformação longitudinal e deformação transversal.

3.8.6 – Medidas de Módulos

De posse das tensões e deformações que ocorreram na profundidade 8,0 cm da estrutura, torna-se possível a determinação do Módulo Dinâmico ($|E^*|$, em MPa) da camada naquele substrato, utilizando-se do conceito da Teoria da Elasticidade de materiais (Equação 35).

$$|E^*| = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} \quad (\text{Equação 35})$$

Sendo:

$|E^*|$ – Módulo Dinâmico para a condição P, S e T (carga, tempo e temperatura no instante da medição dos equipamentos)

σ_v – Tensão vertical para a condição P, S e T (carga, tempo e temperatura no instante da medição dos equipamentos)

ε_v – Deformação Vertical para a condição P, S e T (carga, tempo e temperatura no instante da medição dos equipamentos)

Esta é uma propriedade importante para entender a capacidade da camada de suportar cargas repetidas. Com ela torna-se possível caracterizar o material, construindo sua curva mestra da mistura, que possibilita a integração da velocidade do tráfego, efeitos climáticos e envelhecimento nos modelos de tensão/deformação de resposta do pavimento. No ensaio de Módulo Dinâmico, normalmente, tem-se vários pares de tensão vertical e de deformação vertical da camada asfáltica, sob diferentes condições de carga, frequência e temperatura. Em seguida, é calculado o Módulo Dinâmico usando a Equação 35 para cada conjunto de dados de tensão e deformação.

De forma a simplificar a compreensão dos dados e possibilitar a análise dos dados desta pesquisa, foi adotada a formulação visco-elástica para a determinação do Módulo Dinâmico, (Equação 35) considerado na formação da curva mestra, associando a este a frequência reduzida para a aplicação da carga.

3.9 - Obtenção das Curvas de Módulo Dinâmico dos Meses Instrumentados

Para a determinação das curvas de Módulo Dinâmico “*in situ*”, uma vez que o regime de comportamento da camada asfáltica é diferente daquela realizada durante a realização em laboratório do ensaio de Curva Mestra, foi necessária a determinação de seu fator de ajuste da frequência, de forma a possibilitar a elaboração da curva na temperatura de referência de 20°C.

3.9.1 – Matriz de dados

Inicialmente buscou-se reproduzir a análise das tensões e deformações conforme demonstrado pela Norma DNIT 416/2019. Entretanto, quando da individualização das combinações de frequências por temperaturas, para replicar o estudo, as frequências que ocorreram naquela temperatura seriam reduzidas a uma combinação única, criando assim um único par de frequência, tensão e deformação para a temperatura estudada.

Esta forma de tratar os dados não atenderia ao objetivo do estudo. Passou-se então a considerar que o comportamento dos pares de frequência, tensão e deformação corresponderiam a uma sigmoideal para a temperatura registrada, e esta curva que se deslocaria para a realização da superposição do efeito tempo-temperatura.

3.9.2 – Fator de correção da frequência – Frequência Reduzida

De forma a espelhar o procedimento estabelecido na norma, os pares de frequência e módulos calculados por meio dos sensores da instrumentação, com o auxílio do *software* STATISTICA, foram ajustados por uma regressão não-linear ao modelo sigmoidal, ajustando os dados à uma curva característica da temperatura de resposta da camada asfáltica. O modelo sigmoidal utilizado está apresentado na Equação 36:

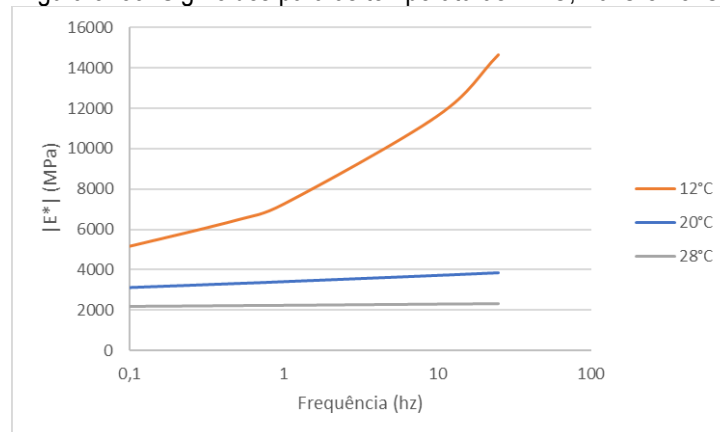
$$\log|\hat{E}^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma\log f_r}} \quad \text{Equação 36}$$

Desta maneira, passou-se a estabelecer uma forma de calcular a frequência reduzida com os dados obtidos em campo. Uma vez que se deseja comparar tais resultados com aqueles obtidos em laboratório, que possui uma temperatura de referência de 20°C. Esta temperatura também foi escolhida como a temperatura de referência para a construção da curva mestra para os dados “*in situ*”.

Devido ao espectro das temperaturas registradas, que variaram de 11°C a 37°C, adotando a temperatura de referência (TR) como 20 °C, escolheu-se arbitrariamente a variação de 8°C para mais e para menos para as temperaturas registradas, de forma a utilizar um espectro de temperaturas que abrangesse aquelas registradas em campo, escolhendo-se assim as temperaturas de 12°C, 20°C e 28°C para a determinação do fator de transferência “*in situ*”.

Após a realização das regressões, foram obtidas as curvas sigmoides apresentadas na Figura 3.39, que demonstra como as curvas sigmoides se comportam em função das diferentes temperaturas, observando-se valores de módulos dinâmico maiores para temperaturas menores enquanto nas temperaturas menores ocorre o inverso, possibilitando a realização da superposição do efeito tempo-temperatura.

Figura 3. 39: Sigmoides para as temperaturas 12°C, 20°C e 28°C.



Fonte: Próprio autor.

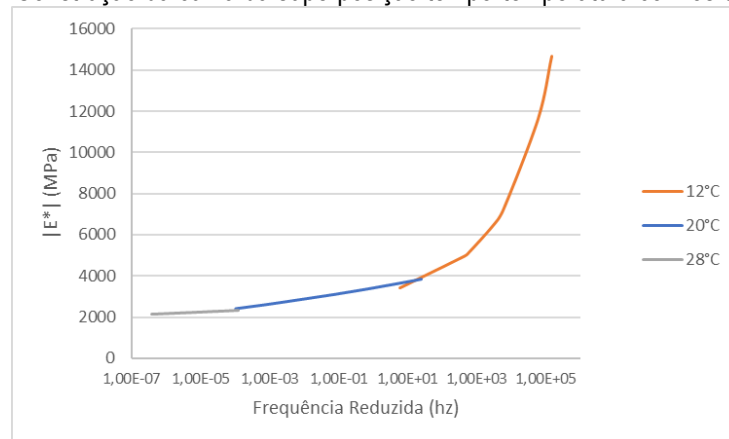
Desta forma, buscou-se, utilizando o princípio da superposição tempo/temperatura, deslocar as curvas, de forma a determinar o fator de correção (*shift fator*) a ser utilizado nos dados em estudo. Conforme demonstrado na Tabela 3.36, para os fatores de correção identificados, foi possível realizar a correção da curva, conforme ilustrado na Figura 3.40.

Tabela 3. 36: Determinação dos fatores de deslocamento para construção da curva.

Fator deslocamento tempo - Temperatura (t - T)			
Shift at	6000,0000	1	0,00001
Log (aT)	3,78	0,00	-5,30

Fonte: Próprio autor.

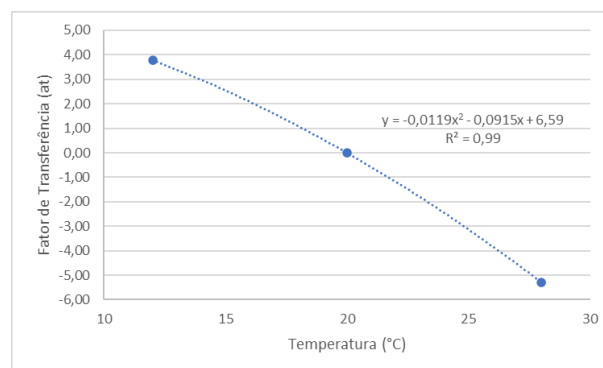
Figura 3. 40: Construção da curva da superposição tempo-temperatura com os dados "in situ".



Fonte: Próprio autor.

Por meio da regressão dos fatores de correção identificados, conforme ilustrado na Figura 3.41, foram obtidos os seguintes fatores de correção $a_1 = -0,0119$, $a_2 = -0,0915$ e $a_3 = 6,59$, que utilizando a equação $\log a_t = a_1 \cdot T^2 + a_2 \cdot T + a_3$, fornece o fator de correção da frequência, que por sua vez permite determinar a frequência reduzida para os dados de campo.

Figura 3. 41: Determinação dos fatores de ajuste para determinação do fator de correção.



Fonte: Próprio autor.

Desta forma, com a transformação das frequências reais para as frequências relativas na temperatura de referência, torna-se possível a elaboração das curvas de campo na mesma temperatura de referência do ensaio de caracterização da curva mestra, possibilitando assim a comparação destas.

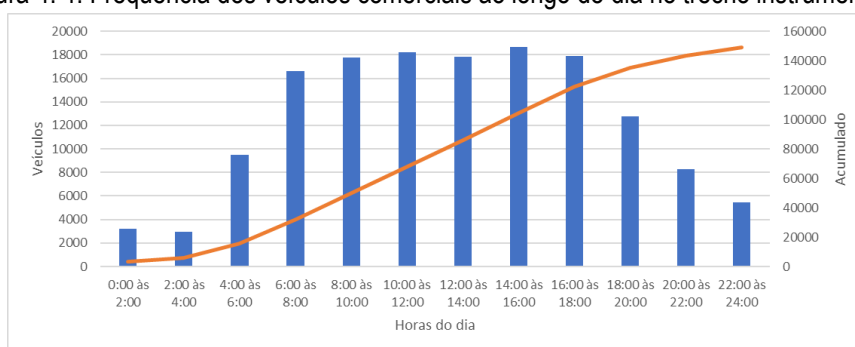
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados das medições realizadas pela instrumentação do trecho experimental, sua caracterização e tratamento estatístico ao longo do período de observação do trecho instrumentado. Começa-se apresentando a característica das cargas (quantidade e frequência), logo após a temperatura e sua influência na frequência, passando as tensões e deformações, o cálculo dos Módulos Dinâmicos, e por fim a comparação das deformações com e sem Geogrelha.

4.1 – Quantidade de Veículos

Na Figura 4.1 é apresentada a quantidade total dos veículos registrados pela instrumentação por faixa de horário, nos 105 dias de registros válidos, de um tráfego considerado pesado ($N = 9,3.10^7$). É possível determinar que a maior concentração de passagem de veículos é entre às 6:00h e 18:00h horas, horário considerado comercial, com substancial diminuição de tráfego no período noturno, chegando a menor frequência de passagem veículos a ocorrer entre as 2:00h e 4:00h do dia.

Figura 4. 1: Frequência dos veículos comerciais ao longo do dia no trecho instrumentado.



Fonte: Próprio autor.

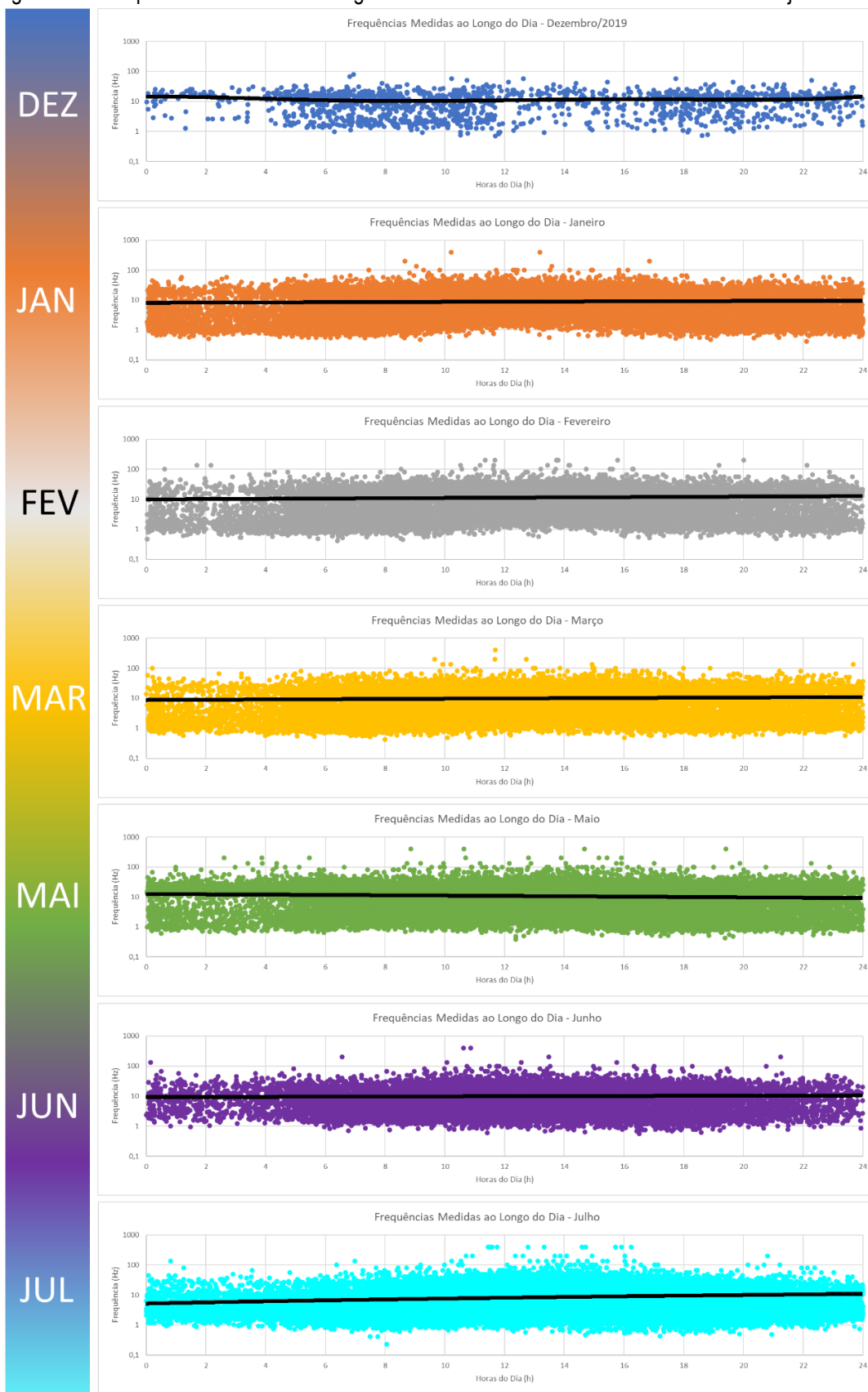
Esta informação auxilia na compreensão da distribuição dos dados registrados na instrumentação ao longo do dia e como a dispersão se concentra nos horários comerciais, principalmente nos horários de maior temperatura do dia, que se concentram entre 12:00 h e 16:00 h.

Uma vez que o trecho experimental está inserido no Contorno do Recife, com um volume médio diário de mais de 45 mil veículos, o elevado registro de veículos comerciais vai ao encontro dos registros históricos de tráfego realizados nas imediações do trecho instrumentado.

4.1 - Frequência Medida

De posse dos tempos de aplicação dos pulsos de carga, foram calculadas as suas respectivas frequências. Na Figura 4.2 estão apresentados os resultados das frequências, em escala logarítmica, ao longo do dia, para os meses de dezembro de 2019 a julho de 2020, cujos histogramas estão apresentados na Tabela 4.1. A linha preta indica a linha de tendência dos dados linearmente. Os valores medidos em todo o período de observação foram 148.982 medidas, que apresentam 19,42 Hz de Média, com desvio padrão de 20,3Hz.

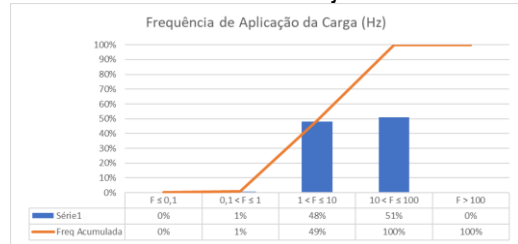
Figura 4. 2: Frequências Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



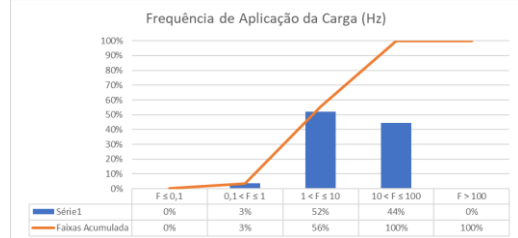
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4. 1: Histogramas das Frequências ao longo dos meses de dezembro/2019 a julho/2020.

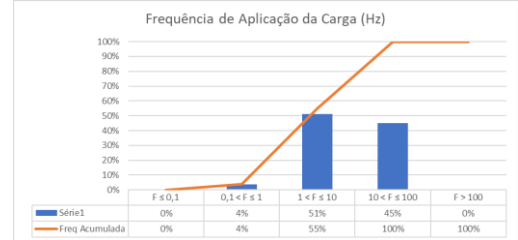
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Dez	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	13	1%	1%
	$1 < F \leq 10$	752	48%	49%
	$10 < F \leq 100$	799	51%	100%
	$F > 100$	0	0%	100%



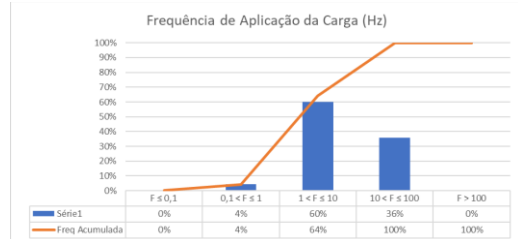
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jan	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	983	3%	3%
	$1 < F \leq 10$	14636	52%	56%
	$10 < F \leq 100$	12485	44%	100%
	$F > 100$	6	0%	100%



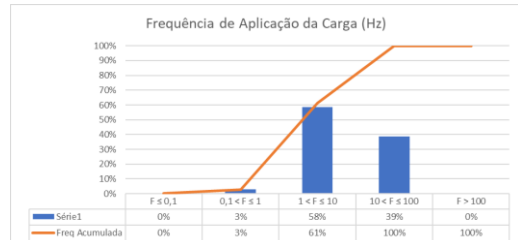
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Fev	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	644	4%	4%
	$1 < F \leq 10$	8781	51%	55%
	$10 < F \leq 100$	7764	45%	100%
	$F > 100$	16	0%	100%



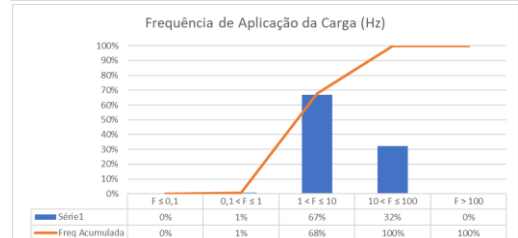
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Mar	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	836	4%	4%
	$1 < F \leq 10$	11978	60%	64%
	$10 < F \leq 100$	7127	36%	100%
	$F > 100$	8	0%	100%



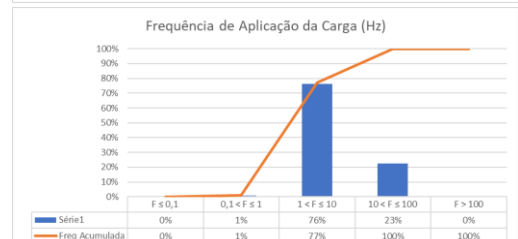
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Mai	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	772	3%	3%
	$1 < F \leq 10$	16050	58%	61%
	$10 < F \leq 100$	10621	39%	100%
	$F > 100$	28	0%	100%



	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jun	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	103	1%	1%
	$1 < F \leq 10$	8747	67%	68%
	$10 < F \leq 100$	4207	32%	100%
	$F > 100$	9	0%	100%



	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jul	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	389	1%	1%
	$1 < F \leq 10$	31864	76%	77%
	$10 < F \leq 100$	9433	23%	100%
	$F > 100$	37	0%	100%



Fonte: Próprio Autor.

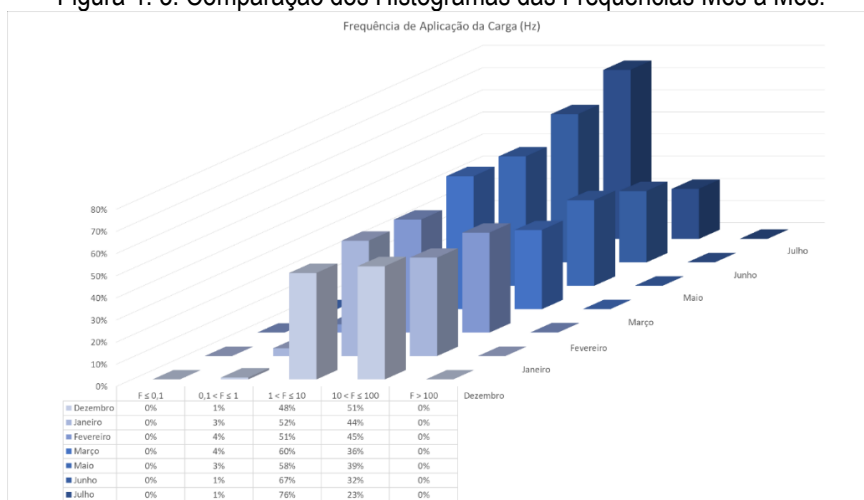
Adicionando-se a linha de tendência nos dados de frequência, é possível verificar que os valores se concentram próximos a frequência de 10 Hz. Segundo Cheng *et al.* (2022a) esta deveria ser a frequência tipicamente utilizada na maioria dos ensaios de fadiga de camadas asfálticas, e não a frequência de 1Hz, comumente utilizada no ensaio de compressão diametral.

Os dados da Tabela 4.1, que relaciona os histogramas dos dados coletados mês a mês, indicam que as frequências apresentam distribuição próxima entre as faixas de frequências de 1Hz a 10 Hz e de 10Hz a 100 Hz no início do registro histórico (48% e 51% respectivamente), passando para uma maior concentração das frequências na faixa de 1 Hz a 10 Hz em julho, com 76% das frequências registradas nesta faixa, conforme apresentado na Figura 4.3.

Este comportamento é atribuído a conclusão do empreendimento de restauração da BR-101/PE, no terceiro trimestre do ano de 2020, iniciando assim a operação efetiva da rodovia, gerando acréscimo de veículos, reduzindo a sua velocidade média. Atrelado a este fator também corroboram o retorno aos serviços dos equipamentos controladores de velocidade nas proximidades do trecho instrumentado, que também auxiliaram a um controle indireto das velocidades.

Ademais, os dados registrados serão utilizados na avaliação do comportamento ao longo dos meses da camada instrumentada.

Figura 4. 3: Comparação dos Histogramas das Frequências Mês a Mês.



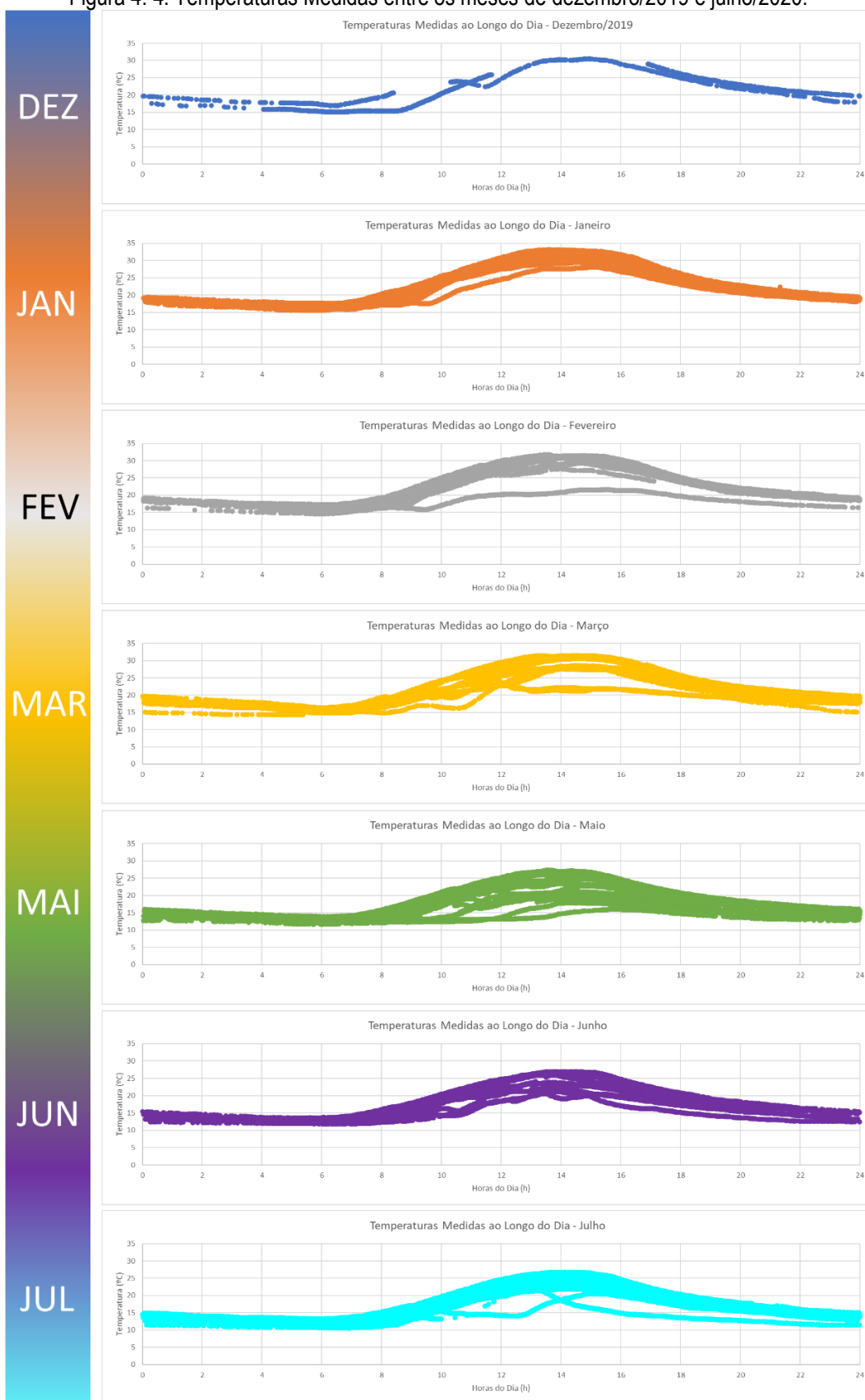
Fonte: Próprio Autor.

4.2 - Temperaturas Medidas

As temperaturas, na profundidade 8,0 cm, foram registradas pelos sensores de temperatura do tipo LM. Na Figura 4.4 são apresentadas as temperaturas medidas entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020 e sua variação ao longo do dia. Foi observado temperatura média de 22°C, com desvio padrão de 6°C.

Conforme pode ser verificado, há uma concentração de temperaturas mais elevadas entre as 12:00 h e 16:00 h do dia. Esta informação se faz necessária para a compreensão da contribuição da temperatura na construção da curva de módulo dinâmico. A Tabela 4.2 ilustra os histogramas das temperaturas mês a mês, onde é possível identificar a mudança das estações entre o verão, que se concentra entre os meses de dezembro a fevereiro, e para o inverno, que se concentra entre os meses de junho e julho, para a região do trecho instrumentado

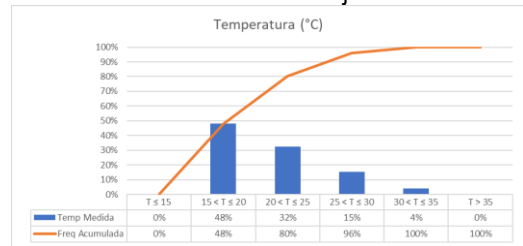
Figura 4. 4: Temperaturas Medidas entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



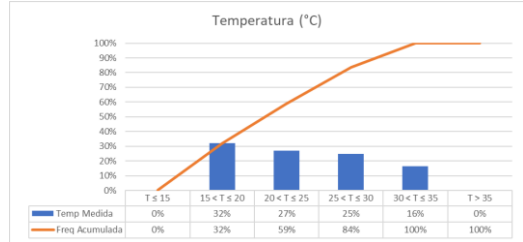
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4. 2: Histogramas das Temperaturas ao longo dos meses de dezembro/2019 a julho/2020.

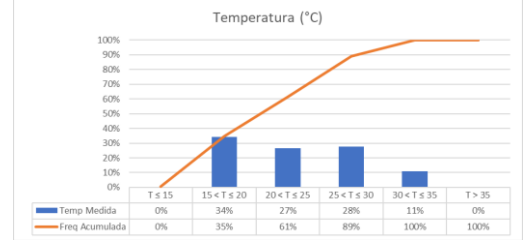
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Dez	T ≤ 15	0	0%	0%
	15 < T ≤ 20	751	48%	48%
	20 < T ≤ 25	506	32%	80%
	25 < T ≤ 30	242	15%	96%
	30 < T ≤ 35	65	4%	100%
	T > 35	0	0%	100%



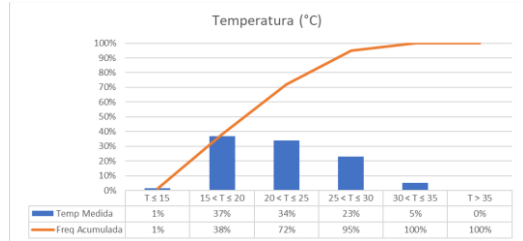
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Jan	T ≤ 15	0	0%	0%
	15 < T ≤ 20	8972	32%	32%
	20 < T ≤ 25	7536	27%	59%
	25 < T ≤ 30	7002	25%	84%
	30 < T ≤ 35	4602	16%	100%
	T > 35	0	0%	100%



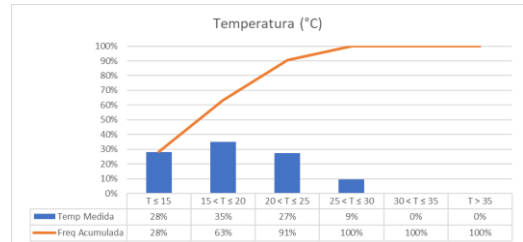
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Fev	T ≤ 15	72	0%	0%
	15 < T ≤ 20	5907	34%	35%
	20 < T ≤ 25	4580	27%	61%
	25 < T ≤ 30	4761	28%	89%
	30 < T ≤ 35	1885	11%	100%
	T > 35	0	0%	100%



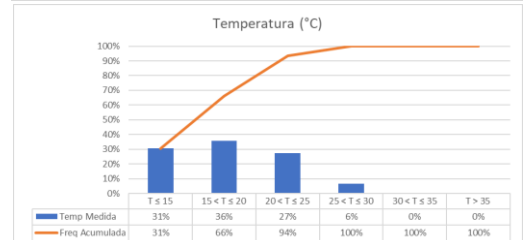
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Mar	T ≤ 15	263	1%	1%
	15 < T ≤ 20	7547	37%	38%
	20 < T ≤ 25	6930	34%	72%
	25 < T ≤ 30	4697	23%	95%
	30 < T ≤ 35	1009	5%	100%
	T > 35	0	0%	100%



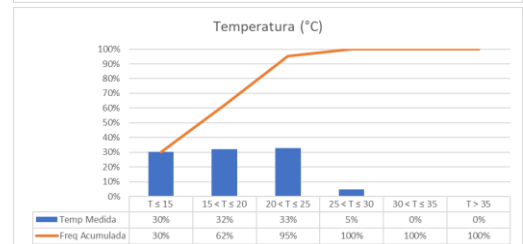
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Mai	T ≤ 15	7746	28%	28%
	15 < T ≤ 20	9623	35%	63%
	20 < T ≤ 25	7543	27%	91%
	25 < T ≤ 30	2559	9%	100%
	30 < T ≤ 35	0	0%	100%
	T > 35	0	0%	100%



	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Jun	T ≤ 15	3992	31%	31%
	15 < T ≤ 20	4654	36%	66%
	20 < T ≤ 25	3580	27%	94%
	25 < T ≤ 30	840	6%	100%
	30 < T ≤ 35	0	0%	100%
	T > 35	0	0%	100%



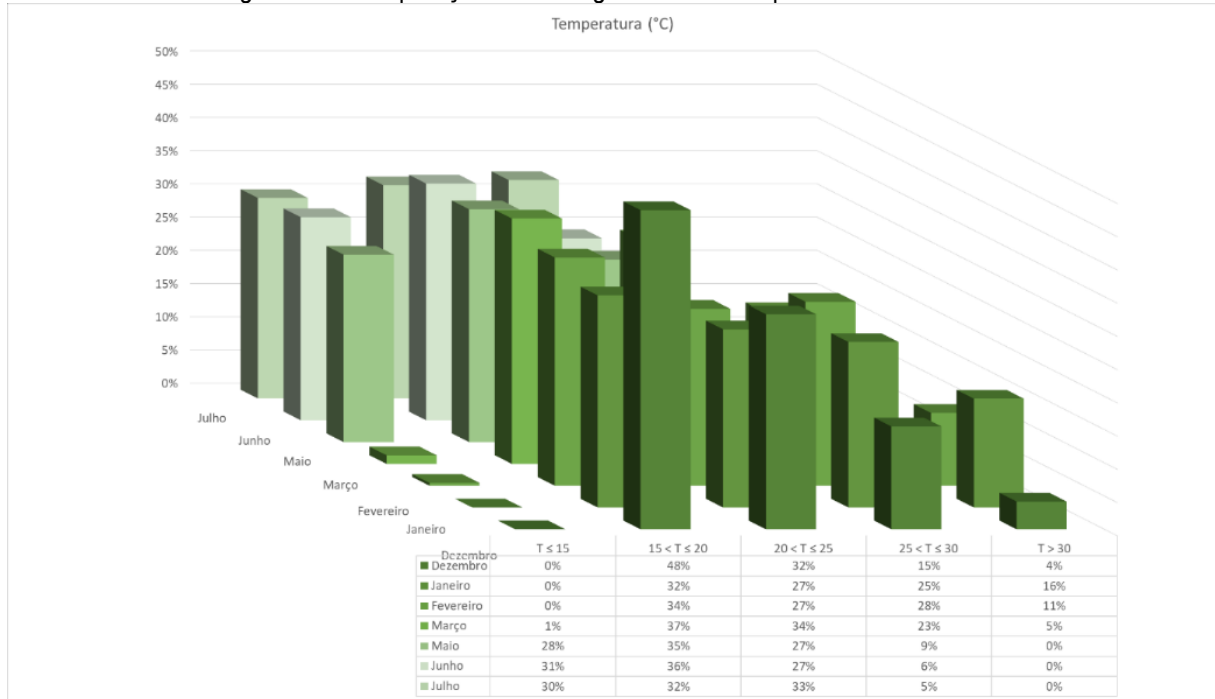
	Bloco	Freqüência	%	%acumulada
Jul	T ≤ 15	12586	30%	30%
	15 < T ≤ 20	13388	32%	62%
	20 < T ≤ 25	13711	33%	95%
	25 < T ≤ 30	2038	5%	100%
	30 < T ≤ 35	0	0%	100%
	T > 35	0	0%	100%



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se verificar que as leituras do mês de janeiro foi o que apresentou a temperatura na profundidade 8,0 cm com maiores valores (37°C), e o mês de julho o que apresentou menores valores (11°C), conforme pode ser visualizado em maior detalhe na comparação dos histogramas apresentado na Figura 4.5.

Figura 4. 5: Comparação dos Histogramas das Temperaturas Mês a Mês.



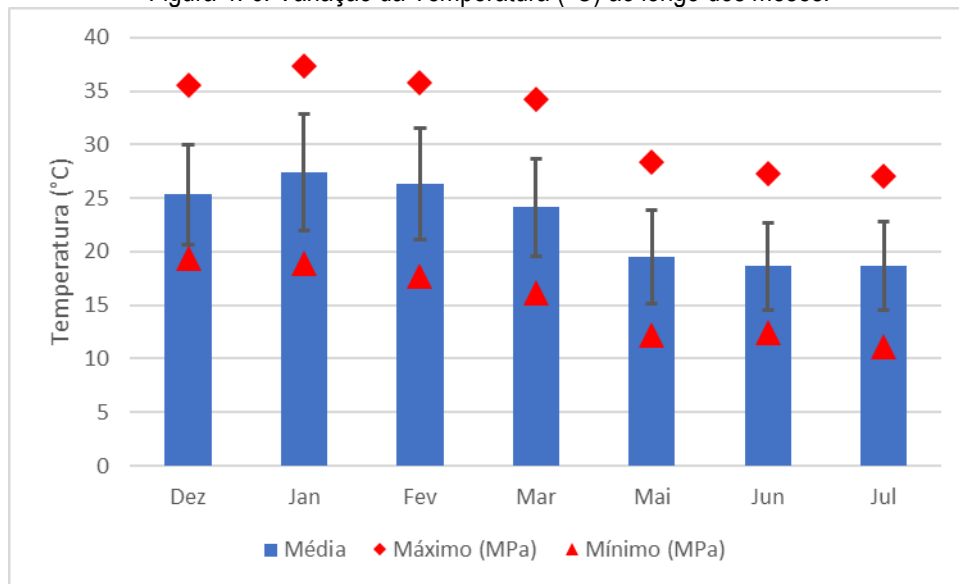
Fonte: Próprio Autor.

Verifica-se que entre os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março foram registradas maiores ocorrências de temperaturas medidas na camada betuminosa acima de 25°C, temperatura adotada para o ensaio de Módulo de Resiliência. Entretanto estas ocorrências não são verificadas nos meses de maio, junho e julho, demonstrando a transição de comportamento das temperaturas, característico da mudança do período do verão para o inverno.

Este comportamento tem influência direta nos resultados das frequências reduzidas, que deslocam as frequências medidas para uma frequência correspondente a uma temperatura de referência (TR), em uma curva de módulo dinâmico, utilizando o princípio da superposição tempo-temperatura (tTSP).

Na Figura 4.6 verificou-se como ocorreu a variação média da temperatura ao longo dos meses, no trecho instrumentado, dos meses de verão, com picos de temperatura da ordem de 37°C em janeiro, e para os meses de inverno com valores mínimos de 11 °C em julho.

Figura 4. 6: Variação da Temperatura (°C) ao longo dos meses.



	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (°C)	25	27	26	24	19	19	19
Desvio Padrão (°C)	5	5	5	5	4	4	4
Coeficiente de Variação (%)	18%	20%	20%	19%	22%	22%	22%
Máximo (°C)	36	37	36	34	28	27	27
Mínimo (°C)	19	19	18	16	12	12	11

Fonte: Próprio Autor.

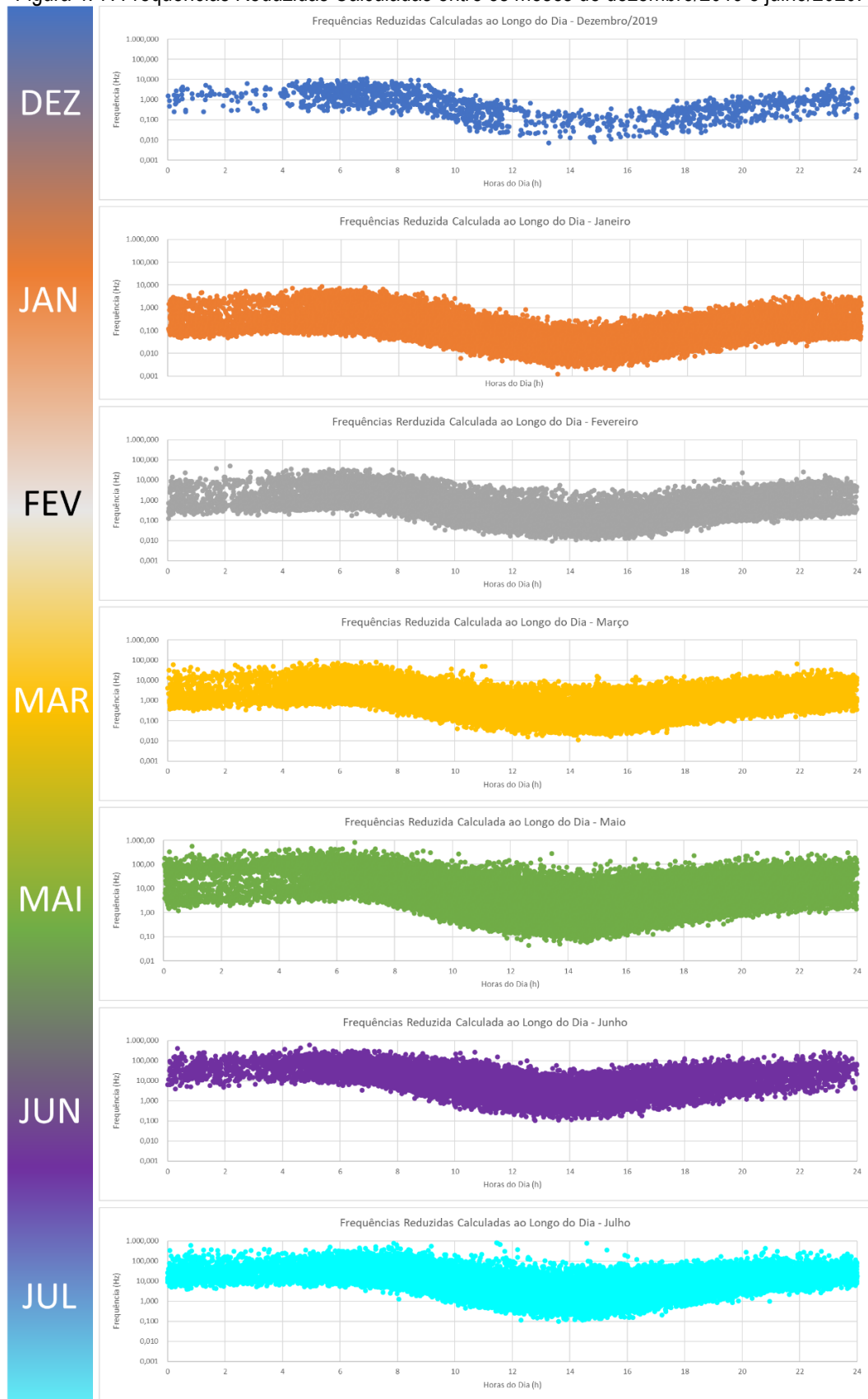
4.3 - Frequência Reduzida para Temperatura de Referência de 20°C

Na Figura 4.7 são apresentados os dados de deslocamento das frequências devido as variações de temperatura registradas em cada mês. Observou-se que elevadas temperaturas reduzem as frequências registradas, enquanto as baixas temperaturas deslocam as frequências para valores superiores, como esperado, espelhando o princípio da superposição tempo-temperatura.

De acordo com os histogramas das frequências reduzidas (ver Tabela 4.3), é possível identificar a alteração sofrida pela frequência para transferência de suas leituras para a temperatura de referência. Como previsto, as contribuições para frequências reduzidas menores ocorreram nos meses quentes, enquanto as contribuições das frequências reduzidas maiores ocorreram nos meses frios.

Destaca-se que a contribuição na construção do lado esquerdo da curva de módulos dinâmicos é influenciada, preponderantemente, pelas medidas dos sensores nos meses quentes, enquanto a contribuição na construção do lado direito da curva de módulos dinâmicos tem maior contribuição das medidas dos meses frios.

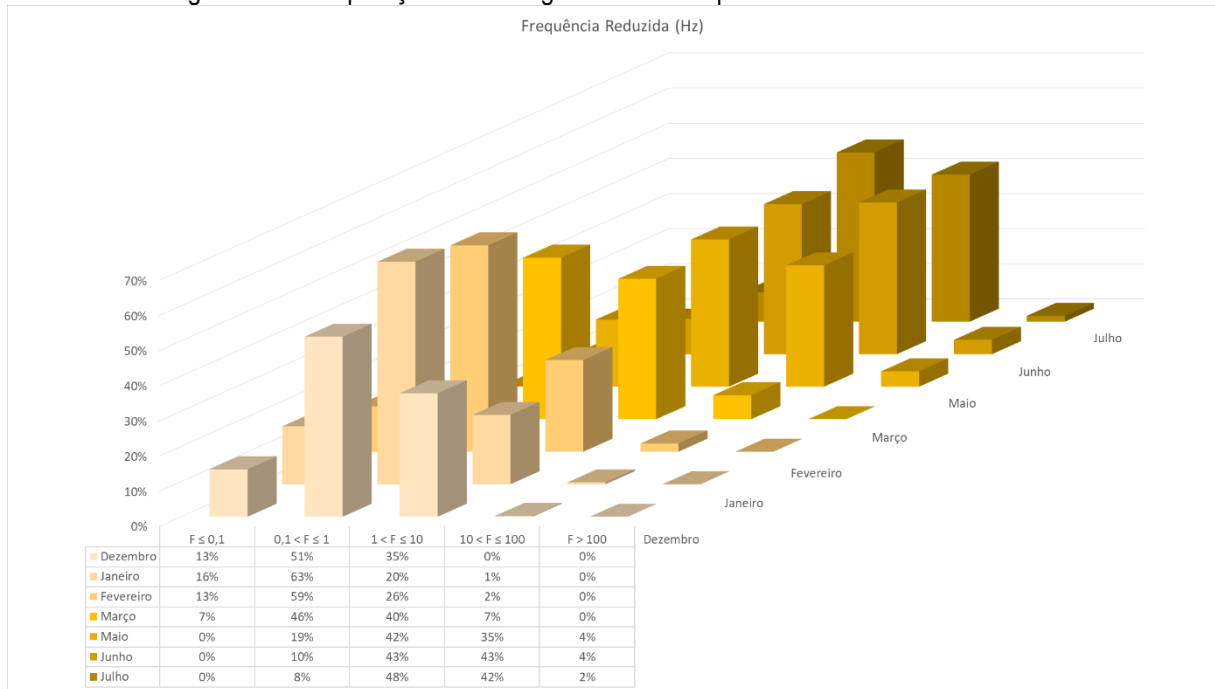
Figura 4. 7: Frequências Reduzidas Calculadas entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.8 estão ilustradas as comparações dos histogramas das frequências reduzidas mês a mês, para auxiliar na compreensão deste comportamento, ficando evidente que as frequências reduzidas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro concentram-se na faixa de frequências de 0,1 Hz a 1,0 Hz, enquanto as frequências reduzidas nos meses de maio, junho e julho concentram-se na faixa de 10Hz a 100Hz.

Figura 4. 8: Comparação dos Histogramas das Frequências Reduzidas Mês a Mês.

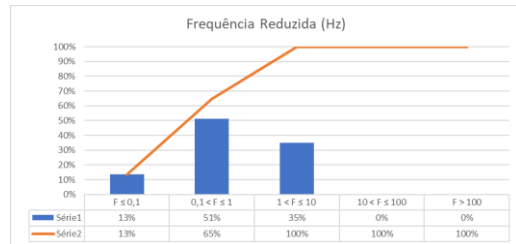


Fonte: Próprio Autor.

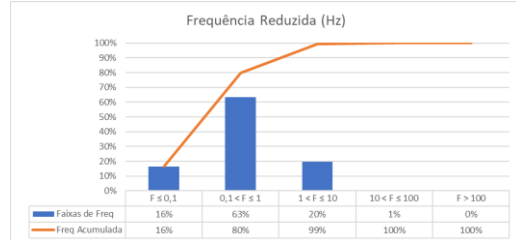
Na Tabela 4.4 são apresentados os histogramas das frequências calculadas e reduzidas, mês a mês. É possível observar que a transferência das frequências nos meses mais quentes é maior que a dos meses mais frios. Isto decorre das baixas temperaturas estarem mais próximas à temperatura de referência, deslocando-se menos que as temperaturas maiores, que apresentam valores com variação maior.

Tabela 4. 3: Histogramas das Frequências Reduzidas - meses de Dezembro/2019 a Julho/2020.

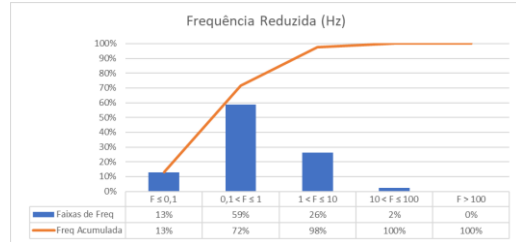
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Dez	$F \leq 0,1$	211	13%	13%
	$0,1 < F \leq 1$	801	51%	65%
	$1 < F \leq 10$	549	35%	100%
	$10 < F \leq 100$	3	0%	100%
	$F > 100$	0	0%	100%



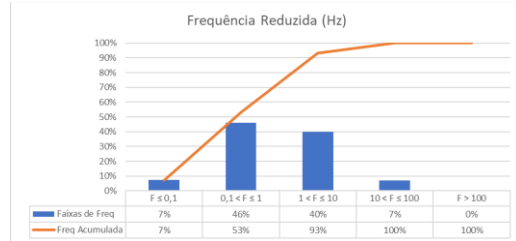
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jan	$F \leq 0,1$	4632	16%	16%
	$0,1 < F \leq 1$	17790	63%	80%
	$1 < F \leq 10$	5540	20%	99%
	$10 < F \leq 100$	148	1%	100%
	$F > 100$	0	0%	100%



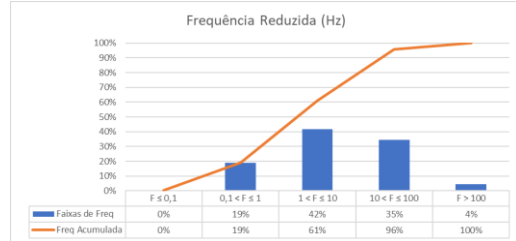
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Fev	$F \leq 0,1$	2222	13%	13%
	$0,1 < F \leq 1$	10098	59%	72%
	$1 < F \leq 10$	4486	26%	98%
	$10 < F \leq 100$	399	2%	100%
	$F > 100$	0	0%	100%



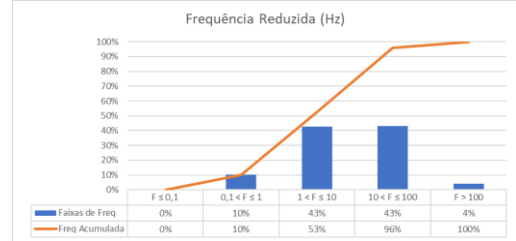
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Mar	$F \leq 0,1$	1455	7%	7%
	$0,1 < F \leq 1$	9168	46%	53%
	$1 < F \leq 10$	7964	40%	93%
	$10 < F \leq 100$	1362	7%	100%
	$F > 100$	0	0%	100%



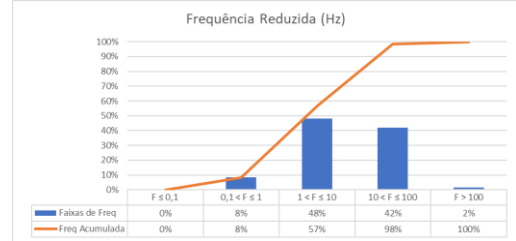
	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Mai	$F \leq 0,1$	45	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	5244	19%	19%
	$1 < F \leq 10$	11502	42%	61%
	$10 < F \leq 100$	9479	35%	96%
	$F > 100$	1201	4%	100%



	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jun	$F \leq 0,1$	0	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	1321	10%	10%
	$1 < F \leq 10$	5576	43%	53%
	$10 < F \leq 100$	5636	43%	96%
	$F > 100$	533	4%	100%



	Bloco	Frequência	%	%acumulada
Jul	$F \leq 0,1$	1	0%	0%
	$0,1 < F \leq 1$	3497	8%	8%
	$1 < F \leq 10$	20082	48%	57%
	$10 < F \leq 100$	17453	42%	98%
	$F > 100$	690	2%	100%

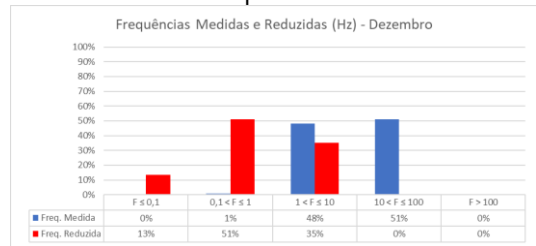


Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4. 4: Comparação dos Histogramas das Frequências Efetivas e Frequências Reduzidas

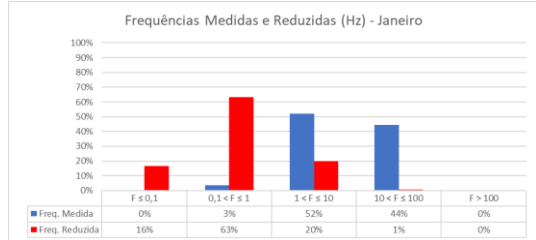
Dez

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	211	13%
0,1 < F ≤ 1	13	1%	801	51%
1 < F ≤ 10	752	48%	549	35%
10 < F ≤ 100	799	51%	3	0%
F > 100	0	0%	0	0%



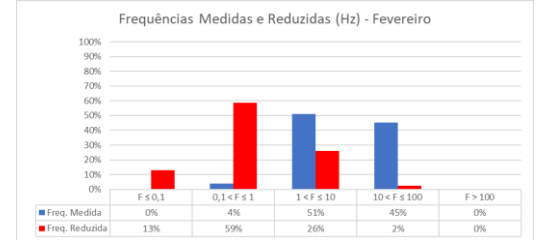
Jan

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	4632	16%
0,1 < F ≤ 1	983	3%	17790	63%
1 < F ≤ 10	14636	52%	5540	20%
10 < F ≤ 100	12485	44%	148	1%
F > 100	6	0%	0	0%



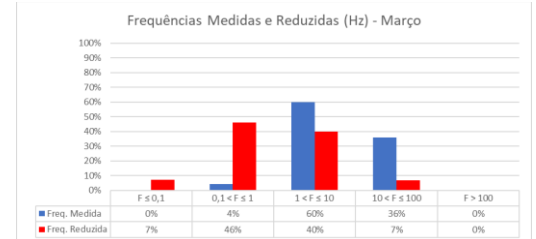
Fev

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	2222	13%
0,1 < F ≤ 1	644	4%	10098	59%
1 < F ≤ 10	8781	51%	4486	26%
10 < F ≤ 100	7764	45%	399	2%
F > 100	16	0%	0	0%



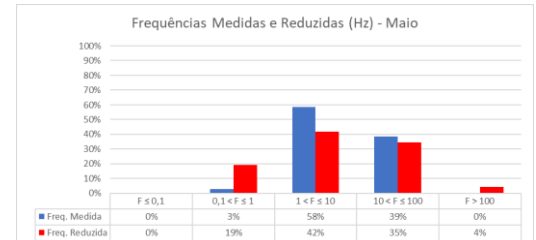
Mar

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	1455	7%
0,1 < F ≤ 1	836	4%	9168	46%
1 < F ≤ 10	11978	60%	7964	40%
10 < F ≤ 100	7127	36%	1362	7%
F > 100	8	0%	0	0%



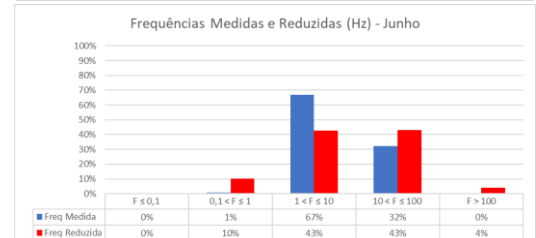
Mai

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	45	0%
0,1 < F ≤ 1	772	3%	5244	19%
1 < F ≤ 10	16050	58%	11502	42%
10 < F ≤ 100	10621	39%	9479	35%
F > 100	28	0%	1201	4%



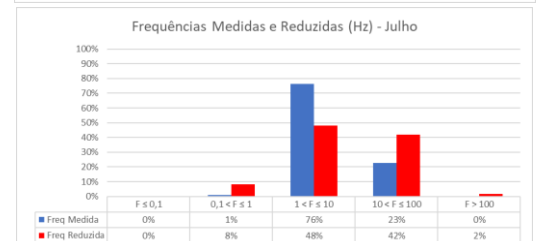
Jun

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	0	0%
0,1 < F ≤ 1	103	1%	1321	10%
1 < F ≤ 10	8747	67%	5576	43%
10 < F ≤ 100	4207	32%	5636	43%
F > 100	9	0%	533	4%



Jul

Bloco	Medida	%	Reduzida	%
F ≤ 0,1	0	0%	1	0%
0,1 < F ≤ 1	389	1%	3497	8%
1 < F ≤ 10	31864	76%	20082	48%
10 < F ≤ 100	9433	23%	17453	42%
F > 100	37	0%	690	2%

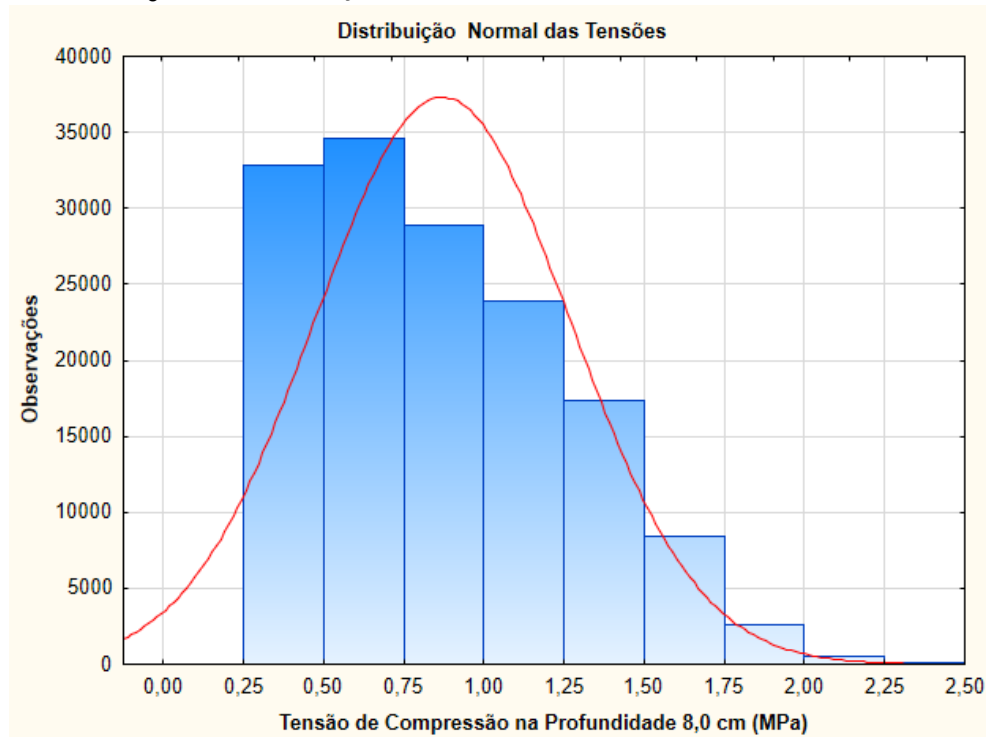


Fonte: Próprio Autor.

4.4 - Medida das Tensões

Na Figura 4.9 está apresentada a distribuição normal das tensões verticais na profundidade 8,0 cm registradas ao longo de todo o levantamento de tensões. A distribuição apresenta valor médio de 0,92 MPa, com desvio padrão de 0,38 MPa. Para os dados da instrumentação esta pode não ser a melhor representação, entretanto, a escolha de filtrar os veículos comerciais não registrando as passagens abaixo de 0,4MPa pode ter comprometido a representação dos dados.

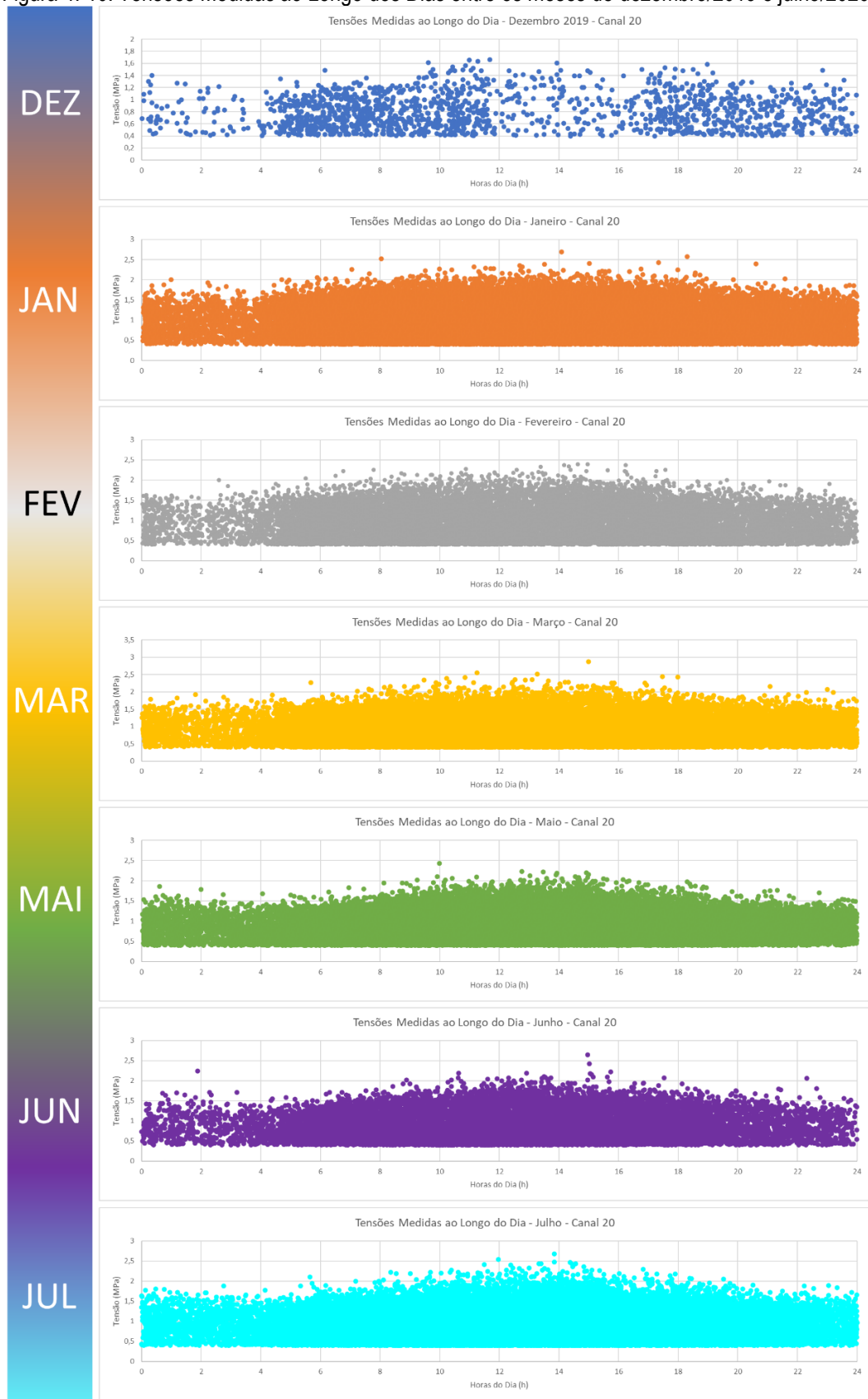
Figura 4. 9: Distribuição Normal das Tensões na Profundidade 8,0 cm.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as medidas de tensão registradas ao longo do dia, nos meses de coleta de dados pela instrumentação e na Figura 4.11 demonstrado os valores máximos e mínimos registrados ao longo dos meses. Foram 149.084 medidas de tensão realizadas, com média de 0,87 MPa e desvio padrão de 0,40 MPa.

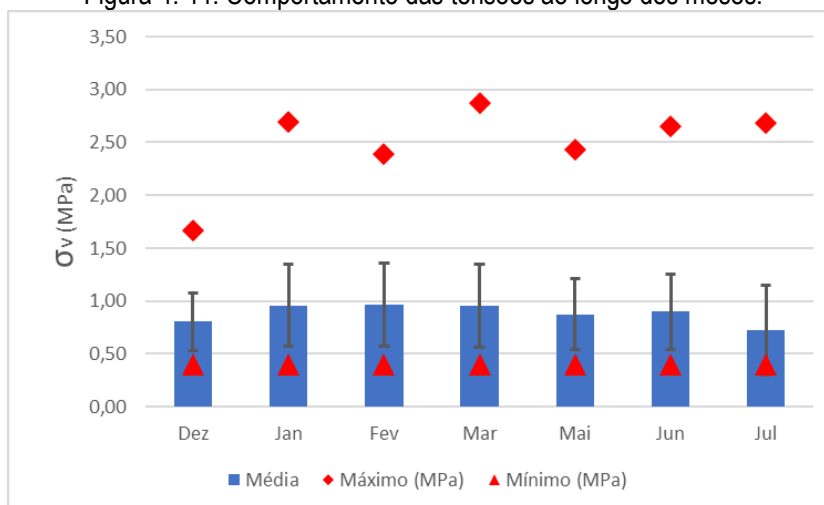
Figura 4. 10: Tensões Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.11 verifica-se o comportamento das tensões medidas no período dos registos. Os valores médios observados na profundidade instrumentada apresentaram valor próximo ao estimado no modelo mecanístico elaborado com o AEMC, onde determinou-se o valor de tensão de 0,86 MPa. As falhas ocorridas nas células de carga podem ser atribuídas as elevadas tensões registradas, chegando a valores próximos a 3,0 MPa.

Figura 4. 11: Comportamento das tensões ao longo dos meses.



	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (MPa)	0,80	0,96	0,96	0,95	0,88	0,90	0,72
Desvio Padrão (MPa)	0,28	0,39	0,39	0,39	0,33	0,36	0,42
Coeficiente de Variação (%)	34%	41%	41%	41%	38%	40%	58%
Máximo (MPa)	1,66	2,69	2,39	2,87	2,43	2,65	2,68
Mínimo (MPa)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

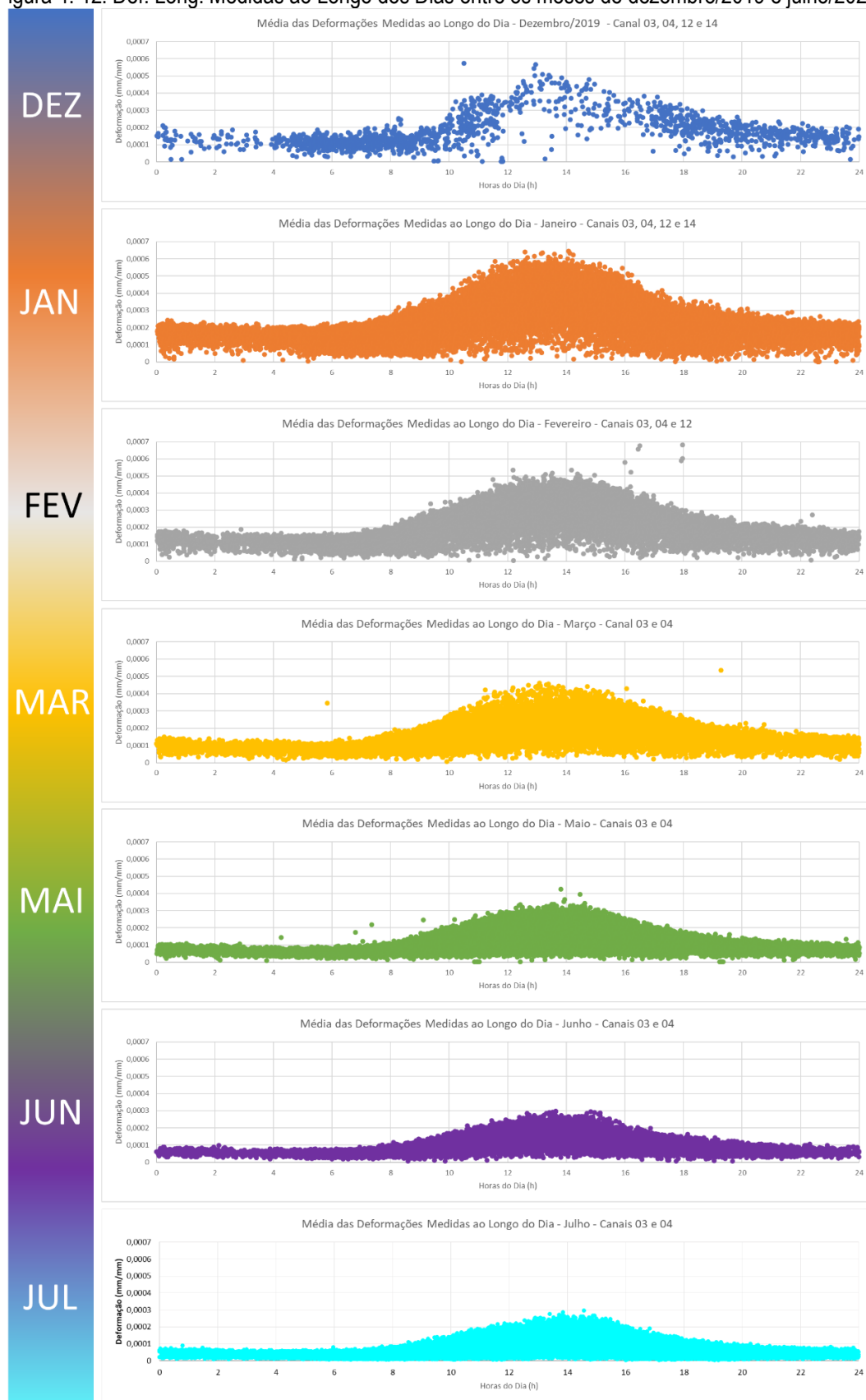
Fonte: Próprio Autor.

4.5 - Medida das Deformações Longitudinais

Na Figura 4.12 estão ilustradas as médias das deformações longitudinais dos canais ativos mês a mês. Conforme pode-se verificar, durante o período de maiores temperaturas do dia há a ocorrência de valores de deformação mais elevados. Este comportamento ocorre devido a influência da temperatura nas deformações que ocorrem na camada asfáltica que possui características visco-elasto-plástica. Nos meses de junho e julho observa-se que a ocorrência de deformações elevadas reduz significativamente, devido à resposta da operação da camada asfáltica em menores temperaturas.

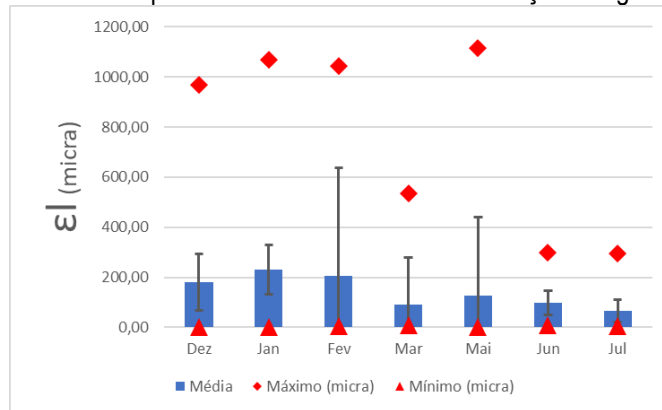
O comportamento dependente da temperatura influencia diretamente na tentativa de mensuração do módulo dinâmico da camada asfáltica "in situ", uma vez que a ocorrências das tensões registradas demonstrou a tendência de nos meses quentes são obtidas respostas de módulos menores, e nos meses frios obtêm-se módulos com valores mais elevados. Na Figura 4.13 é demonstrado o comportamento estatístico das deformações longitudinais. Percebe-se que seus valores sofrem incremento elevado nos períodos de maior temperatura, comportamento que pode ser atribuído às características visco-elasto-plásticas da camada asfáltica.

Figura 4. 12: Def. Long. Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4. 13: Comportamento estatístico das deformações longitudinais.



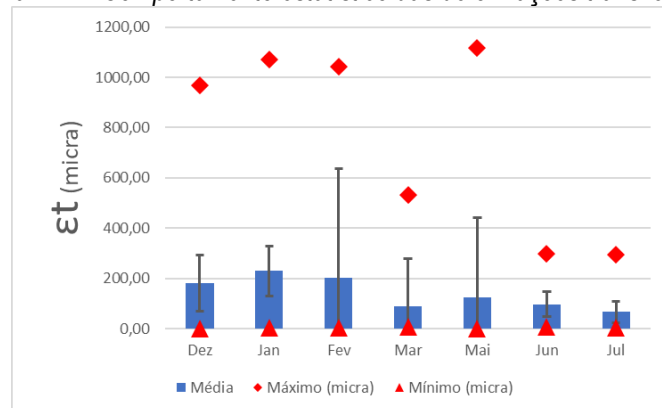
	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (micra)	181,14	230,07	204,11	90,98	125,01	97,53	66,48
Desvio Padrão (micra)	111,92	98,11	431,71	188,33	316,10	49,06	44,19
Coefficiente de Variação (%)	62%	43%	212%	207%	253%	50%	66%
Máximo (micra)	967,50	1070,25	1043,33	534,00	1115,70	297,00	294,00
Mínimo (micra)	2,50	2,75	5,50	7,00	1,50	7,00	4,00

Fonte: Próprio Autor.

4.6 - Medida das Deformações Transversais

De forma análoga as deformações longitudinais, as leituras foram avaliadas por meio da diferença registrada entre a linha de base do “strain gauge” e o seu pico de leitura. Na Figura 4.14 são apresentadas as médias das deformações transversais dos canais mês a mês. Conforme pode-se verificar, o comportamento é idêntico ao apresentado pelos sensores longitudinais, com valores medidos de deformação maiores nos meses quentes e nos períodos de maior temperatura, entre 12 e 16 horas. O comportamento estatístico das deformações transversais ocorridas no trecho está demonstrado na Figura 4.15.

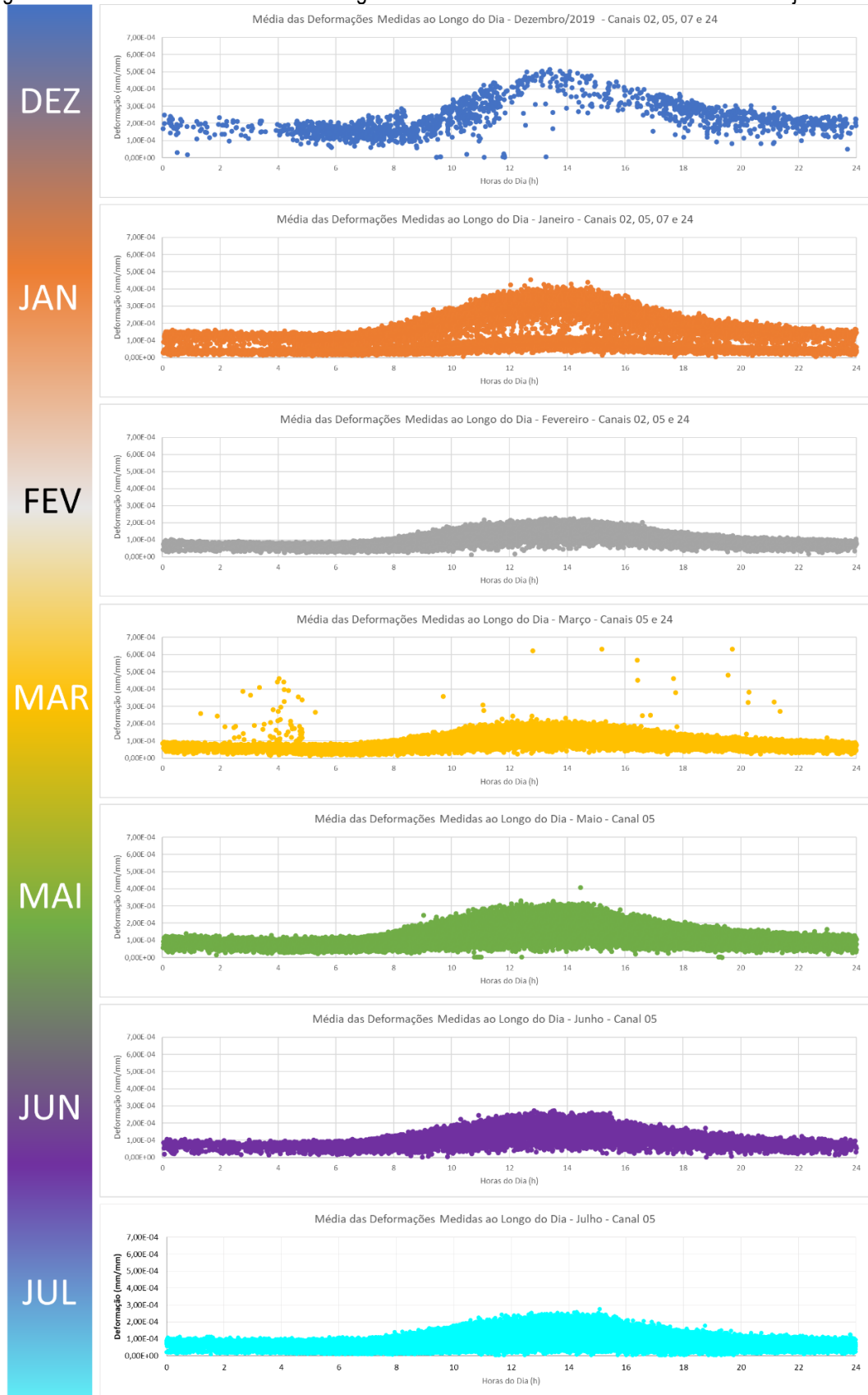
Figura 4. 14: Comportamento estatístico das deformações transversais.



	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (micra)	224,40	112,90	110,54	109,04	135,44	112,66	90,50
Desvio Padrão (micra)	92,40	85,62	40,64	53,91	55,47	47,04	46,94
Coefficiente de Variação (%)	41%	76%	37%	49%	41%	42%	52%
Máximo (micra)	513,50	907,50	1043,33	1634,00	40,80	273,00	274,00
Mínimo (micra)	2,75	4,00	5,50	14,50	1,00	3,00	2,00

Fonte: Próprio Autor.

Figura 4. 15: Def. Transv. Medidas ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



Fonte: Próprio Autor.

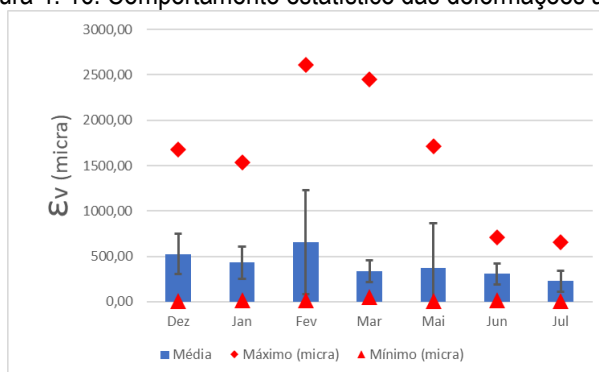
A partir dos dados apresentados, todas as deformações médias medidas foram superiores às estimadas pelo ensaio de módulo dinâmico pela norma DNIT ME – 416 (2019), que em seu item 8, letra h, da norma, estabelece que as deformações devem estar ajustadas para ocorrer em uma faixa de 50 a 75 micras, indicando que na prática se está trabalhando com deformações transversais a aplicação da carga maiores que as deformações que garantiriam o comportamento viscoelástico linear.

4.7 - Medida das Deformações Axiais

Na Figura 4.16 são apresentadas as deformações verticais calculadas ao longo do dia para os meses da instrumentação na profundidade 8.0 cm, onde apresentaram valor médio de 388 micra, com desvio padrão de 403 micra. Conforme pode-se constatar, os valores nos meses mais quentes apresentam maior dispersão de valores. Estes valores embora brutos, sofrerão tratamento de maneira a espelhar adequadamente o comportamento da camada asfáltica.

A deformação vertical calculada apresenta, em média, valor aproximado de 3 vezes a deformação longitudinal, enquanto a deformação vertical calculada apresenta valor aproximado de 4 vezes a deformação transversal, apresentando uma relação média de 25% entre as deformações. Isto ocorre devido as propriedades dos materiais asfálticos, que não são isotrópicos, homogêneos e lineares, entretanto, a contribuição das parcelas viscosas e plásticas não foram consideradas no presente estudo isoladamente, sendo consideradas as deformações totais medidas pelos sensores em resposta ao carregamento.

Figura 4. 16: Comportamento estatístico das deformações axiais

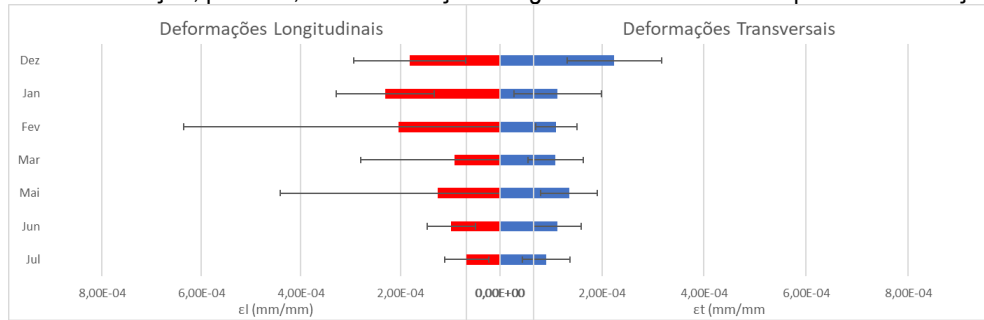


	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (micra)	526,24	430,03	656,17	337,10	373,71	306,03	227,79
Desvio Padrão (micra)	221,41	181,79	576,54	123,88	489,12	114,05	114,68
Coefficiente de Variação (%)	42%	42%	88%	37%	131%	37%	50%
Máximo (micra)	1681,13	1539,21	2606,85	2454,54	1712,09	707,30	654,60
Mínimo (micra)	7,23	14,55	20,41	48,43	5,39	20,12	10,05

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 4.17 verifica-se quais deformações mais contribuíram por mês para a determinação da deformação vertical utilizada para o cálculo do módulo dinâmico.

Figura 4. 17: Contribuição, por mês, das deformações longitudinais e transversais para a deformação vertical.

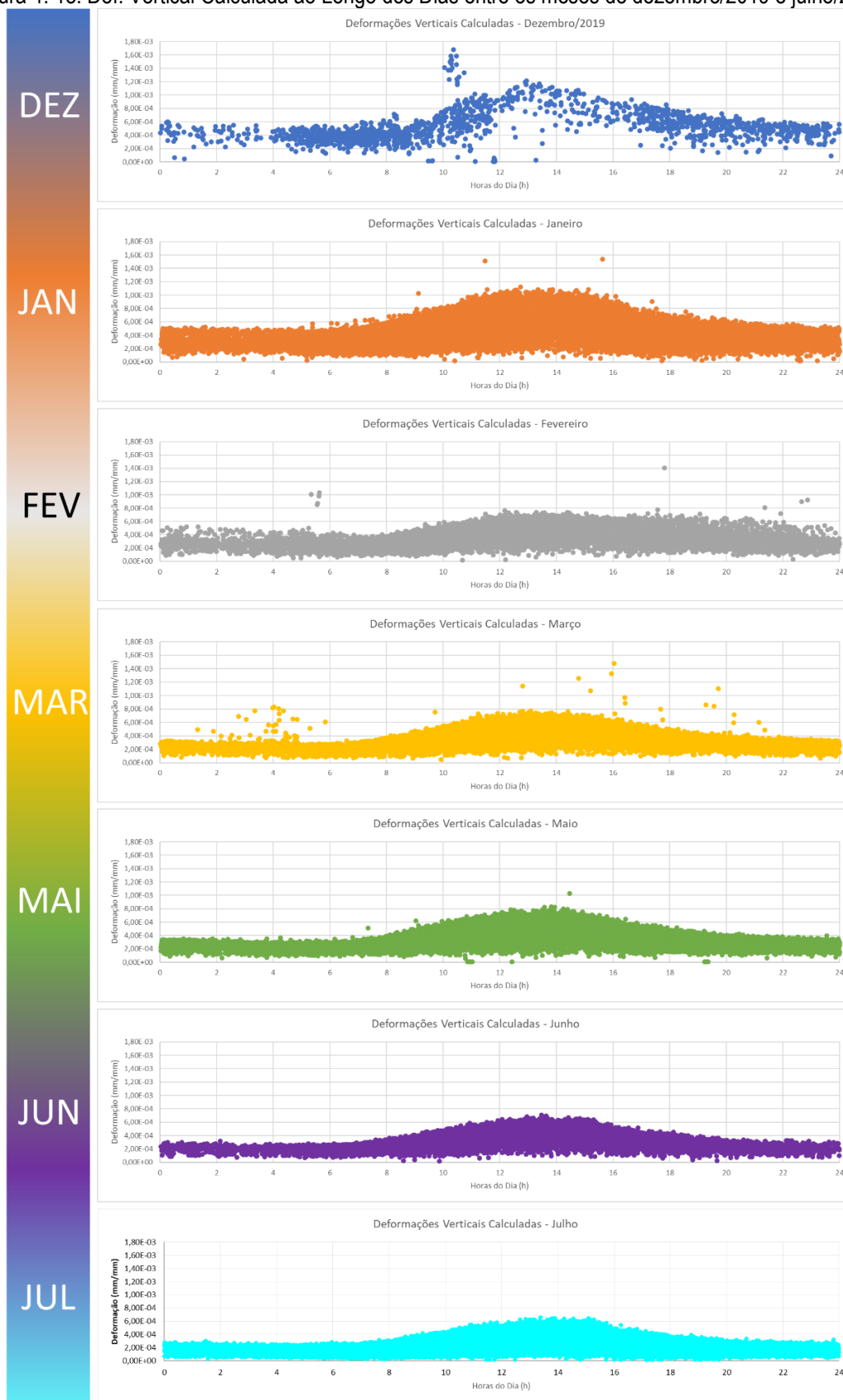


Fonte: Próprio Autor

As deformações médias nos meses de dezembro a janeiro apresentaram valores mais elevados, enquanto para os meses mais frios, de maio a julho, há uma redução nas medições das deformações pela instrumentação, sendo este um comportamento esperado para os sensores, conforme supracitado.

Na Figura 4.18 está ilustrado o comportamento estatístico das deformações axiais calculadas.

Figura 4. 18: Def. Vertical Calculada ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.

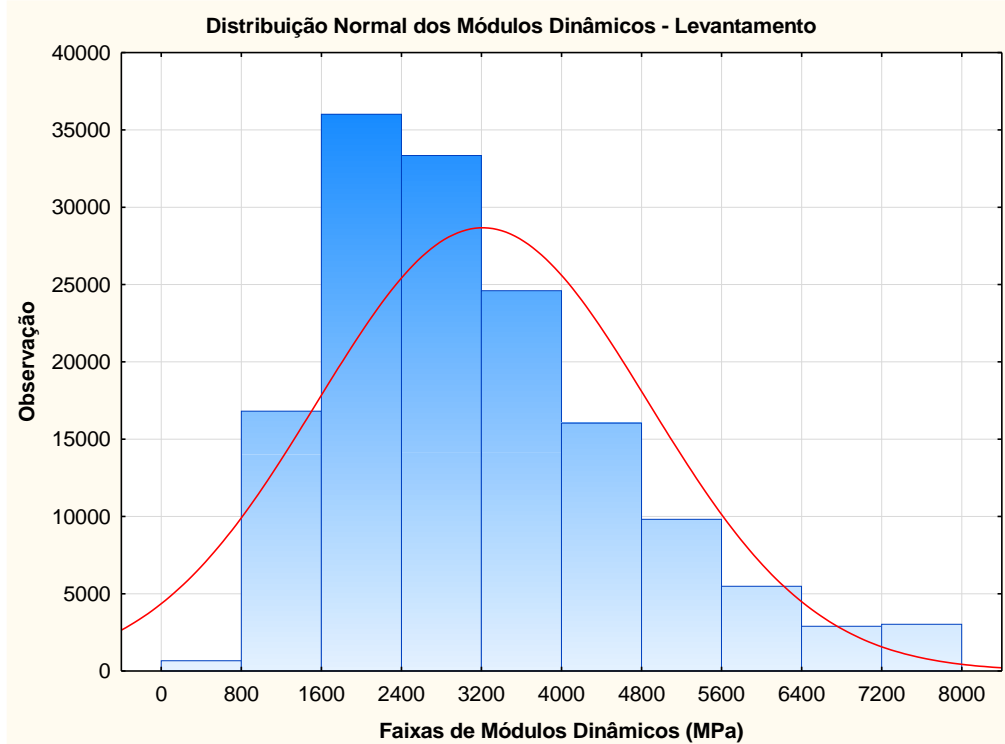


Fonte: Próprio Autor

4.8 - Medidas de Módulos Dinâmicos

Na Figura 4.19 é apresentada a distribuição normal dos módulos dinâmicos para todo o levantamento. A faixa da esquerda não apresentam observações devido as limitações impostas a realização do ensaio, para evitar que se contabilizassem veículos de passeio. A distribuição Normal apresenta média de 3.212 MPa e um desvio padrão de 1.934 MPa.

Figura 4. 19: Distribuição Normal dos Módulos Dinâmicos na profundidade 8,0 cm em todo o levantamento

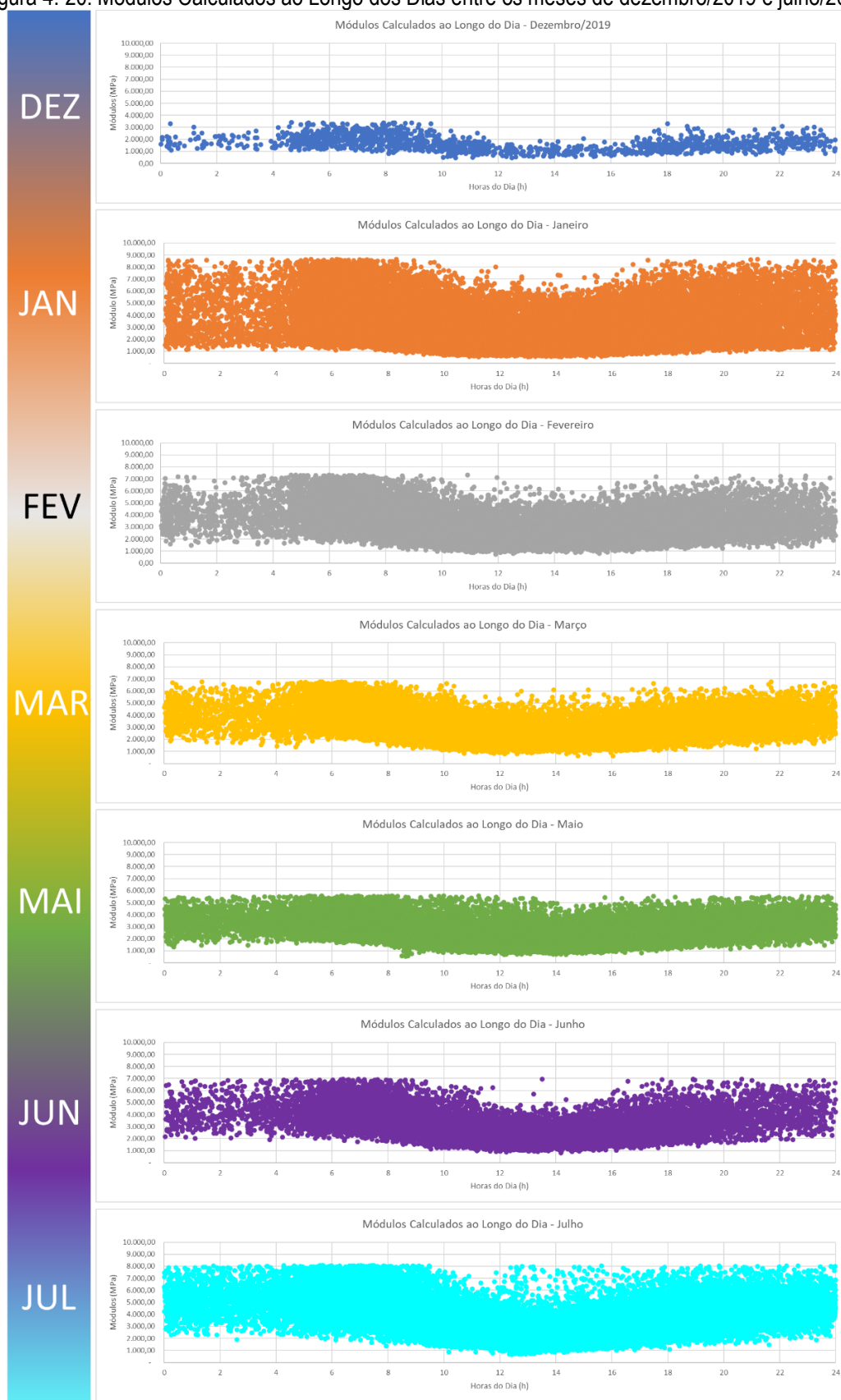


Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos módulos dinâmicos calculados ao longo do dia para os meses da pesquisa estão apresentados na Figura 4.20.

Na Tabela 4.5 verifica-se que os módulos tendem a apresentar comportamento linear, para as faixas de valores adotados. Entretanto, verifica-se ainda que uma dispersão maior de valores ocorre no mês de janeiro, uma vez que as frequências de aplicação das cargas não sofreram mudanças significativas ao longo dos meses.

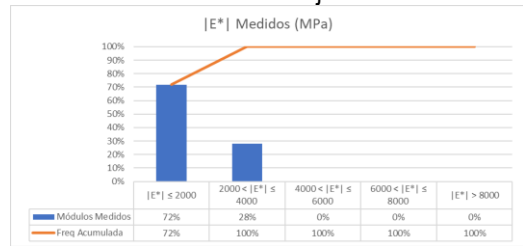
Figura 4. 20: Módulos Calculados ao Longo dos Dias entre os meses de dezembro/2019 e julho/2020.



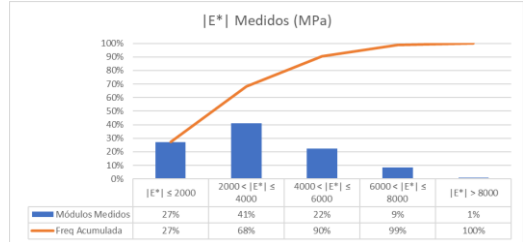
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4. 5: Histogramas dos Módulos Calculados - meses de dezembro/2019 a julho/2020.

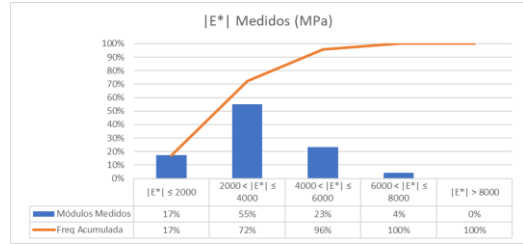
Dez	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	1103	72%	72%
	$2000 < E^* \leq 4000$	433	28%	100%
	$4000 < E^* \leq 6000$	0	0%	100%
	$6000 < E^* \leq 8000$	0	0%	100%
	$ E^* > 8000$	0	0%	100%



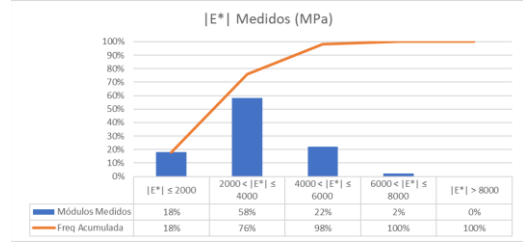
Jan	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	7593	27%	27%
	$2000 < E^* \leq 4000$	11392	41%	68%
	$4000 < E^* \leq 6000$	6175	22%	90%
	$6000 < E^* \leq 8000$	2377	9%	99%
	$ E^* > 8000$	295	1%	100%



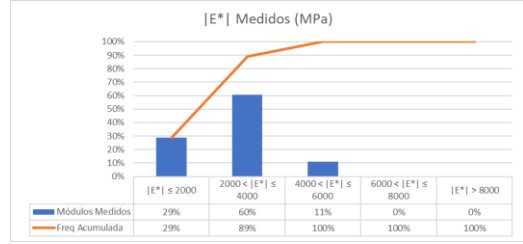
Fev	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	2936	17%	17%
	$2000 < E^* \leq 4000$	9344	55%	72%
	$4000 < E^* \leq 6000$	3984	23%	96%
	$6000 < E^* \leq 8000$	723	4%	100%
	$ E^* > 8000$	0	0%	100%



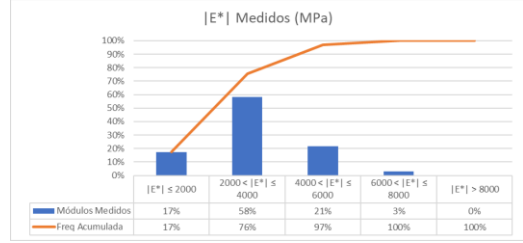
Mar	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	3497	18%	18%
	$2000 < E^* \leq 4000$	11327	58%	76%
	$4000 < E^* \leq 6000$	4267	22%	98%
	$6000 < E^* \leq 8000$	391	2%	100%
	$ E^* > 8000$	0	0%	100%



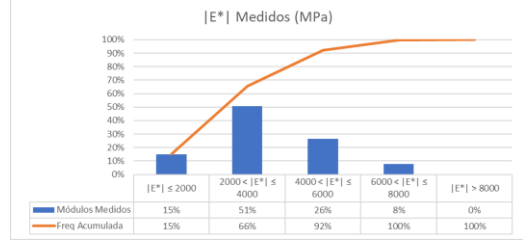
Mai	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	7825	29%	29%
	$2000 < E^* \leq 4000$	16483	60%	89%
	$4000 < E^* \leq 6000$	2944	11%	100%
	$6000 < E^* \leq 8000$	0	0%	100%
	$ E^* > 8000$	0	0%	100%



Jun	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	2255	17%	17%
	$2000 < E^* \leq 4000$	7549	58%	76%
	$4000 < E^* \leq 6000$	2789	21%	97%
	$6000 < E^* \leq 8000$	380	3%	100%
	$ E^* > 8000$	0	0%	100%



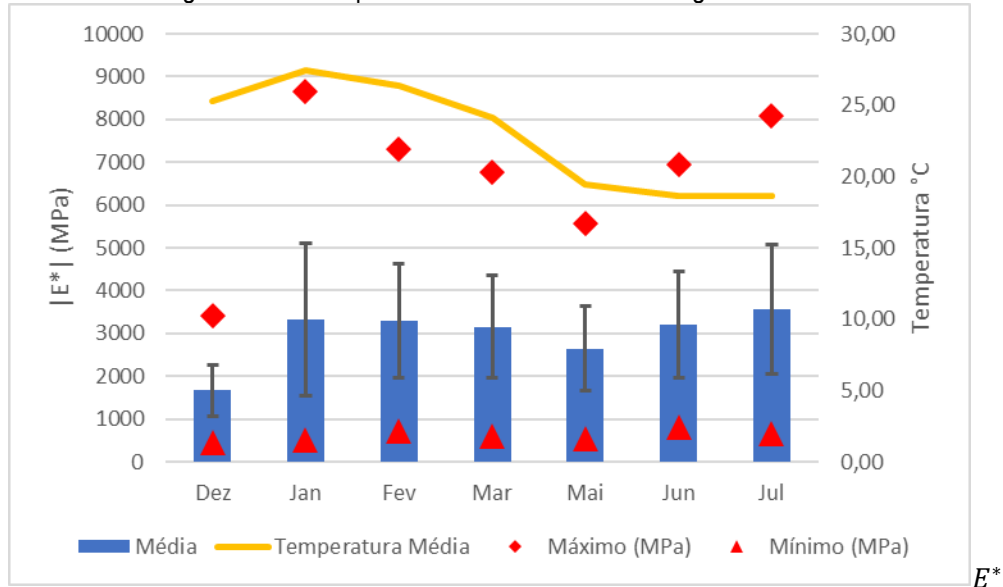
Jul	Bloco (MPa)		Frequência	
	Intervalo	Conteúdo	Porcentagem	Cumulada
	$ E^* \leq 2000$	6143	15%	15%
	$2000 < E^* \leq 4000$	20710	51%	66%
	$4000 < E^* \leq 6000$	10785	26%	92%
	$6000 < E^* \leq 8000$	3183	8%	100%
	$ E^* > 8000$	40	0%	100%



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.21 é apresentado o comportamento estatístico dos módulos dinâmicos calculados ao longo dos meses, apresentando a média dos valores no mês, seu desvio padrão, seu coeficiente de variação, e valores máximos e mínimos.

Figura 4. 21: Comportamento dos Módulos ao longo dos meses.



	Dez	Jan	Fev	Mar	Mai	Jun	Jul
Média (MPa)	1679	3333	3302	3160	2651	3207	3560
Desvio Padrão (MPa)	599	1773	1339	1205	977	1250	1504
Coeficiente de Variação (%)	36%	53%	41%	38%	37%	39%	42%
Máximo (MPa)	3405	8647	7318	6772	5580	6956	8072
Mínimo (MPa)	450	510	719	608	529	805	657

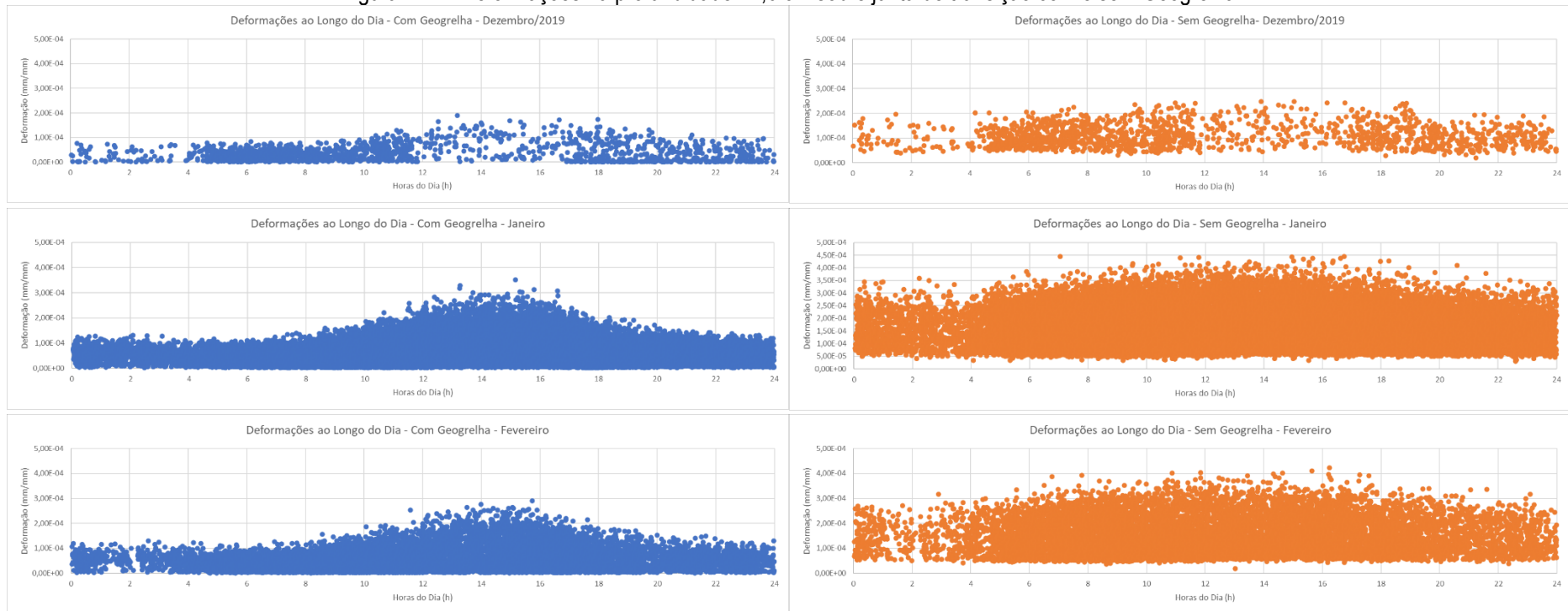
Fonte: Próprio Autor.

Sendo assim, conhecidos os pares de Módulo Dinâmico e Frequência Reduzida que ocorrem na camada asfáltica na profundidade 8,0 cm, torna-se então possível a determinação da curva mestra da mistura asfáltica “*in situ*”, apresentado no Capítulo 5.

4.9 - Medidas de Deformação na profundidade 12,0 cm – Influência da Geogrelha

Na Figura 4.22 estão apresentadas as deformações registradas.

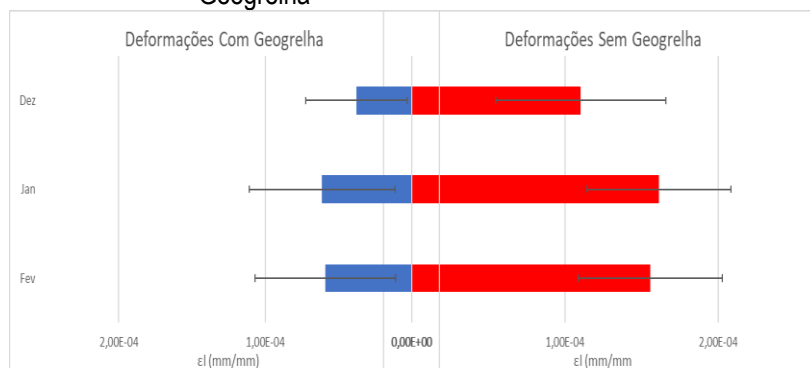
Figura 4. 22: Deformações na profundidade 12,0 cm sobre junta de transição com e sem Geogrelha.



Fonte: Próprio Autor.

A partir destes dados, verificou-se que os registros dos sensores com a ausência da Geogrelha apresentaram variação reduzida, embora com valores maiores nas deformações registradas, enquanto os sensores sobre a junta com a presença de Geogrelha registraram deformações menores, embora com maior dispersão. Ademais, a partir da representação da Figura 4.23 é possível verificar que as deformações registradas na junta apresentaram valores superiores àqueles registrados na junta sobre a Geogrelha.

Figura 4. 23: Comparação dos valores médios das deformações sobre uma junta transversal com e sem Geogrelha



	Dez	Jan	Fev	Dez	Jan	Fev
Média (mm/mm)	3,78E-05	6,13E-05	5,92E-05	1,10E-04	1,61E-04	1,56E-04
Desvio Padrão	3,45E-05	4,98E-05	4,80E-05	4,46E-05	7,45E-05	7,29E-05
Coefficiente de Variação (%)	91%	81%	81%	40%	46%	47%
Máximo (mm/mm)	1,90E-04	3,52E-04	2,90E-04	2,47E-04	4,44E-04	4,23E-04
Mínimo (mm/mm)	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,90E-05	3,00E-05	1,90E-05

Fonte: Próprio Autor.

De posse destes dados torna-se possível a realização de comparação do comportamento mecânico da mistura devido a presença da Geogrelha em sua constituição. Mesmo a Geogrelha sendo utilizada com a função de evitar a ocorrência de trincas devido ao trabalho das juntas de transição e longitudinal, percebe-se que a Geogrelha gerou um ganho estrutural, reduzindo as deformações longitudinais para os mesmos veículos, com a mesma frequência e mesma temperatura.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PÓS-TRATAMENTO

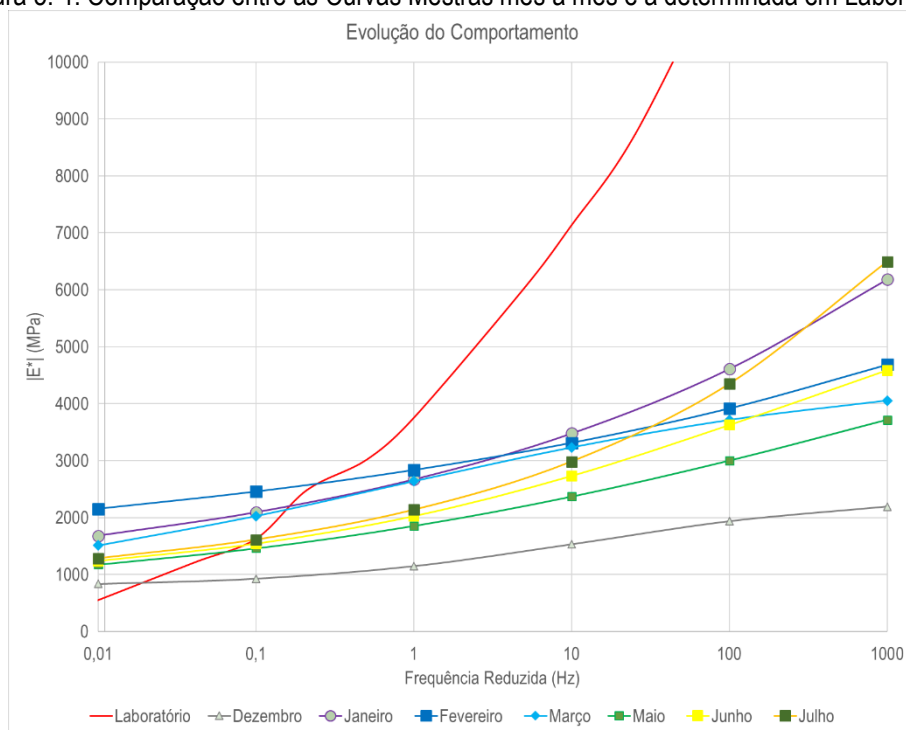
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos após a coleta e tratamento dos resultados obtidos por meio da utilização dos sensores da instrumentação. Para isto, neste capítulo foi realizada a regressão não linear dos resultados com ajuste dos Módulos Dinâmicos (E^*) para as combinações de E^* e frequência reduzida medidos, por meio do modelo sigmoidal proposto pela norma DNIT 416/2019, e, por fim, a avaliação da resposta da camada asfáltica devido a aplicação da Geogrelha sobre a junta transversal.

5.1 – Determinação das Curvas mestras “*in situ*”

Com as frequências reduzidas para a temperatura de referência de 20°C e os módulos ajustados para os dados obtidos por mês, foram realizadas as regressões não-lineares, utilizando o *software* STATISTICA e o modelo sigmoidal já apresentado para a determinação das curvas mestras “*in situ*” para cada mês de levantamento de dados. Os resultados estão apresentados nas Figuras A3.1 a A3.7, presentes no Apêndice 3. A temperatura de referência adotada foi 20°C, idêntica a utilizada no ensaio de Módulo Dinâmico realizado para a camada de binder instrumentada.

Na Figura 5.1 estão apresentadas todas as curvas obtidas pelos dados de monitoramento, bem como a curva determinada em laboratório pelo ensaio de módulo dinâmico, em que se percebe diferenças nos valores das curvas para discretizar o comportamento da camada asfáltica.

Figura 5. 1: Comparação entre as Curvas Mestras mês a mês e a determinada em Laboratório



Fonte: Próprio Autor.

Com relação a realização da regressão não-linear é importante destacar que foi feita a consideração do valor inicial para o parâmetro $\delta = \log(|E_{min}^*|)$, que auxiliou na conversão das curvas, como também a utilização da unidade dos módulos em kPa, realizando ajustes melhores para as curvas que as regressões realizadas com os valores de $|E^*|$ em MPa.

As contribuições dos pontos obtidos para a determinação da curva mestra variaram no eixo das abscissas, devido aos deslocamentos realizados pelo fator de ajuste, de forma a, utilizando o princípio da superposição tempo-temperatura, as curvas fossem ser construídas para uma temperatura de referência de 20°C.

Outro fator relevante é a dispersão dos pontos, onde os resultados indicam combinações de frequência e módulos medidos “*in situ*”, comportamento diferente do submetido ao corpo de prova durante o ensaio de módulo dinâmico em Laboratório. Esta dispersão reflete na perda da relação linear entre a equação de ajuste e os valores medidos em campo, com quadrados dos resíduos médios.

Foi possível verificar que o comportamento da camada asfáltica para os meses de verão, janeiro, fevereiro e março, graficamente, apresenta comportamento semelhante, inclusive com o ponto de inflexão da curva próximo da mesma frequência reduzida. Este comportamento não foi verificado no mês de dezembro, muito provavelmente pela pouca quantidade de registros realizados no mês, aproximadamente 10% dos valores dos outros meses. O comportamento dos meses de inverno, de maio, junho e julho também apresentaram comportamento aproximado graficamente, contudo, a curva do mês de julho é superior à do mês de junho e de junho superior a de maio, ilustrando um comportamento de ganho de valores aos módulos da estrutura ao passar dos meses.

Nas Tabelas 5.1 a 5.7 são apresentados os fatores δ , α , β e γ , obtidos por meio das regressões não-lineares, como também os resultados da estimação e o valor da correlação linear obtida no ajuste.

Tabela 5. 1: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para dezembro

$R^2 = 0,46$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,65	0,005	1241,487	0,00
$\alpha =$	6,01	31,240	0,19270	0,84
$\beta =$	2,15	5,948	0,362	0,71
$\gamma =$	-0,05	0,031	-1,850	0,06

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 2: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para janeiro

$R^2 = 0,44$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,71	0,001	4228,505	0,00
$\alpha =$	7,24	10,532	0,687	0,49
$\beta =$	1,99	1,697	1,174	0,24
$\gamma =$	-0,04	0,007	-5,709	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 3: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para fevereiro

$R^2 = 0,50$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,70	0,001	4417,031	0,00
$\alpha =$	16,79	76,310	0,220	0,83
$\beta =$	3,06	4,912	0,622	0,53
$\gamma =$	-0,04	0,009	-5,033	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 4: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para março

 $R^2 = 0,59$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,78	0,001	5714,530	0,00
$\alpha =$	9,54	14,431	0,661	0,51
$\beta =$	2,48	1,696	1,462	0,14
$\gamma =$	-0,05	0,007	-8,182	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 5: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para maio

 $R^2 = 0,63$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,72	0,001	7129,199	0,00
$\alpha =$	7,61	6,902	1,103	0,27
$\beta =$	2,44	1,014	2,402	0,02
$\gamma =$	-0,07	0,007	-10,990	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 6: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para junho

 $R^2 = 0,64$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,91	0,001	4966,008	0,00
$\alpha =$	8,37	11,285	0,742	0,46
$\beta =$	2,81	1,467	1,918	0,06
$\gamma =$	-0,10	0,010	-9,773	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. 7: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para julho

 $R^2 = 0,65$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	5,82	0,001	7857,811	0,00
$\alpha =$	15,69	20,151	0,779	0,44
$\beta =$	3,23	1,381	2,342	0,02
$\gamma =$	-0,09	0,006	-15,628	0,00

Fonte: Próprio autor.

De forma a compreender o comportamento da camada asfáltica instrumentada e comparar os valores obtidos mês a mês, foram obtidos os fatores δ , α , β e γ , determinados na regressão não-linear de determinação da curva mestra, e determinados o menor valor de módulo da curva mestra (10^δ - pode ser relacionado a um aumento na "amplitude" ou "intensidade" do fenômeno que das curvas), o valor máximo do módulo da curva mestra ($10^{\delta + \alpha}$) e os fatores de forma da função sigmoidal β e γ , β determinam a posição horizontal de inflexão da curva (o que permitiu com que a curva ficasse mais íngreme em torno da Fr) e γ determinou a máxima inclinação da curva (deslocando a curva horizontalmente) (Mateos e Soares, 2015).

Os valores dos fatores de ajuste e seus respectivos índices são apresentados na Tabela 5.8.

A análise dos dados indica que existe diferença entre a abrangência dos valores estimados para os módulos dinâmicos pelo modelo sigmoidal e os módulos medidos em campo pelos sensores. Comportamento esperado devido a dispersão dos dados de levantamento “*in situ*” espelham a realidade, enquanto o modelo sigmoidal tenta discretizar o comportamento da camada asfáltica submetida a esforços dentro do regime elástico do material. Tanto que o ensaio foi realizado com deformações controladas entre 50 e 75 micra, enquanto que na realidade, calculando-se a média das deformações registradas no trecho instrumentado, foram obtidos valores de deformação média de aproximadamente 400 micra, valores 6 a 8 vezes maiores que aqueles estabelecidos no ensaio de módulo dinâmico que garantem o comportamento do material dentro dos limites da linearidade.

Tabela 5. 8: Fatores de ajuste das regressões das curvas mestras, estimação do comportamento da camada pelo modelo sigmoidal e comportamento dos valores de campo.

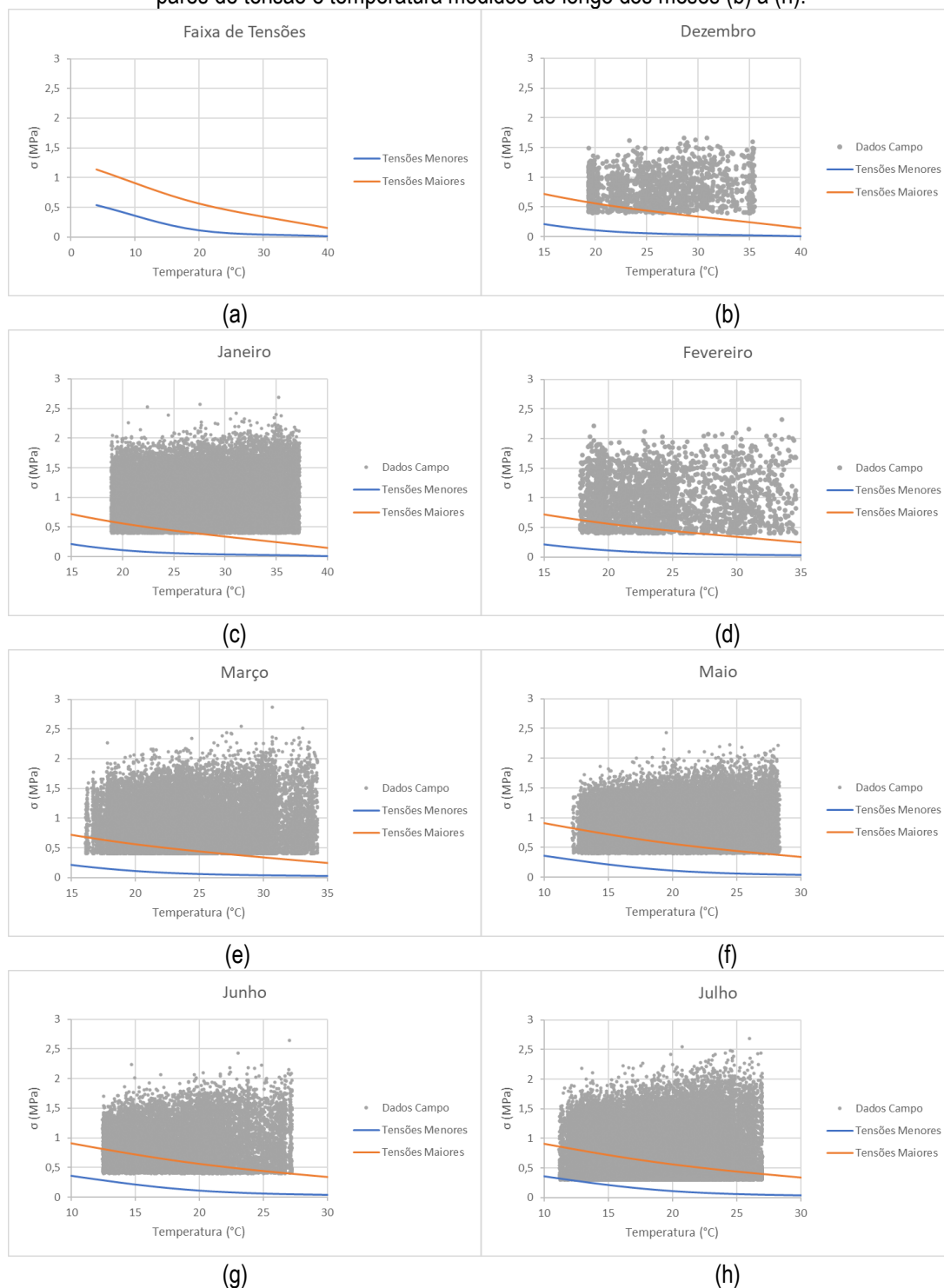
	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Mai	Junho	Julho
$\delta =$	5,65	5,71	5,70	5,78	5,72	5,91	5,82
$\alpha =$	6,02	7,24	16,79	9,54	7,61	8,37	15,69
$\beta =$	2,16	1,99	3,06	2,48	2,44	2,81	3,23
$\gamma =$	-0,06	-0,04	-0,04	-0,05	-0,07	-0,10	-0,09
Média (MPa)	1679	3333	3302	3160	2651	3207	3560
Desv Pad (MPa)	599	1773	1339	1205	977	1250	1504
CV (%)	36%	53%	41%	38%	37%	39%	42%
Vir Máx (MPa)	3405	8647	7318	6772	5580	6956	8072
Vir Mín (MPa)	450	510	719	608	529	805	657

Fonte: Próprio Autor.

No ensaio de módulo dinâmico existe a subtração das deformações plásticas pelos transdutores por meio de uma taxa de acumulação de deformação plástica (D_j), este ajuste se faz necessário para se garantir que os limites do ensaio estejam dentro do visco-elástico linear, algo que não é possível de espelhar com os levantamentos realizados pela instrumentação, pois não se consegue, nas deformações medidas, especificar qual parcela é contribuição da fase elástica, da fase viscosa ou da fase plástica, nem sequer se pode garantir que se está trabalhando em sua fase linear.

Quando realizada a verificação de tensão e temperatura registradas pelos sensores, apresentados na Figura 5.2, fica evidente que parte das leituras foram registradas fora da faixa de tensão e deformação que se espera no comportamento em regime linear, preconizado no ensaio em laboratório.

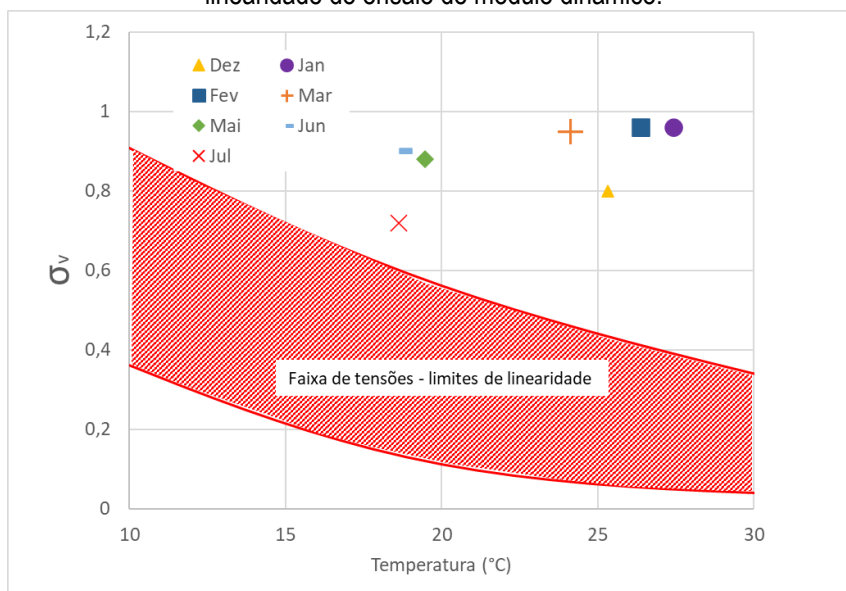
Figura 5. 2: Faixas de combinações de tensão e temperatura do ensaio de Módulo Dinâmico (a) e os pares de tensão e temperatura medidos ao longo dos meses (b) a (h).



Fonte: Próprio Autor.

De maneira a simplificar a grande quantidade de pontos, como também suas dispersões, foi elaborada a Figura 5.3, que apresenta a faixa de tensões dos limites de linearidade, realizadas no ensaio, e a média dos valores dos pares tensão e temperatura dos meses da instrumentação.

Figura 5. 3: Média dos pares de tensão e deformação ao longo dos meses e a faixa dos limites de linearidade do ensaio de módulo dinâmico.



Fonte: Próprio autor.

Conforme pode-se verificar, as faixas de tensão aplicadas no ensaio de módulo dinâmico para que deformações fiquem entre 50 a 75 micras não englobam a maioria das tensões atuantes pelo tráfego real. Enquanto o ensaio de módulo dinâmico objetiva estabelecer o comportamento da mistura asfáltica no regime visco-elástico, as cargas reais nos demonstram um comportamento visco-elasto-plástico, próprio da mistura asfáltica

5.1.1 – Tratamento dos dados de levantamento

De forma a melhorar o ajuste das Curvas Mestras, foi realizado tratamento dos dados brutos antes da regressão não-linear dos dados, adotando como amostragem para as regressões os valores compreendidos na faixa de média + desvio e média – desvio. Tentou-se eliminar os dados espúrios e conhecer o comportamento das Curvas de Módulos Dinâmicos frente a uma filtragem dos dados.

Nas Figuras 5.4 a 5.10 estão apresentados os resultados das regressões realizadas com os dados brutos da instrumentação filtrados.

O tratamento ocorreu primeiro com os módulos, selecionando os dados que se encontram entre os valores de média \pm desvio padrão, e em sequência com a filtragem das frequências reduzidas, utilizando-se as frequências que apresentavam valores dentro da faixa de média \pm desvio padrão.

Nas figuras 5.4 a 5.10 são apresentados os dados brutos, os dados com a correção da frequência para a temperatura de referência de 20°C, as distribuições normais dos dados antes e depois da filtragem e os ajustes realizados com a utilização do software STATIATICA.

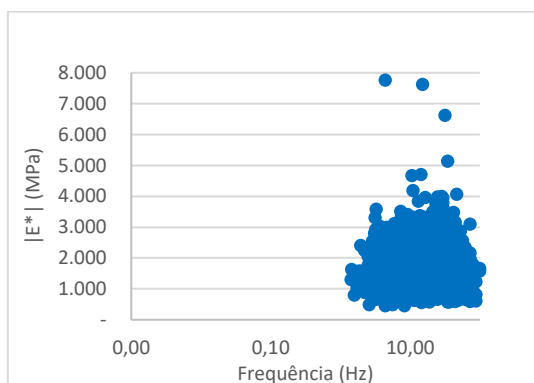
Embora seja possível observar uma melhora nas distribuições normais com a realização do tratamento, o ajuste da curva apresentou correlações menos consistentes com a utilização dos dados filtrados.

Isto decorre devido a limitação dos dados utilizados na amostra da regressão. Quando adotada uma faixa de valores para tratar os dados espúrios, o modelo matemático não conseguiu ajustar o

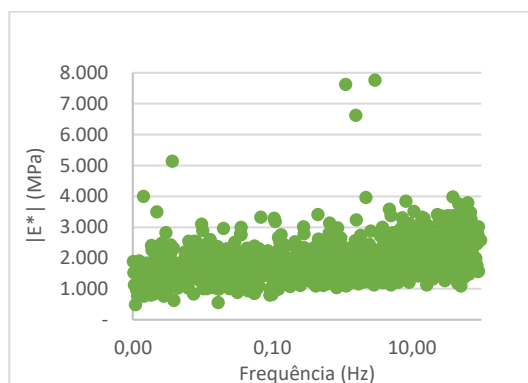
comportamento da camada asfáltica de maneira a melhorar a representatividade do modelo sigmoidal para a Curva Mestra.

Ademais, percebe-se que a perda de representatividade do modelo se acentua com a realização da filtragem das frequências, embora também tenha ocorrido de forma acentuada com a filtragem dos módulos no mês de Junho.

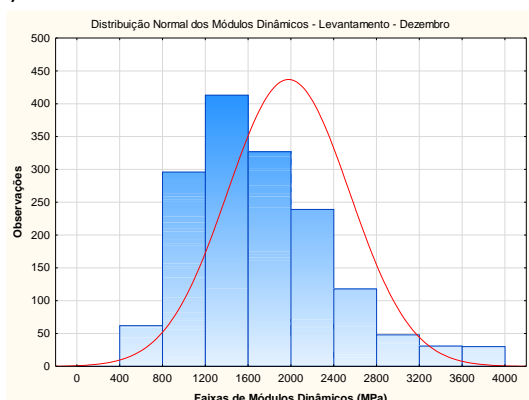
Figura 5. 4 Filtragem dos dados do mês de Dezembro e regressão não-linear



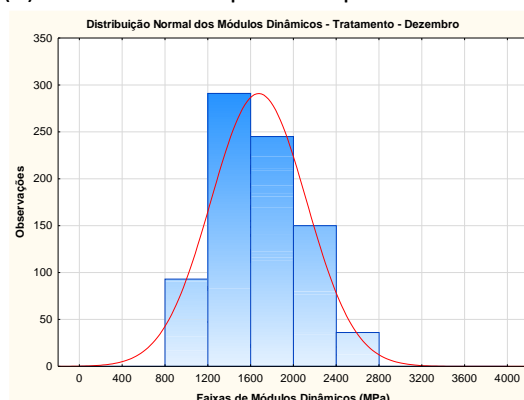
(a) Dados brutos do levantamento



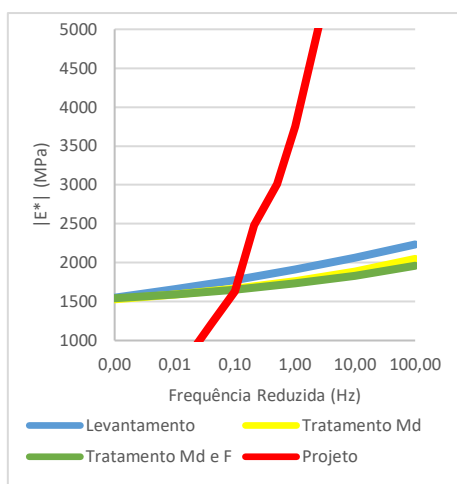
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

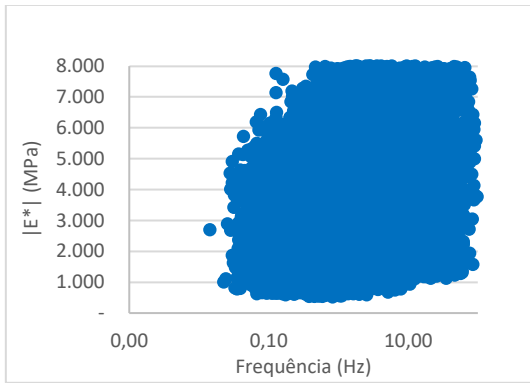


(e) Resultados das Curvas Mestras - Dezembro

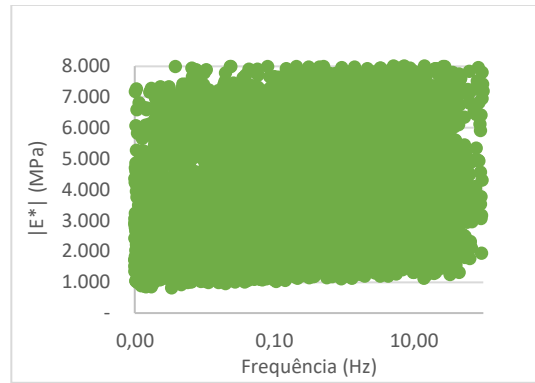
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,65	6,11	6,13
$\alpha =$	6,01	21,50	1,32
$\beta =$	2,15	5,04	2,42
$\gamma =$	-0,05	-0,19	-0,22
$R^2 =$	0,46	0,49	0,29
Média	1679	1686	1676
Desvio Padrão	599	417	394
Valor Máximo	3405	2606	2606
Valor Mínimo	450	1024	1024

Fonte: Próprio Autor.

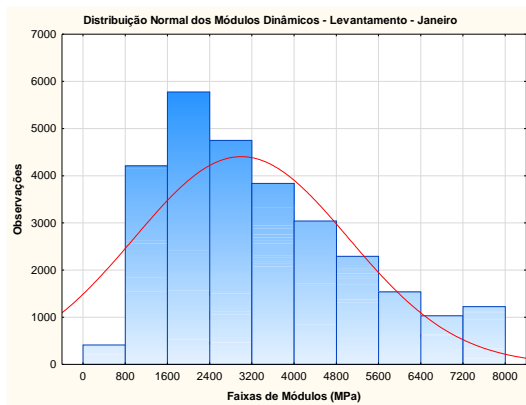
Figura 5. 5 Filtragem dos dados do mês de Janeiro e regressão não-linear



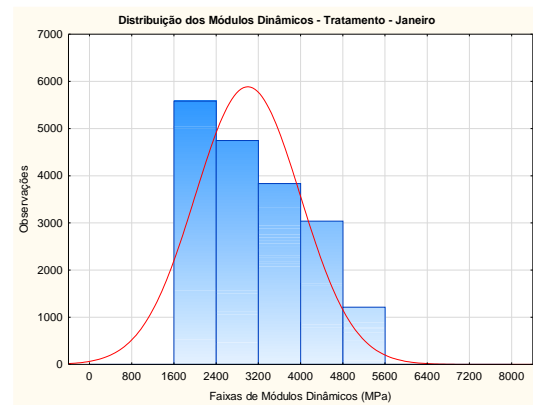
(a) Dados brutos do levantamento



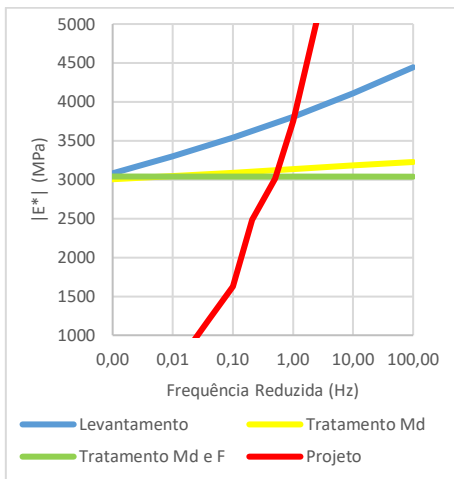
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

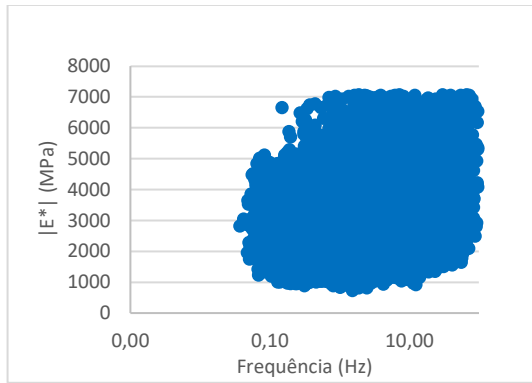


(e) Resultados das Curvas Mestras - Janeiro

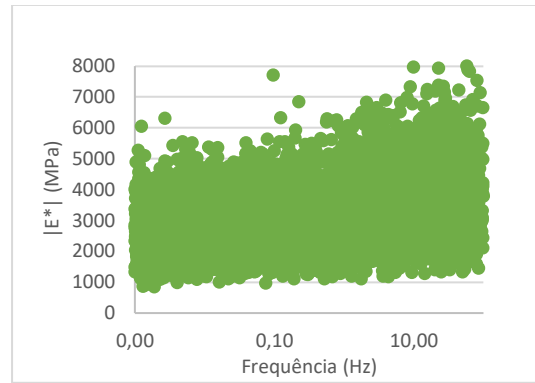
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,71	6,25	6,48
$\alpha =$	7,24	0,78	-0,02
$\beta =$	1,99	0,79	8,48
$\gamma =$	-0,04	-0,04	-2,30
$R^2 =$	0,44	0,18	0,05
Média	3333	3125	3125
Desvio Padrão	1773	998	998
Valor Máximo	8647	5187	5187
Valor Mínimo	510	1625	1625

Fonte: Próprio Autor.

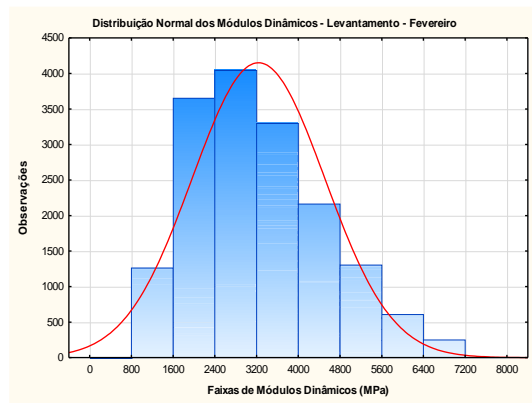
Figura 5. 6: Filtragem dos dados do mês de Fevereiro e regressão não-linear



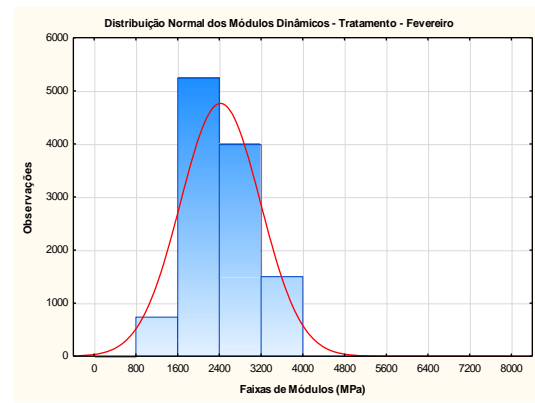
(a) Dados brutos do levantamento



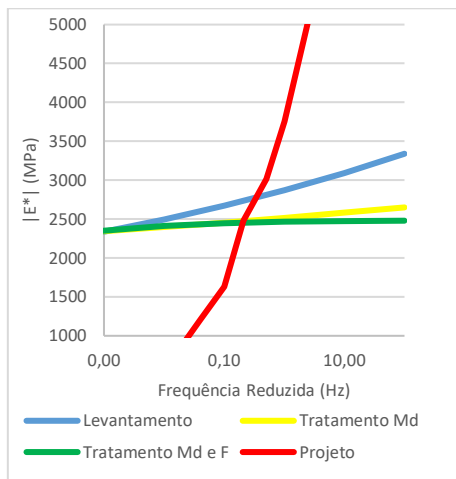
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

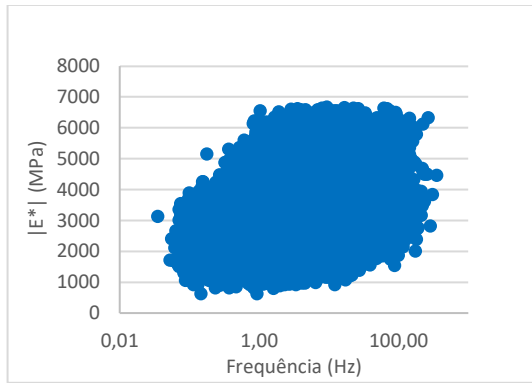


(e) Resultados das Curvas Mestras - Fevereiro

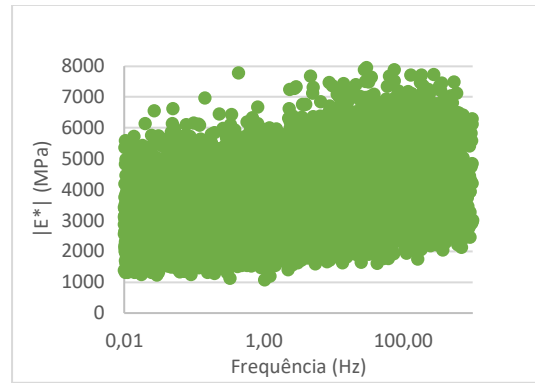
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,70	6,31	6,34
$\alpha =$	16,79	0,21	0,05
$\beta =$	3,06	0,27	-2,92
$\gamma =$	-0,04	-0,21	-0,91
$R^2 =$	0,50	0,28	0,16
Média	3302	2422	2422
Desvio Padrão	1339	591	591
Valor Máximo	7318	3661	3661
Valor Mínimo	719	1482	1482

Fonte: Próprio Autor.

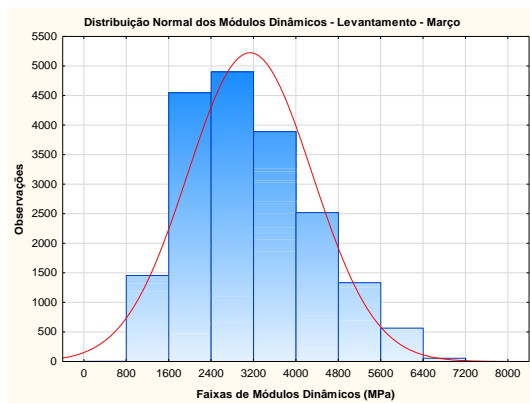
Figura 5. 7: Filtragem dos dados do mês de Março e regressão não-linear



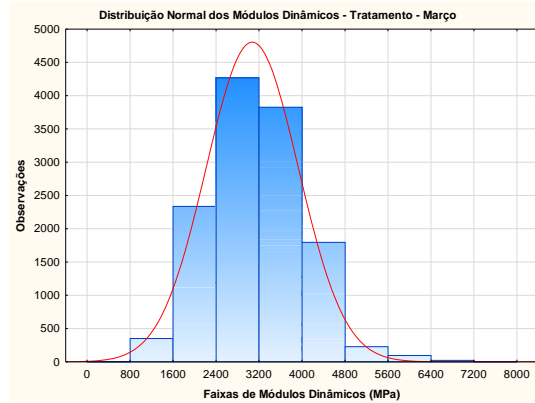
(a) Dados brutos do levantamento



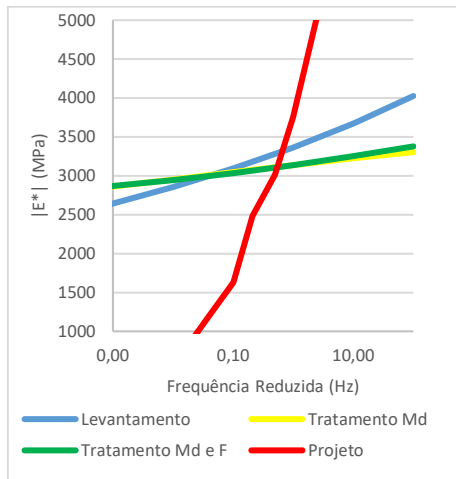
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

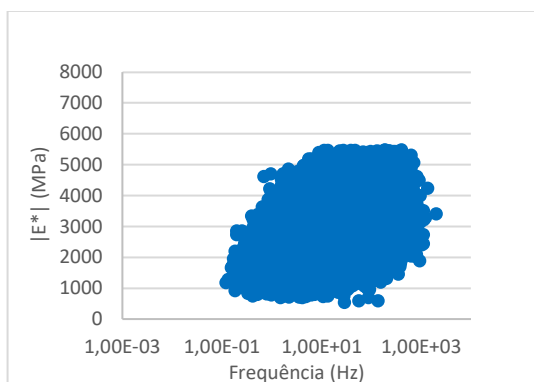


(e) Resultados das Curvas Mestras – Março

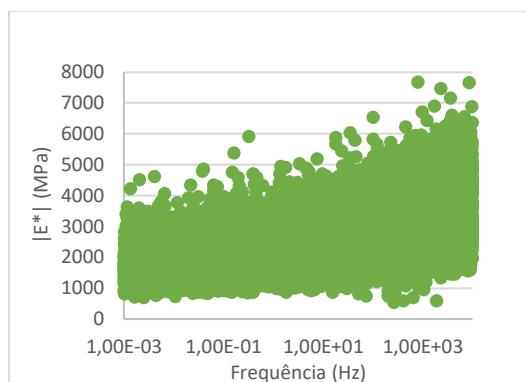
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,78	6,40	6,62
$\alpha =$	9,54	0,15	-0,20
$\beta =$	2,48	-0,48	-0,47
$\gamma =$	-0,05	-0,35	0,32
$R^2 =$	0,59	0,33	0,20
Média	3160	3060	3086
Desvio Padrão	1205	671	673
Valor Máximo	6722	4414	4414
Valor Mínimo	608	1975	1976

Fonte: Próprio Autor.

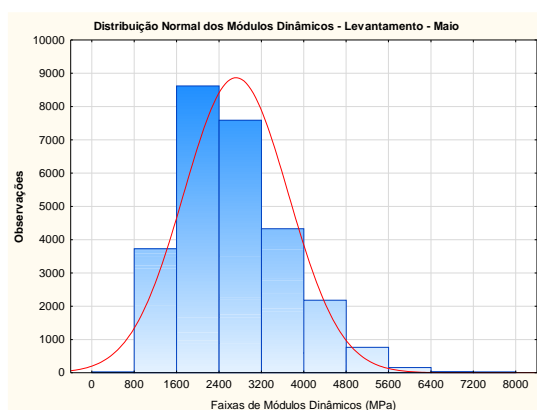
Figura 5. 8: Filtragem dos dados do mês de Maio e regressão não-linear



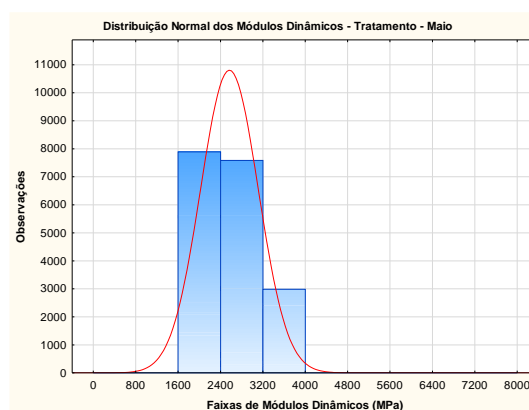
(a) Dados brutos do levantamento



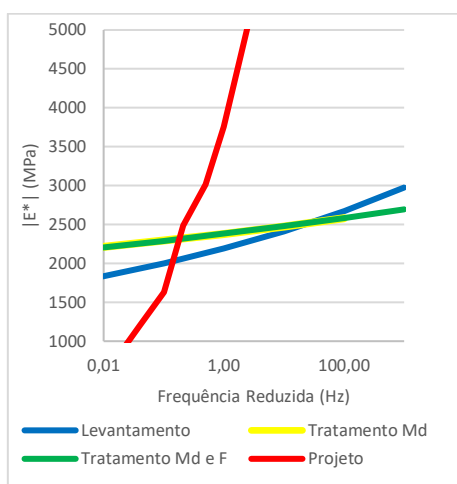
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

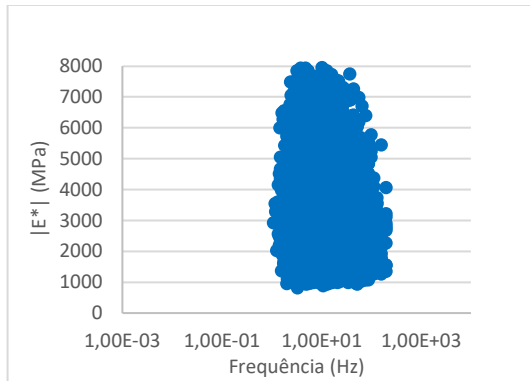


(e) Resultados das Curvas Mestras - Maio

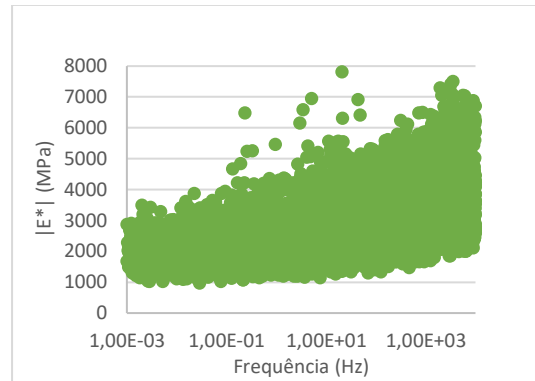
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,72	6,22	6,62
$\alpha =$	7,61	0,54	-0,42
$\beta =$	2,44	0,92	-0,36
$\gamma =$	-0,07	-0,15	0,17
$R^2 =$	0,63	0,44	0,25
Média	2651	2569	2576
Desvio Padrão	977	545	541
Valor Máximo	5580	3701	3701
Valor Mínimo	529	1681	1681

Fonte: Próprio Autor.

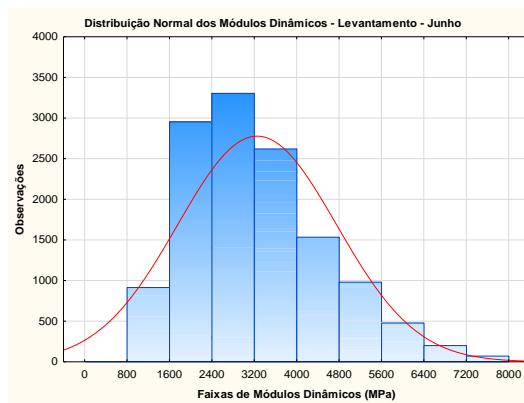
Figura 5. 9: Filtragem dos dados do mês de Junho e regressão não-linear



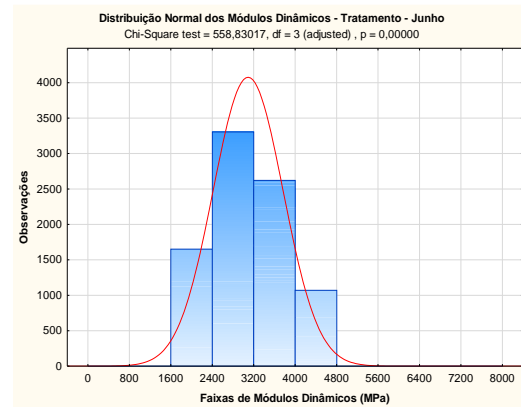
(a) Dados brutos do levantamento



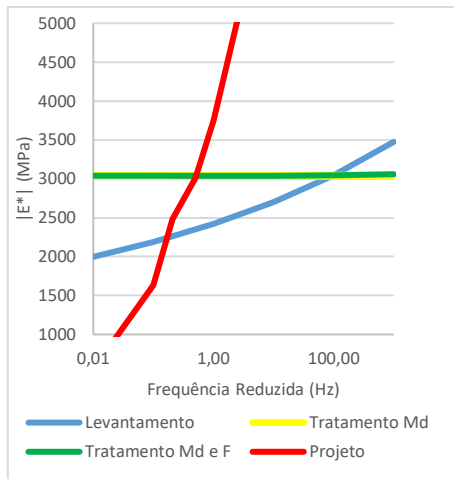
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem

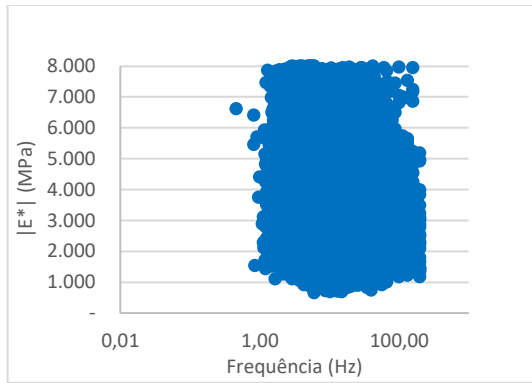


(e) Resultados das Curvas Mestras – Junho

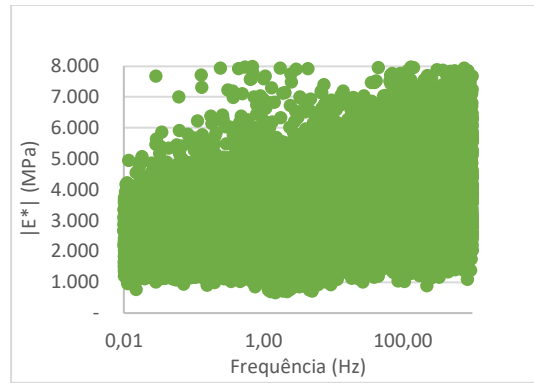
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,91	6,48	6,48
$\alpha =$	8,37	-0,02	0,02
$\beta =$	2,81	8,49	8,48
$\gamma =$	-0,10	2,30	-2,30
$R^2 =$	0,64	0,05	0,05
Média	3207	3092	3093
Desvio Padrão	1250	676	666
Valor Máximo	6956	4504	4504
Valor Mínimo	805	1987	1987

Fonte: Próprio Autor.

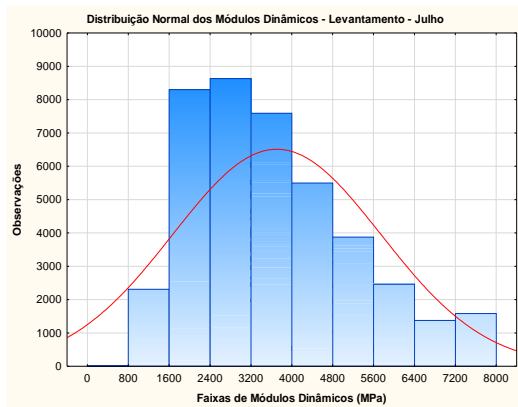
Figura 5. 10: Filtragem dos dados do mês de Julho e regressão não-linear



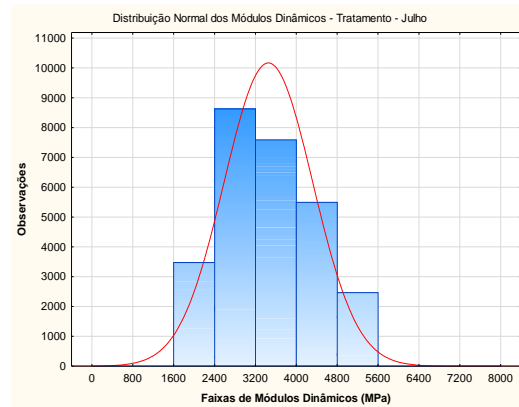
(a) Dados brutos do levantamento



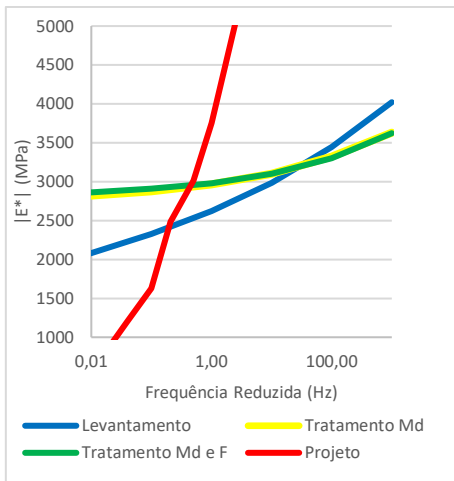
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem



(e) Resultados das Curvas Mestras - Julho

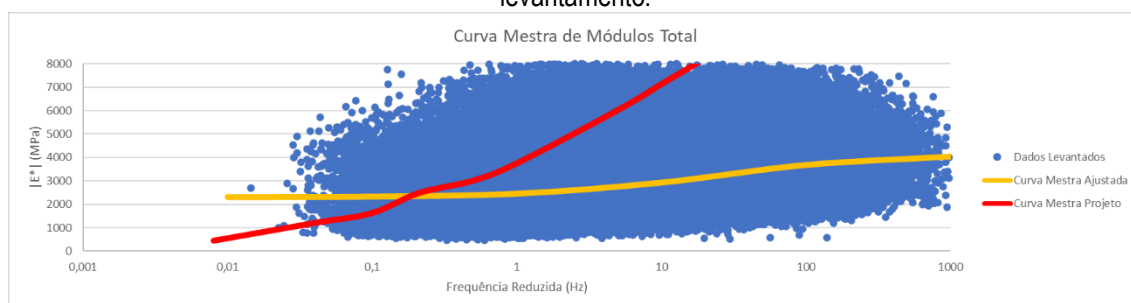
	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	5,82	6,73	6,45
$\alpha =$	15,69	-0,29	1,10
$\beta =$	3,23	-2,12	3,63
$\gamma =$	-0,09	0,58	-0,49
$R^2 =$	0,65	0,50	0,34
Média	3560	3.455	3.403
Desvio Padrão	1504	868	837
Valor Máximo	8072	5.267	5.267
Valor Mínimo	657	2.097	2.097

Fonte: Próprio Autor.

5.2 - Obtenção da Curva Mestre para todo o Período Instrumentado

Conhecendo o comportamento da mistura mês a mês, determinou-se o modelo sigmoidal do comportamento de todo o período de levantamento. Desta forma, condensou-se todos os dados registrados para a determinação de uma única curva mestra para os dados registrados “*in situ*”. Na Figura 5.11 está apresentada a definição da curva mestra ajustada pelo STATISTICA ao modelo sigmoide e o comparado a curva mestra determinada em laboratório para uma frequência reduzida na temperatura referência de 20°C.

Figura 5. 11: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestre para todo o período de levantamento.



Fonte: Próprio Autor.

Pela dispersão dos pontos é possível indicar que os módulos estimados em laboratório não representam a tendência do comportamento da camada asfáltica. Quando da regressão foram determinados os fatores δ , α , β e γ da curva mestra, que estão apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5. 9: Determinação dos fatores de ajuste da curva mestra para todo o período de levantamento.

$R^2 = 0,49$

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	p-value
$\delta =$	6,27	0,005	1377,659	0,00
$\alpha =$	1,43	0,323	4,418	0,00
$\beta =$	1,96	0,228	8,591	0,00
$\gamma =$	-0,21	0,012	-16,780	0,00

Fonte: Próprio Autor.

Comparando os valores dos fatores de ajuste da curva mestra determinada “*in situ*” e a determinada em laboratório, conforme apresentado na Tabela 5.10, verifica-se que existem diferenças entre as duas curvas mestras. Esta diferença tem influência direta no dimensionamento de um pavimento, por exemplo, quando a curva mestra é adotada para representar o comportamento da mistura asfáltica que será solicitada pelo tráfego.

Tabela 5. 10: Comparação dos fatores de ajuste das curvas mestras “*in situ*” e laboratório.

	“ <i>in situ</i> ”	Laboratório
$\delta =$	6,27	2,65
$\alpha =$	1,43	4,76
$\beta =$	1,96	1,60
$\gamma =$	-0,21	0,50

Fonte: Próprio Autor.

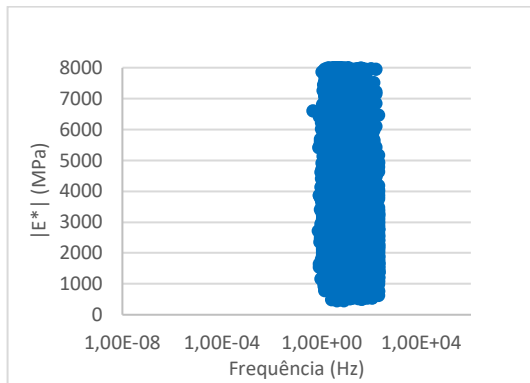
Quando comparados os dois parâmetros verificou-se que a curva “*in situ*” parte de valores de módulo superiores que os valores de módulo determinados em laboratório, $\delta_{in\ situ} > \delta_{lab}$, isto é, o módulo mínimo “*in situ*” é menor que o estimado em laboratório. Também se observou que a variação dos valores dos módulos de laboratório em função da frequência reduzida é maior, $\alpha_{in\ situ} < \alpha_{lab}$, isto é, há uma maior variação do módulo dentro do espectro das frequências reduzidas em laboratório do que “*in situ*”. Este comportamento é apresentado na Figura 5.14, demonstrando a tendência “*in situ*” de pouca variação do módulo em função da frequência, comparando-se ao comportamento da curva de laboratório. Este comportamento pode ser atribuído ao comportamento da camada instrumentada não estar no regime visco-elástico-linear, que é premissa na definição do módulo dinâmico em laboratório.

5.2.1 – Tratamento dos Dados da Curva de Todo o Período Instrumentado

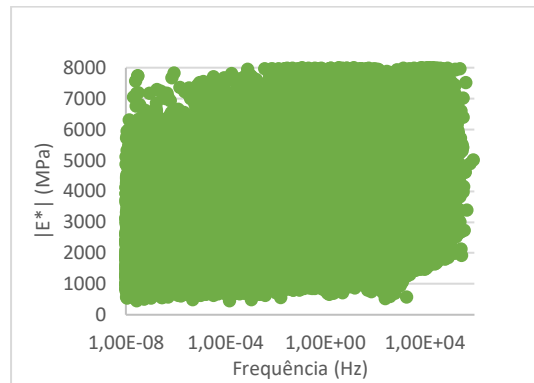
Foi realizado também uma filtragem dos módulos e da frequência reduzida para os dados como um todo, de forma a verificar a possibilidade de melhorar o ajuste do modelo sigmoidal para o comportamento da Curva Mestre. Conforme apresentado na Figura 5.12, que apresenta o levantamento bruto completo, o ajuste para a frequência reduzida, ajustando os dados a temperatura de referência de 20°C, são apresentadas as distribuições normais dos dados antes da filtragem e após a filtragem, demonstrando como os dados se ajustam a uma distribuição normal, sendo apresentado em seguida os ajustes das regressões para o modelo sigmoidal.

De acordo com os resultados dos ajustes realizados, ocorre uma perda de qualidade na regressão quando da utilização dos dados filtrados, decorrente da perda de dados ocorrida com a filtragem. Os dados demonstram que houve uma linearização das curvas, afastando-as do comportamento da curva de projeto, conforme pode-se visualizar na Figura 5.12 (e).

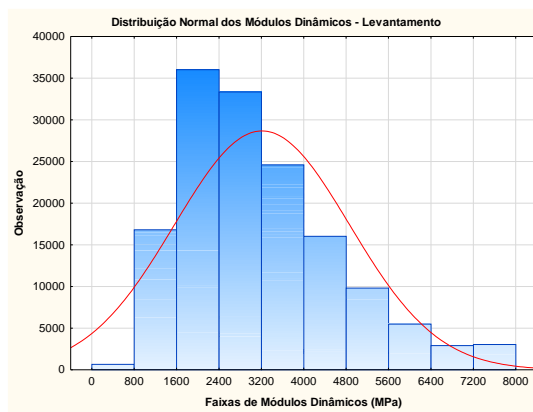
Figura 5. 12: Filtragem dos dados do mês de Todo o Período e regressão não-linear



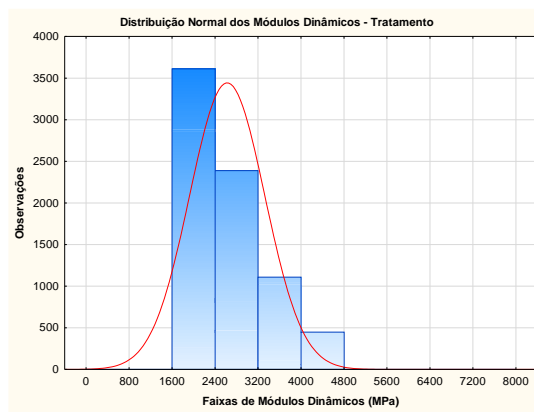
(a) Dados brutos do levantamento



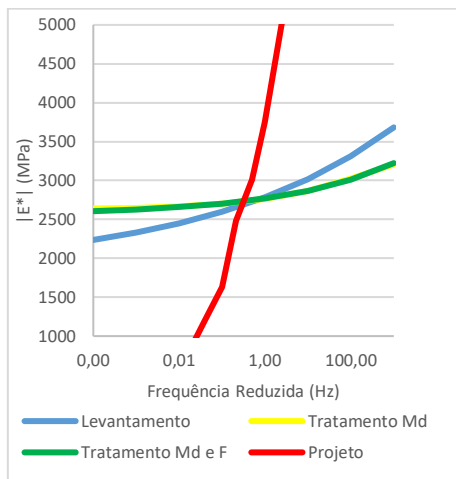
(b) Dados tratados para Temp. Ref. 20°C.



(c) Distribuição Normal do Levantamento



(d) Distribuição Normal após Filtragem



(e) Resultados das Curvas Mestras – Todo o Período

	Levantamento	Tratamento Módulo	Tratamento Módulo e Frequência
$\delta =$	6,27	6,42	6,41
$\alpha =$	1,43	0,15	1,45
$\beta =$	1,96	1,81	3,76
$\gamma =$	-0,21	-0,69	-0,38
$R^2 =$	0,49	0,33	0,22
Média	3.212	2.972	2.918
Desvio Padrão	1.934	776	758
Valor Máximo	8647	4.622	4.622
Valor Mínimo	450	1.764	1.764

Fonte: Próprio Autor.

5.3 - Determinação da temperatura de referência para mesmo módulo na Fr de 10Hz

No dimensionamento de pavimentos, é comum a utilização da frequência de 1 Hz como referência para a determinação do módulo dinâmico que representará a camada, entretanto já existem estudos que propõem a utilização de frequências de 10Hz para este fim. Uma vez que em campo encontra-se um comportamento médio dos veículos para uma frequência de 10Hz, buscou-se deslocar a curva mestra determinada em laboratório para aquela determinada “*in situ*” na frequência de 10 Hz, para isso foi necessária a determinação de uma nova temperatura de referência para a curva mestra.

Uma vez que os parâmetros a_1 , a_2 e a_3 , da curva de ajuste do fator de transferências representa os fatores de uma parábola, que juntos formam uma superfície de fatores de ajuste, determinou-se esta superfície usando como dados de entrada os fatores de ajuste para as três temperaturas consideradas no ensaio de laboratório, conforme ilustrado na Figura 5.15.

De posse desta superfície, foi utilizado o *software* LabFit para a determinação da melhor superfície de ajuste aos pontos, sendo identificada a equação de ajuste (Equação 37) como aquela que melhor representa a superfície procurada. A superfície está representada na Figura 5.13.

$$\log a_T = 0,5909xTR^{0,615} - 0,5488xT^{0,636} \quad \text{Equação 37}$$

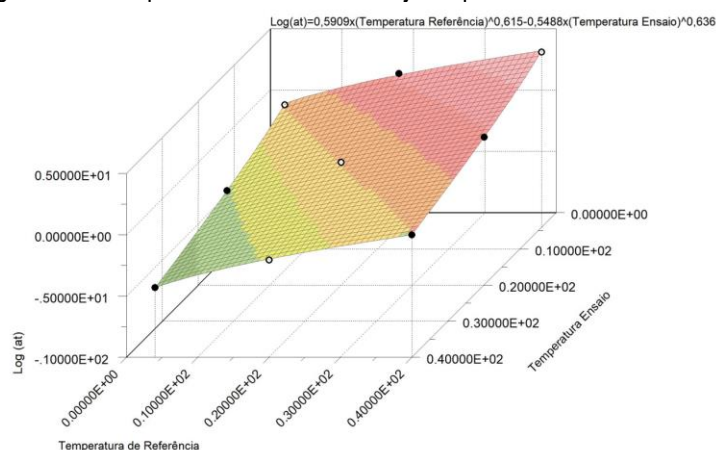
Sendo:

at – Fator de ajuste

TR – Temperatura de referência (°C)

T - Temperatura do registro (°C)

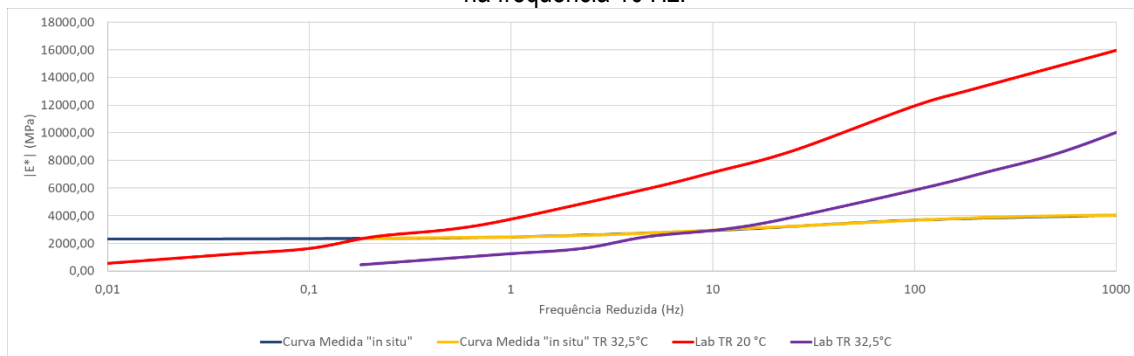
Figura 5. 13: Superfície dos fatores de ajuste para a mistura estudada.



Fonte: Próprio Autor.

Desta maneira, pode-se determinar que, deslocando a curva de laboratório para uma Temperatura de Referência de 32,5°C, a curva mestra determinada “*in situ*” cruza a curva mestra determinada em laboratório, que representariam módulos dinâmicos idênticos nesta frequência, conforme ilustrado na Figura 5.14

Figura 5. 14: Deslocamento da curva de laboratório para a determinada "in situ" para módulos idênticos na frequência 10 Hz.

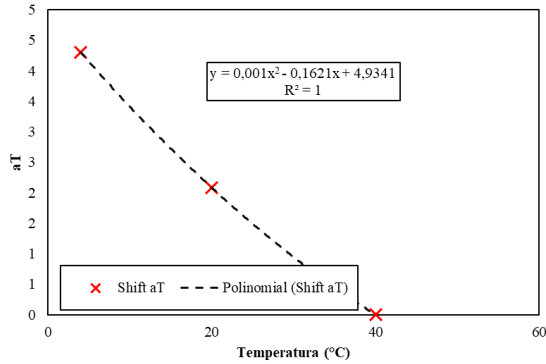
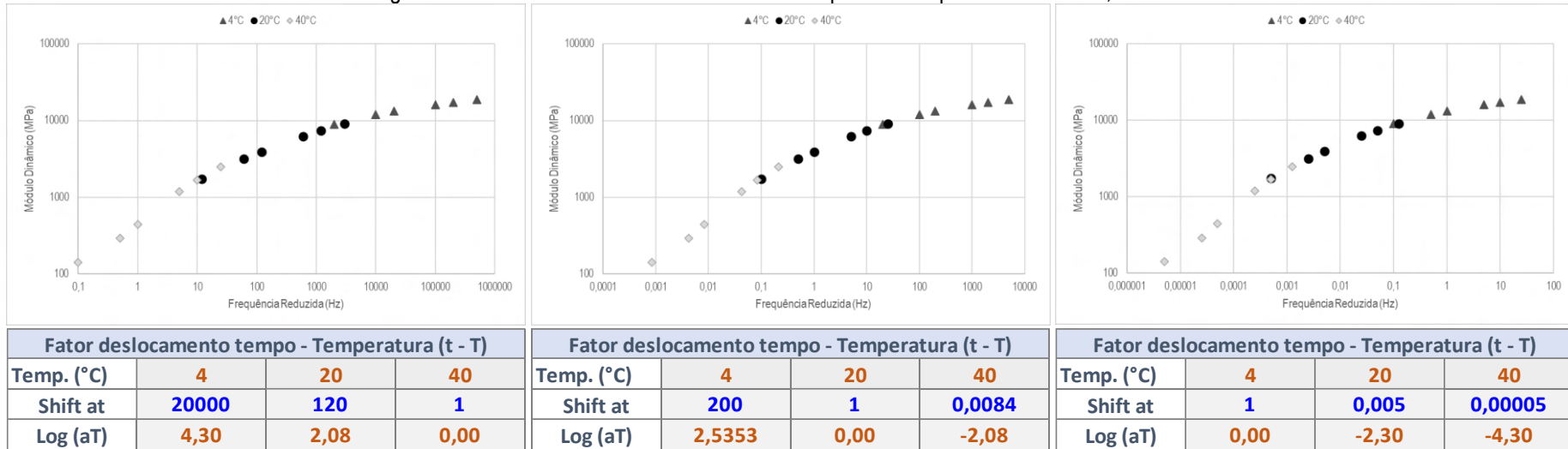


Fonte: Próprio Autor.

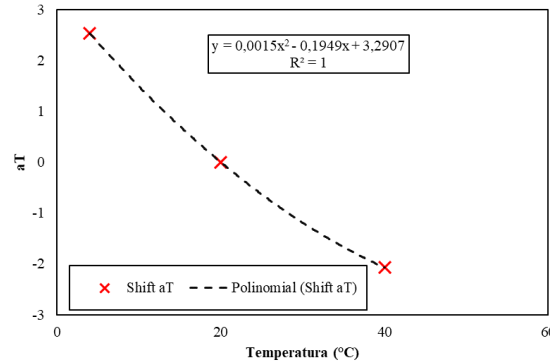
Portanto, conhecida a curva mestra "in situ", é possível estimar que para uma Temperatura de Referência de 32,5°C a curva mestra determinada em laboratório apresenta o mesmo valor de módulo dinâmico, o que representaria, para critério de dimensionamento, módulos idênticos.

De forma a verificar se a curva mestra "in situ" apresenta valores adequados para a camada asfáltica, lançamos mão dos módulos determinados pela retroanálise. Passa-se então a comparar o módulo resiliente determinado pela retroanálise do levantamento deflectométrico realizado pelo FWD e o valor do módulo dinâmico correspondente na curva mestra "in situ". Como o FWD realiza o ensaio com a aplicação de uma tensão com frequência de 33,33Hz e temperatura corrigida de 25°C. Realizou-se o deslocamento da frequência para a temperatura de referência de 20°C, que corresponde a frequência reduzida de $1,83 \times 10^{-2}$ Hz. Ao verificar o valor do Módulo Dinâmico "in situ" na curva determinada, encontrou-se o valor de 1.800 MPa, valor aproximado ao valor médio da retroanálise, de 2.400MPa, valores da mesma ordem de grandeza, mas distantes do valor correspondente ao valor da curva de laboratório, da ordem de 10.800 MPa. Conclui-se então que os valores obtidos a partir da curva "in situ" para o Módulo Dinâmico apresenta valor mais aproximado do Módulo Resiliente retroanalizado, que o estimado em laboratório.

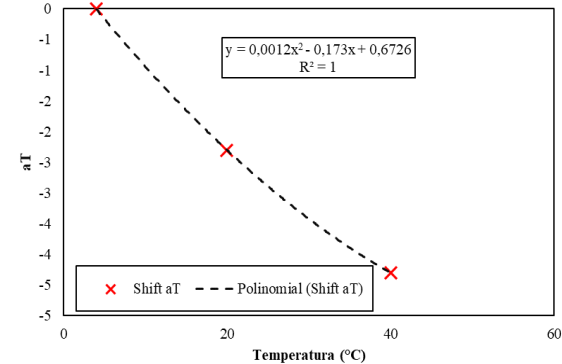
Figura 5. 15: Cálculo dos fatores de transferência para as temperaturas de 12°C, 20°C e 28°C.



Shift Factor	
a1	0,001
a2	-0,1621
a3	4,9341
T. ref. (°C)	40



Shift Factor	
a1	0,0015
a2	-0,1949
a3	3,2907
T. ref. (°C)	20



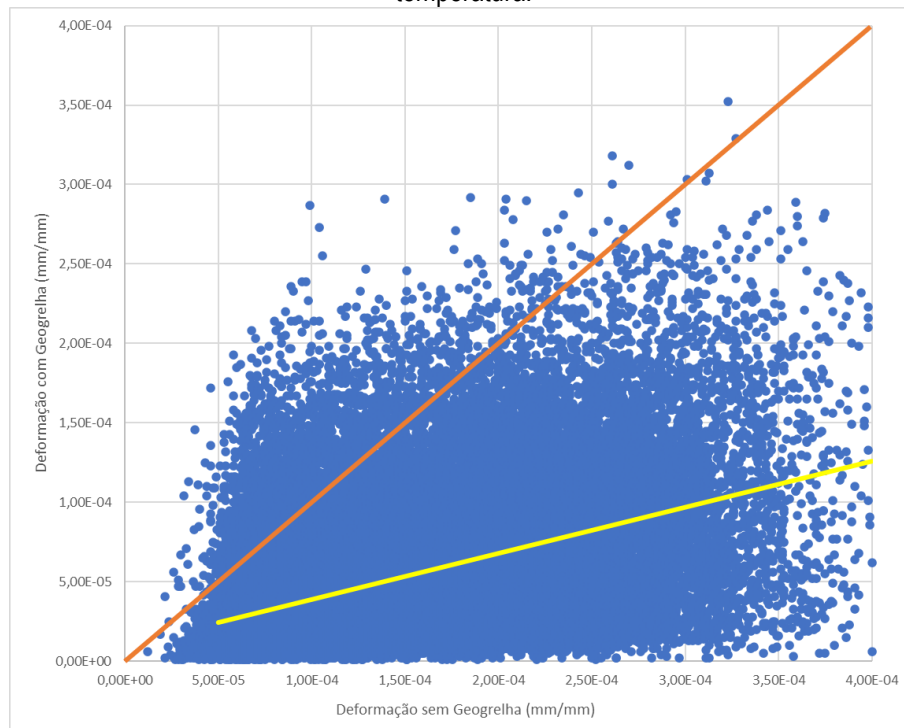
Shift Factor	
a1	0,0012
a2	0,173
a3	0,6726
T. ref. (°C)	4

Fonte: Próprio Autor.

5.4 - Análise do comportamento da mistura com e sem Geogrelha sobre as juntas transversais

Uma vez registradas as medidas das deformações ocorridas na profundidade 12,0 cm, na interface do pavimento onde foi implantada uma Geogrelha analisou-se os resultados destas deformações. Conforme ilustrado na Figura 5.16, que ilustra um gráfico de correlação entre as deformações ocorridas no substrato, para a mesma tensão, mesma temperatura e mesma frequência, que ocorreram sobre as juntas transversais instrumentadas, de maneira a possibilitar sua comparação.

Figura 5. 16: Correlação entre as deformações com e sem Geogrelha para mesma tensão, frequência e temperatura.



Fonte: Próprio Autor.

A linha laranja representa uma correlação de igualdade entre os valores registrados, enquanto a linha amarela apresenta a linha de tendência (correlação), existente entre as deformações com e sem Geogrelha sobre a junta transversal.

De posse destes resultados, pode-se afirmar que as deformações que ocorrem sobre a junta com a aplicação da Geogrelha apresentam valores menores que aqueles registrados na junta virgem. Este comportamento é esperado devido a contribuição mecânica que a Geogrelha proporciona a mistura, possibilitando-lhe resistir mais a esforços de tração.

Calculando-se a correlação linear entre as deformações registradas, obtém-se a Equação 38:

$$Def_{.c/G} = 0,29xDef_{.s/G} + 1,0 \cdot 10^{-5} \quad \text{Equação 38}$$

A partir dessa Equação é possível afirmar que a Geogrelha proporciona uma redução de mais de 2/3 nos valores das deformações. De forma a identificar o quanto isto representa em economia, foi realizada uma simulação de uma estrutura e a estimativa de quanto de reforço em asfalto seria necessário para que as deformações que estão ocorrendo no substrato estudado proporcionassem o mesmo ganho que a proporcionada pela Geogrelha.

Adotando-se a estrutura do presente estudo no AEMC, conforme Figura 5.17, e utilizando o eixo tandem duplo, foi obtida como resposta a presença de uma deformação de $2,18 \times 10^{-5}$ mm/mm na profundidade 4,0 cm acima da Placa de Concreto, desta forma, estimou-se que o uso de geogrelha traria um ganho estrutural que reduziria a deformação para $1,59 \times 10^{-5}$ mm/mm.

Figura 5. 17: Estrutura de pavimento adotada para análise do ganho estrutural da Geogrelha

AEMC v.2.4.6 (abr/2023)
Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm ³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	16	2,4	LINEAR	2388	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25	0,0
2	20	2,4	LINEAR	31621	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	0,0
3	10	1,8	LINEAR	7025	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

Fonte: Software AEMC –

Contabilizando um reforço à espessura do revestimento, de maneira a se obter uma redução na deformação na profundidade considerada idêntica a estimada pela correlação estabelecida, seriam obtidos os seguintes comportamentos para as deformações, conforme Tabela 5.11.

Tabela 5. 11: Determinação da espessura de revestimento para mesma deformação com Geogrelha.

Espessura Reforço (cm)	Deformação (mm/mm)
-	2,18E-05
2	2,17E-05
3	1,87E-05
4	1,60E-05
5	1,34E-05

Fonte: Próprio Autor.

Logo, seriam necessários 5,0 cm de CA adicionais a estrutura existente para espelhar a redução de deformação proporcionada pela utilização da Geogrelha. Utilizando o novo SICRO do DNIT/PB, com data base de abril de 2023, foram considerados os seguintes serviços para a comparação de valores:

a) Execução de reforço em CA:

- Execução de pintura de ligação;
- Execução de CA Faixa B na espessura de 5,0 cm

Corresponderia então a execução de 1 m² de pintura de ligação e 0,1225 ton de CA Faixa B, que totalizaria um custo de execução desta solução de R\$ 78,98/m².

b) Execução da camada de Geogrelha imersa na camada asfáltica de reforço dimensionada:

- Execução de pintura de ligação;
- Execução da Geogrelha sobre a camada asfáltica.

Corresponderia a execução de 1m² de pintura de ligação e de 1m² de aplicação de Geogrelha, que totalizaria um custo da execução desta solução de R\$ 31,05/m².

Calculando o valor deste serviço por m², utilizando por base a tabela do SICRO do DNIT para a data base de abril de 2023, verificou-se que o custo da execução da camada de asfalto para reduzir a deformação ao nível da Geogrelha seria R\$ 78,98/m², enquanto a solução de Geogrelha teria um custo de R\$ 31,05/m², logo, a solução utilizando a Geogrelha acarretaria uma solução com vantajosidade de aproximadamente 2,54 vezes maior economicidade, comprovando sua viabilidade para a redução das deformações no caso estudado.

Para o conhecimento da redução das deformações que a Geogrelha proporciona na camada asfáltica importante realizar a instrumentação e individualização da estrutura a ser considerada, porque este resultado espelha bem o comportamento de uma camada asfáltica executada sobre uma placa de concreto, avaliando as deformações sobre as juntas transversais ali existentes, não sendo adequado a extrapolação destas correlações para situações diferentes da encontrada na solução da instrumentação, de reforçar a estrutura do pavimento rígido com CA.

6 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nesta pesquisa permitiu avaliar o comportamento da camada asfáltica instrumentada com a utilização de sensores para medir tensão, frequência, deformação e temperatura, discretizando seu comportamento estatisticamente através de sua curva mestra. Com base nos principais resultados encontrados nesta pesquisa, conclui-se que:

- Com as medidas de tensão, frequência, deformação e temperatura é possível discretizar o comportamento da camada asfáltica por meio de sua curva mestra "in situ", com aproximação validada por meio da retroanálise dos módulos das camadas com a utilização de FWD. OS resultados indicaram valores de módulo para a frequência de aplicação da carga e temperatura reduzida da mesma ordem de grandeza que a estimada pela curva mestra "in situ" obtida com os dados dos sensores.
- As deformações de contração que ocorrem na camada asfáltica instrumentada com a solicitação do tráfego real são maiores que aquelas estabelecidas no ensaio de módulo dinâmico, logo, o regime que governa o comportamento da camada asfáltica, que é o visco-elasto-plástico-não linear ainda não é adequadamente representado, uma vez que o módulo dinâmico apresenta somente o comportamento das camadas asfálticas no regime visco-elástico-linear. Logo, a falta de consideração destas parcelas de deformação pode acarretar uma determinação de relação tensão/deformação/frequência inadequada no momento do dimensionamento. Esta diferença é visível quando comparadas as curvas mestras de laboratório e "in situ".
- A curva mestra de laboratório só representaria a Curva Mestra "in situ", para a frequência de 10 Hz, com a temperatura de referência de 32,5°C, o que pode denotar a necessidade de ajuste da temperatura de referência para a utilização adequada do ensaio de laboratório em seu uso no dimensionamento de uma nova estrutura.
- A soma dos fatores de ajuste $\delta + \alpha$ tanto para a curva de laboratório quanto para a "In situ" apresentou valores próximos, indicando que o valor do módulo máximo da mistura não sofre alteração quando da forma de determinação da curva mestra.
- O fator de ajuste δ_{lab} da Curva Mestra de laboratório apresentou valor menor que o fator de δ_{situ} da curva mestra "in situ" ($\delta_{lab} < \delta_{situ}$), este parâmetro indica que o módulo mínimo em campo é maior que o valor mínimo do módulo em laboratório, o que pode acarretar a compreensão equivocada da resposta do pavimento em altas temperaturas, pois o pavimento responderia melhor que a previsão de laboratório para esta situação..
- O fator de ajuste α_{lab} da curva mestra em laboratório apresenta valor maior que o α_{situ} da curva mestra "in situ" ($\alpha_{lab} > \alpha_{situ}$), que denota que a variação de módulo para a mistura em laboratório é maior em função da frequência reduzida que o apresentado pela camada instrumentada, isto representa que a variação de módulo "in situ" é menor que a estimada em laboratório em função da frequência.
- As deformações que ocorrem na camada asfáltica executada sobre a junta transversal da placa de concreto sofrem redução da ordem de 2/3 quando é utilizada a Geogrelha. Este comportamento indica que a utilização do geossintético, no presente caso em estudo, geraria uma economia de 2,54 vezes seu investimento para trazer a estrutura a se comportar com esta resposta mecânica.

Diante das análises realizadas para a determinação da Curva Mestra “in situ” da camada asfáltica, percebe-se que existe ainda a necessidade de melhor discretização do comportamento da camada asfáltica quando solicitada pelos veículos.

Embora os avanços na compreensão da relação tensão/deformação/frequência/temperatura tenha avançado, ainda se apresentam com necessidades de melhoria para fornecer dados confiáveis para utilização tanto em técnicas de dimensionamento quanto de avaliação das camadas asfálticas. A Curva Mestra “in situ” fornece valores mais próximos da realidade do comportamento mecânico do material e podem indicar de forma mais adequada o comportamento mecânico da mistura, sendo possível estimar de melhor forma seu desempenho.

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A execução de instrumentação apresentou dados proveitosos e apresentam contribuições para o estado da arte. Entretanto, faz-se necessário aprofundar o conhecimento desta temática. A seguir são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Instrumentar outros trechos rodoviários para avaliar a metodologia proposta em outras estruturas (pavimento flexível, com espessuras delgadas e elevadas), complementando os dados com contagens de veículos ou sensores mais robustos.
- Discretização do comportamento das frequências de aplicação da carga e correlação das respostas dos sensores de deformação, de maneira a avaliar quando ocorre superposição de efeitos na camada, para sua consideração em ensaios de fadiga, que consideram carregamentos constantes harversinos ou senoidais.
- Correlacionar as frequências discretizadas com os veículos comerciais e estabelecer modelos de aplicação de carregamento por veículo, de forma a simular estes resultados em ensaios de fadiga com os resultados obtidos pelas curvas harversinas e senoidais.
- Utilização dos parâmetros de ajuste das curvas mestra “in situ” para previsão de comportamento, calculando os módulos de estocagem e de relaxação, para avaliação do desempenho da mistura utilizando o modelo S-VECD, utilizando dados experimentais de fadiga por tração indireta.

8 - REFERÊNCIAS

ALKASAWNEH, W.: **Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms**, PhD Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, USA, 2007

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO (2002). Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, D. C.

_____. **Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. AASHTO T 283/14. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16504 – **Misturas asfálticas – Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Método da mancha de areia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. ABNT NBR 16018/11- **Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. ABNT NBR 16504 - 2016 - **Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria - Método da mancha de areia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. ABNT NBR 16780 ISO - 2019 - **Pêndulo Britânico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM – E 206-72: **Standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data**. USA, 1979.

_____. **Standard test method for indirect tension test for Resilient Modulus of bituminous mixtures**. ASTM 4123/95. ASTM, Washington DC. USA, 1995.

_____. **Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate**. ASTM C1252/03. ASTM, Washington DC. USA, 2003.

_____. **Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending**. ASTM D7460. ASTM, Washington DC. USA, 2010.

_____. **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate**. ASTM D4791/10. ASTM, Washington DC. USA, 2010.

_____. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. ASTM D2041/11. ASTM, Washington DC. USA, 2011.

_____. **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. ASTM D4402/15. ASTM, Washington DC. USA, 2015.

AZEVEDO, M. C. M.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Proposta para uma metodologia para caracterização de misturas betuminosas em laboratório. **10º Congresso Ibero-latinoamericano del Asfalto**, Sevilha. 1999. p. 2181 - 2191.

BARRIERA, Maria; POUGET, Simon; LEBENTAL, Bérengère; *et al.* **In Situ Pavement Monitoring: A Review**. v. 5, p. 18, 2020.

BAYANE, B. M.; YANG, E.; YANJUN, Q. Dynamic modulus master curve construction using Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) model. **International Journal of Engineering Research and Applications**, 2017. v. 7, n. 01, p. 53–63.

BECHARA, M. F.; FAXINA, A.L.; FABBRI, G.T.; GIGANTE, A.C.; NASCIMENTO, D.R. Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas. **39ª Reunião Anual de pavimentação**. Recife/PE. 2008.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B., **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica Para Engenheiros**, Rio de Janeiro – RJ, 2007

BI, Y. *et al.* Correlation analysis between asphalt binder/asphalt mastic properties and dynamic modulus of asphalt mixture. **Construction & building materials**, 2021. v. 276, p. 122256.

BRINGEL, R. M. *et al.* Análise dos parâmetros reológicos através das curvas mestras do ligante asfáltico modificado por SBS e EVA. IN: **19º Encontro de Asfalto–Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis IBP**, Anais... Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. **Projeto de Instrumentação para Medição de Deformação do Pavimento**. In: Convênio TT 102/2007 - Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento, Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Laboratório de Transportes e Logística. Florianópolis, Santa Catarina, 2008.

BURMISTER, DONALD M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. **Journal of Applied Physics**, 1945.

CAVALCANTE, F. P., **Avaliação das Características Funcionais e Estruturais da Rodovia BR230/PB - Lote III**, Tese de Mestrado, UFPE, Recife, 2005.

CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A. T.; COLPO, G. B.; DOERING, D. **Instrumentação In Situ de um Segmento da BR-116 - Estudo Comparativo do Efeito Laboratório-campo da Fadiga**. Concepa/ANTT, Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT, 2017.

CHENG, H. *et al.* Comparative analysis of strain-pulse-based loading frequencies for three types of asphalt pavements via field tests with moving truck axle loading. **Construction and Building Materials**, 2020. v. 247, p. 118519.

CHENG, Huailei; LIU, Jianing; SUN, Lijun; *et al.* Critical position of fatigue damage within asphalt pavement considering temperature and strain distribution. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 22, n. 14, p. 1773–1784, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1724288>>.

CHENG, Huailei; LIU, Jianing; SUN, Lijun; *et al.* Fatigue behaviours of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121675, 2021b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820336795>>.

CHENG, Huailei; LIU, Liping; SUN, Lijun. Bridging the gap between laboratory and field moduli of asphalt layer for pavement design and assessment: A comprehensive loading frequency-based approach. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 267–280, 2022a.

CHENG, Huailei; OTHERS. **Determination of the stiffness moduli and fatigue endurance limits of asphalt pavements for perpetual pavement design**. 2022b.

CHENG, Huailei; SUN, Lijun; WANG, Yuhong; *et al.* Fatigue test setups and analysis methods for asphalt mixture: A state-of-the-art review. **Journal of Road Engineering**, v. 2, n. 4, p. 279–308, 2022c. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2097049822000609>>.

CLYNE, T. R. *et al.* **Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures**. MN/RC-2003-09, Final Report. Minnesota.

COLPO, G. B. **Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas: Ensaio Laboratoriais e Instrumentação in situ**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CONCEPA/ANTT, 2008, **Avaliação da Metodologia de Cálculo para Determinação do Módulo de Resiliência por Compressão Diametral para Fins de Projeto de Pavimento e Controle de Qualidade de Obras**, Documento N' 08-000, Dezembro, 2008.

DE OLIVEIRA, Letícia Sousa; DA SILVA, Lucas Sasaki Vieira; LUCAS JÚNIOR, Jorge Luiz Oliveira; *et al.* Linear viscoelasticity and fatigue life: Relationships between properties of asphalt binders and corresponding mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 372, p. 130685, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823003963>>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 24/1994. Pavimento – **Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER – PRO 273/1996 - Procedimento - **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer - FWD”**, Procedimento. 4p. Rio de Janeiro. 1996.

_____. DNER 078/1994 - ME. - Agregados – Agregado graúdo - **Adesividade a ligante betuminoso**, 1994.

_____. DNER 054/1997 - ME. - Agregados – **Equivalente de Areia**, 1997.

_____. DNER 195/1997 - ME. - Agregados – **Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**, 1997.

_____. DNER 035/1998 - ME. Pavimentação Asfáltica - Agregados - **Determinação da abrasão “Los Angeles”**, 1998.

_____. DNER 083/1998 - ME. Pavimentação Asfáltica - Agregado graúdo - **Adesividade a ligante betuminoso**, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 439/2022 – ME – Pavimentação - Misturas betuminosas – **Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep)**. 18p. Rio de Janeiro. 2022.

_____. Publicação IPR 749 - **Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa**. 2020b.

_____. DNIT 155/2010 - ME. Pavimentação Asfáltica - Material asfáltico – **Determinação da penetração** – Método de ensaio, 2010.

_____. DNIT 136/2010 - ME. Pavimentação Asfáltica – Misturas asfálticas – **Determinação da resistência à tração por compressão diametral** – Método de ensaio. 2010

_____. DNIT – ME 183/2018. Pavimentação asfáltica – **Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT 184/2018 - ME - Pavimentação - Misturas Asfálticas - **Ensaio Uniaxial De Carga Repetida Para Determinação Da Resistência À Deformação Permanente**. 2018

_____. DNIT 416/2019 - ME - Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – **Determinação Do Módulo Dinâmico**. 2019.

_____. DNIT 424/2020 - ME - Pavimentação Asfáltica – Agregados – **Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. 2020.

_____. DNIT 439/2022 - ME - Pavimentação Asfáltica – **Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep)** – Método de ensaio. 2022.

_____. DNIT - **Manual de Utilização do Programa MeDiNa Versão 1.1.5**. 2020a.

DI BENEDETTO, Herve; ROCHE, C; BAAJ, Hassan; et al. Fatigue of bituminous mixtures. **Materials and Structures**, v. 37, p. 202–216, 2004.

E. J. Yoder, M. W. Witczak. Principles of Pavement Design. Jan 8, 1972 - **Technology & Engineering**

EI, N. H.; SINGH, D. Dynamic modulus-based field rut prediction model from an instrumented pavement section. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, 2013. v. 104, p. 129–138.

FONSECA, Osvaldo Albuquerque; University of Maryland at College Park Department of Civil. Development of a time-dependent model for the dynamic modulus of asphalt mixes, **ENGINEERING**, TA - TT -, 1995.

FRANCO, F. A. C. D. P. **Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000.

FREITAS, E. L. F. M. **Obtenção da curva mestra do módulo dinâmico com uso do ensaio de ressonância por impacto em misturas asfálticas**. Dissertação. Universidade Federal de Sergipe. 2017.

GARCIA, G.; THOMPSON, M. **HMA dynamic modulus predictive models (a review)**. [S.l.]: [s.n.], 2007.

GHASEMI, P. *et al.* **Predicting Dynamic Modulus of Asphalt Mixture Using Data Obtained from Indirect Tension Mode of Testing**. 2019.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaio Acelerado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GOPALAKRISHNAN, K. *et al.* **Development of Asphalt Dynamic Modulus Master Curve Using Falling Weight Deflectometer Measurements**, TR-659. 2014.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)– Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GOUVEIA, B. C. S., SOARES, J. B., ARAGÃO, F. T. S., & Specht, L. P. (2018). Previsão do módulo dinâmico de misturas asfálticas brasileiras. *Transportes*, 26(4), 16–29. <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i4.1388>

GRAZIANI, A AND VIRGILI, A AND BELOGI, L. Instrumented test section for the evaluation of geogrids in asphalt pavements. **Proceedings of the 5th international conference on bituminous mixtures and pavements**, Thessaloniki, 2011. p. 1107--1117.

HADDADI, Farshad; AMERI, Mahmoud; MIRABIMOGHADAM, Mohammad H; *et al.* Validation of a simplified method in viscoelastic continuum damage (VECD) model developed for flexural mode of loading. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 892–897, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815302063>>.

HAMIM, A. *et al.* Integrated finite element and artificial neural network methods for constructing asphalt concrete dynamic modulus master curve using deflection time-history data. **Construction & building materials**, 2020. v. 257, p. 119549.

HERNANDEZ, R. O. A. *et al.* Estudio del comportamiento del módulo dinámico y fatiga en mezclas asfálticas densas hechas con diferentes tipos de asfalto y agregado. **Revista Ingeniería de Obras Civiles**, 2017. v. 7, p. 26–36.

HEUKELOM, W., and KLOMP, A.J.G. Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction, **Proceedings of the 1st international conference on the structural design of asphalt pavement**, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1962.

HIBBELER, R. C. (2010), **Resistência dos Materiais**, 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

HU, X; ZHOU, F; HU, S; *et al.* Proposed loading waveforms and loading time equations for mechanistic-empirical pavement design and analysis. **Journal of Transportation Engineering**, v. 136, n. 6, p. 518–527, 2010. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955617918&doi=10.1061%2F%28ASCE%29TE.1943-5436.0000121&partnerID=40&md5=6b9ed3fdce4b2450abf3b6337a1ef38>>.

HUAILEI, Cheng; YUHONG, Wang; LIPING, Liu; *et al.* Relationships between Asphalt-Layer Moduli under Vehicular Loading and FWD Loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 1, p. 4020437, 2021. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003429)>.

HUANG, Y.H. **Pavement analysis and design**. I Title. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

HVEEM, Francis N. **Pavement deflections and fatigue failures**. [s.l.: s.n.], 1955.

INOCENTE DOMINGOS, M. D.; FAXINA, A. L. Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. **Transportes**, 30 abr. 2013. v. 21, n. 1 SE-Artigos, p. 51–58. Disponível em: <<https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/677>>.

ISLAM, Md; FAISAL, Hasan; TAREFDER, Rafiqul. **Determining temperature and time dependent Poisson's ratio of asphalt concrete using indirect tension test**. *Fuel*, v. 146, p. 119–124, 2015.

KIM, Y Richard. **Modeling of Asphalt Concrete**. [s.l.: s.n.], 2008.

Kim, Y. R. (2009). **MODELING OF ASPHALT CONCRETE**: Book-Hardcover - Stock #MC462. ISBN: 9780071464628. ASCE Press. Edited by Y. Richard Kim. 2009 / 460 pp. McGraw-Hill.

KIM, Y. R. *et al.* **LTPP computed parameter: dynamic modulus**. [S.I.]: United States. Federal Highway Administration, 2011.

KIM, Y.-R.; LITTLE, D N; LYTTON, R L. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 1, p. 75–83, 2003. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

0037281326&doi=10.1061%2F%28ASCE%290899-

1561%282003%2915%3A1%2875%29&partnerID=40&md5=9ef8b58bba3954d2d5e10487781806b2>

KIM, Y; SIAS, Jo; WEN, Haifang. **FATIGUE PERFORMANCE EVALUATION OF WESTRACK ASPHALT MIXTURES USING VISCOELASTIC CONTINUUM DAMAGE APPROACH**. [s.l.: s.n.], 2002.

KOPPERMAN, Stuart; TILLER, George; TSENG, Mingsan; *et al.* **ELSYM 5 : interactive microcomputer version : user's manual : IBM-PC and compatible microcomputer**. McLean, Va. SE - : U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation McLean, Va., 1985.

KYOWA. **Measuring Equipment General Catalog**. 2022. Disponível em: https://kyowa-ei.meclib.jp/e2022/book/index.html#target/page_no=1

LCPC, **La route et ses chaussées: Manuel de travaux publics**, Paris, Eyrolles ,2020

LEE, H. J.; LEE, J. H.; PARK, H. M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements. **Construction and building materials**, 2007. v. 21, n. 5, p. 1079–1087.

LING, M. *et al.* Time-temperature-aging-depth shift functions for dynamic modulus master curves of asphalt mixtures. **Construction & building materials**, 2017. v. 157, p. 943–951.

LYTTON, Robert L; UZAN, J Elbez; FERNANDO, Emmanuel G; *et al.* **DEVELOPMENT AND VALIDATION OF PERFORMANCE PREDICTION MODELS AND SPECIFICATIONS FOR ASPHALT BINDERS AND PAVING MIXES**. *In:* [s.l.: s.n.], 1993. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107136487>>.

LYTTON, Robert. Characterizing Asphalt Pavements for Performance. **Transportation Research Record**, v. 1723, p. 5–16, 2000.

MATEOS, Angel; SOARES, J. Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of spanish asphalt concrete mixtures. **Materiales de Construcción**, v. 65, p. e047, 2015.

MATEOS, Angel; WU, Rongzong; DENNEMAN, Erik; *et al.* **Evaluation of the Effect of Deflection Waveform on Fatigue Test Results for Hot Mix Asphalt**. 2017.

MATEOS, Angel; WU, Rongzong; DENNEMAN, Erik; *et al.* Sine versus Haversine Displacement Waveform Comparison for Hot Mix Asphalt Four-Point Bending Fatigue Testing. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2672, p. 036119811878279, 2018.

MAZZONI, L. N. *et al.* Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de ligantes asfálticos. **Transportes**, 2020. v. 28, n. 1, p. 135–146.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L, M, G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PELLINEN, Terhi K; CROCKFORD, Bill. **Comparison of Analysis Techniques to Obtain Modulus And Phase Angle From Sinusoidal Test Data**. *In*: [s.l.: s.n.], 2003a. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109669653>>.

PELLINEN, Terhi K; WITCZAK, Matthew; BONAQUIST, Ramon. **Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization**. [s.l.: s.n.], 2003b.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de Doutorado, COPPE/ufRJ, Rio de Janeiro, 1991.

QUEIROZ, G.R.; Maraia, S. C. (2018) **Estudo comparativo entre sistemas de pavimentação rígida e flexível**, Artigo Científico. Faculdade Aldete Maria Alves. Iturama, MG

QUEIROZ, Rita Flávia Régis; RODRIGUES, John Kennedy Guedes; PATRICIO, Jonny Dantas; *et al.* Linear viscoelastic properties and fatigue S-VECD based evaluation of polymer-modified asphalt mixtures. **Journal of Building Engineering**, v. 75, p. 106916, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223010951>>.

ROCHA FILHO, N.R., RODRIGUES, R.M. . A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamento Deflectométricos. *In*: **30a Reunião Anual de Pavimentação**. V. 3 pp.1119-1146, Salvador, BA, Brasil, 1996.

RODRIGUES, R.M. **Estudo dos Trincamentos dos Pavimentos**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

SAKHAEIFAR, M. S.; RICHARD KIM, Y.; KABIR, P. New predictive models for the dynamic modulus of hot mix asphalt. **Construction & building materials**, 2015. v. 76, p. 221–231.

SANDOVAL, C. H. H.; BARRERA, G. M. N.; ACUÑA, J. F. C. **Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones**. Facultad de Ingeniería, 2011. v. 20, n. 30, p. 41–54.

SANDOVAL, C. H. H.; CASTELLANOS, J. S. P.; SÁNCHEZ, J. E. P. **Correlación entre el módulo resiliente y el módulo dinámico para mezclas asfálticas tipo mdc-19**. Ingenio Magno, 2018. v. 9, n. 1, p. 83–96.

SILVA, P. D. E. A.; MOTTA, L. M. G. Instrumentação da Pista Circular Experimental do IPR/DNER. **Transportes**, vol. 7, nº 2, p. 29-46, 1999.

SILVA, S. *et al.* AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA EM LIGANTES ASFÁLTICOS UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIOS. **20ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA**. Florianópolis, SC – Centro Sul-28 a 30 de junho de 2017.

SOARES, J. B.; SOUZA, F. V. De. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade**. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/267919424_CONSIDERACOES_SOBRE_MODULO_RESILIENTE_E_MODULO_DINAMICO_EM_MISTURAS_ASFALTICAS_COM_BASE_NA_TEORIA_DA_VISCOELASTICIDADE>. 2003.

SOUZA, F. V.; SOARES, J. B. **Efeito da consideração do comportamento viscoelástico linear do revestimento no cálculo de tensões e deslocamentos em pavimentos asfálticos**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

SPADONI, Sara; PAOLO INGRASSIA, Lorenzo; MOCELIN, Douglas; *et al.* Comparison of asphalt mixtures containing polymeric compounds and polymer-modified bitumen based on the VECD theory. **Construction and Building Materials**, v. 349, p. 128725, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822023820>>.

SUN, Lijun. **Structural behavior of asphalt pavements: Intergrated analysis and design of conventional and heavy duty asphalt pavement**. [s.l.]: Butterworth-Heinemann, 2016.

BRASIL. DNIT/UFSC. **Projeto de Instrumentação para Medição de Deformação do Pavimento**. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Laboratório de Transportes e Logística - LABTRANS. Florianópolis. 2008.

ULLIDTZ, P. Pavement Analysis; **Elsevier Science Publishing Company Inc.**, Amsterdam, 1987.

Universidade Federal de Campina Grande (2022). **Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste**, Termo de Cooperação 5850.0108431.18.9, Campina Grande.

WANG, Yizhuang David; UNDERWOOD, Benjamin Shane; KIM, Youngsoo Richard. Development of a fatigue index parameter, Sapp, for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 2, p. 438–452, 2022.

WITCZAK, M A; MAMLOUK, M W; KALOUSH, M S; *et al.* Validation of initial and failure stiffness definitions in flexure fatigue test for hot mix asphalt. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 35, n. 1, p. 95–102, 2006.

YUE, Mingjing; YUE, Jinchao; WANG, Riran; *et al.* Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit® and polymers using linear amplitude sweep test. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123054, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182100814X>>.

YU-HONG, WANG; YONG, W E N; HUAI-LEI, CHENG; *et al.* Endurance strain limits of long-life flexible pavements. **China Journal of Highway and Transport**, v. 33, n. 10, p. 102, 2020.

ZANETIC, Silvio Tado. **Análise de Tensões e Deformações Extensometria Elétrica-Strain gauges**. Poli-EPUSP, 2020.

ZHANG, F. *et al.* Predict the Phase Angle Master Curve and Study the Viscoelastic Properties of Warm Mix Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixture. **Materials**, 2020. v. 13, n. 21, p. 5051.

ZHANG, Jun; SU, Yongtao; ZHANG, Xiaode; *et al.* Experimental investigation on the effect of loading frequency on the fatigue damage characteristic of asphalt mixture. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 5, p. 478–485, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42947-019-0058-4>>.

ZHAO, Y.; TANG, J.; LIU, H. **Construction of triaxial dynamic modulus master curve for asphalt mixtures**. **Construction & building materials**, 2012. v. 37, p. 21–26.

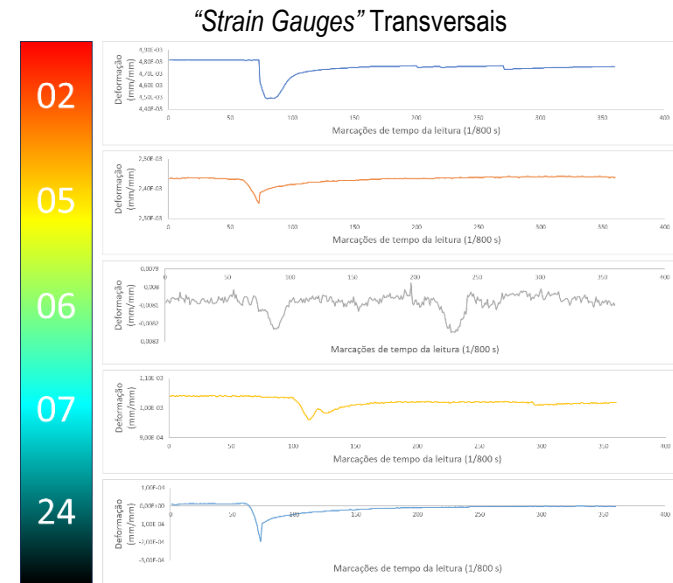
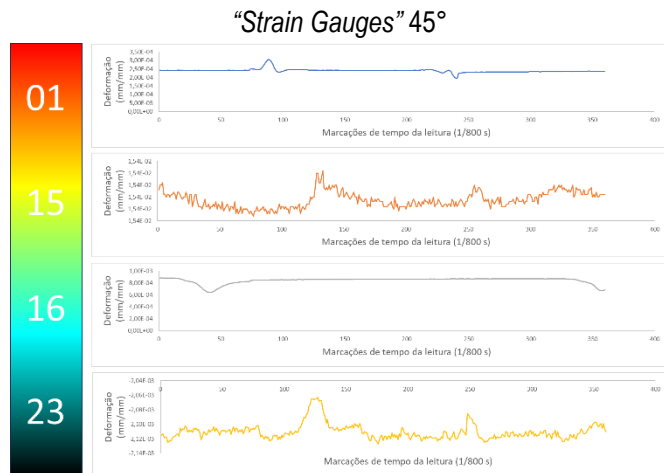
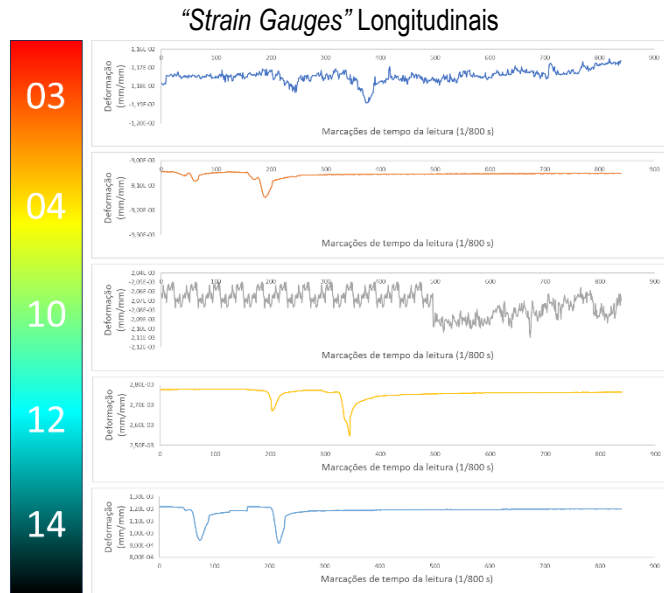
Zhe; RICHARD KIM, Y; SHANE UNDERWOOD, B; *et al.* Asphalt mixture fatigue damage and failure predictions using the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. **International Journal**

of **Fatigue**, v. 174, p. 107736, 2023. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112323002372>>.

ZHU, Jingwen. **Evaluation and critical damage position for fatigue behavior of asphalt pavement considering the full temperature profile**. Shanghai: Tongji University, 2016.

ZIEGLER, C. R. **Análise do Desempenho Estrutural de um Trecho da BR 101 em Pernambuco com o Auxílio de Instrumentação *In Situ***. Tese de Mestrado. UFCG. Campina Grande. 2021.

Figura A1. 1: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 09 de Janeiro de 2020 às 00:13:47

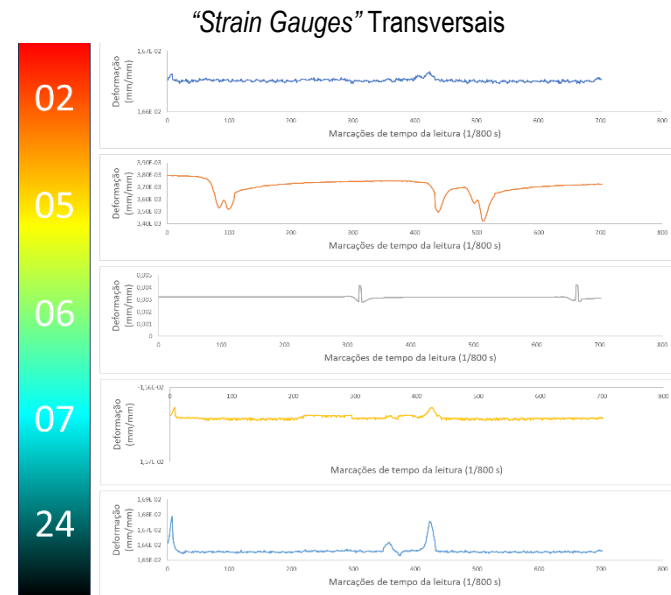
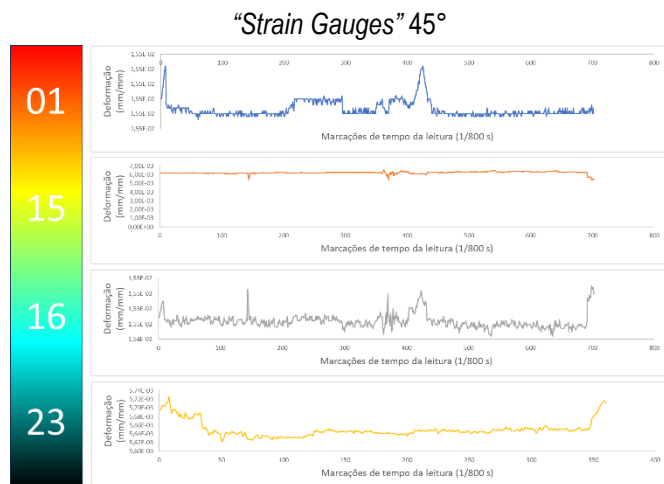
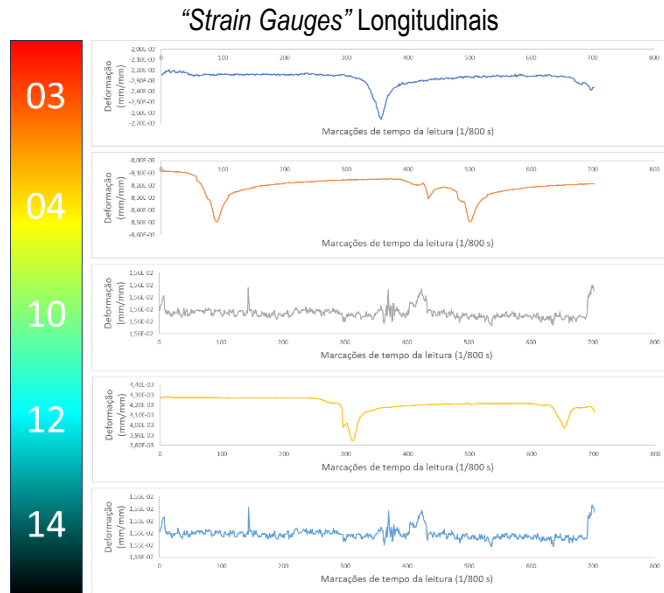


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

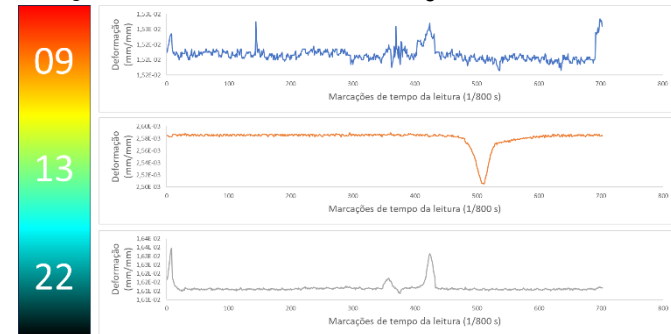


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 2: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 07 de Fevereiro de 2020 às 14:44:15

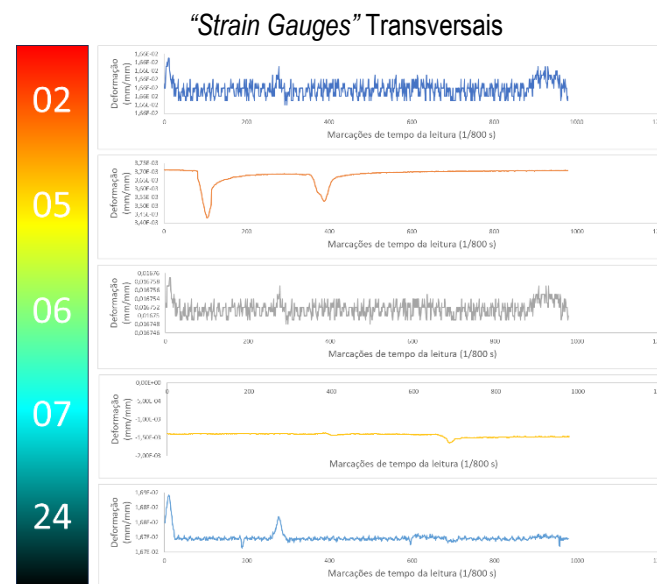
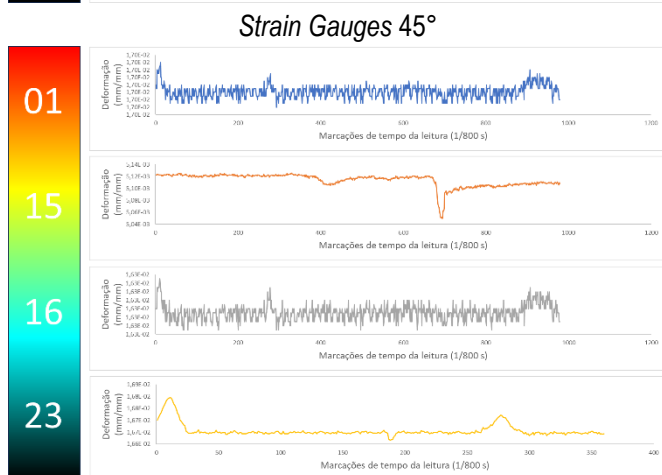
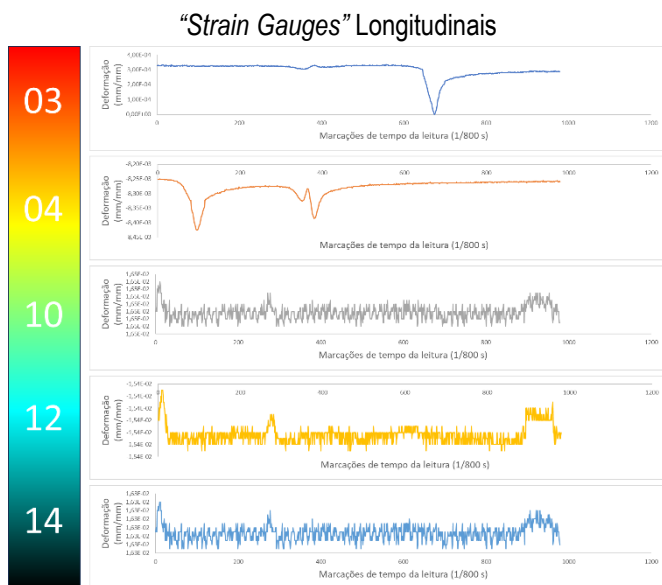


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

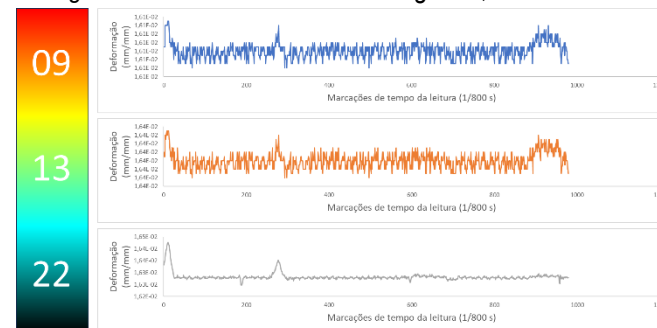


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 3: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 09 de Março de 2020 às 16:51:38

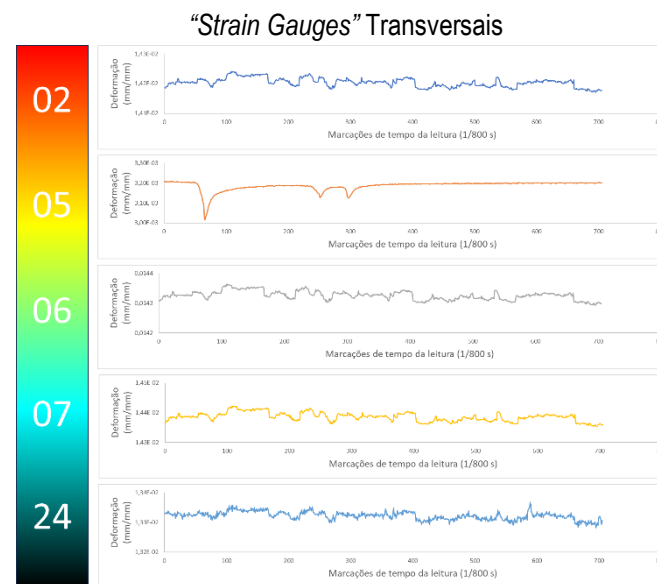
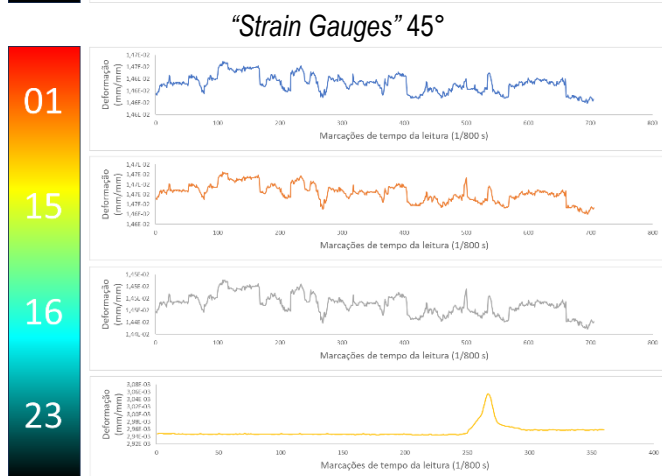
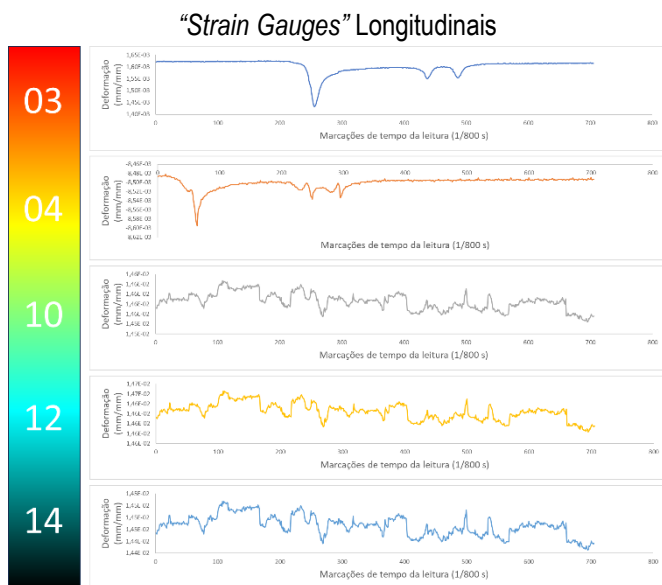


Strain Gauges Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

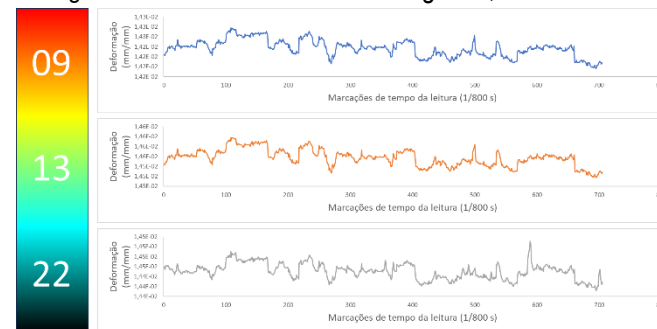


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 4: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 05 de Maio de 2020 às 10:26:37

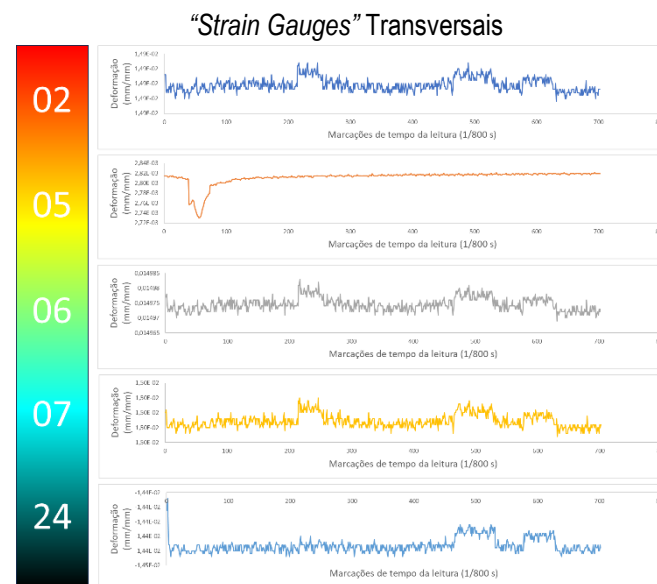
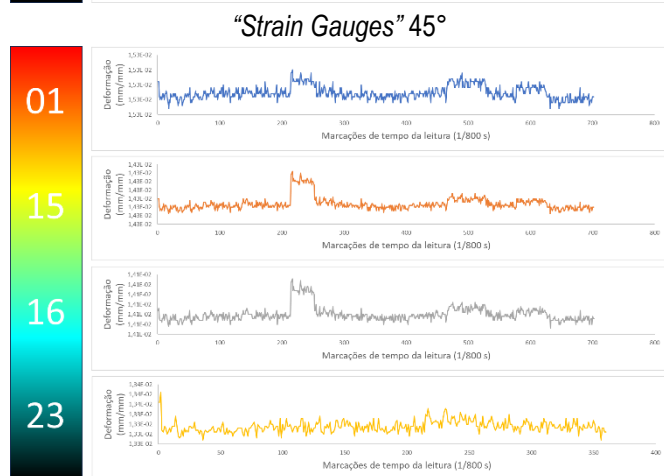
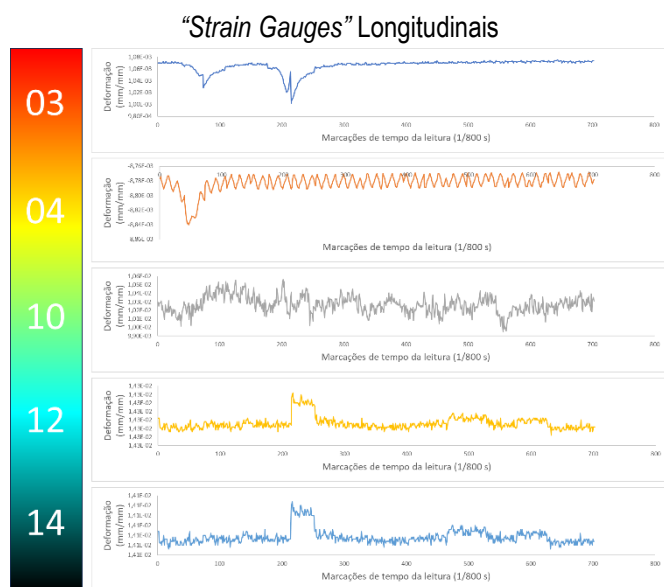


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

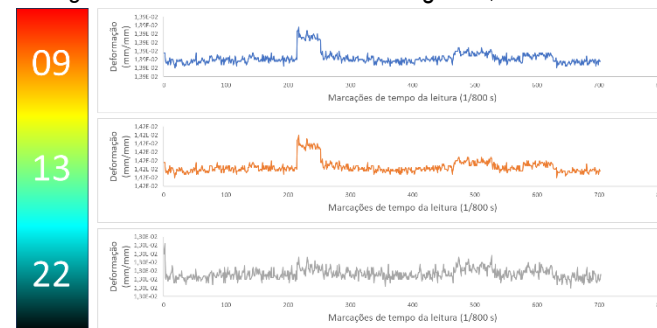


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 5: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 01 de Junho de 2020 às 00:02:12

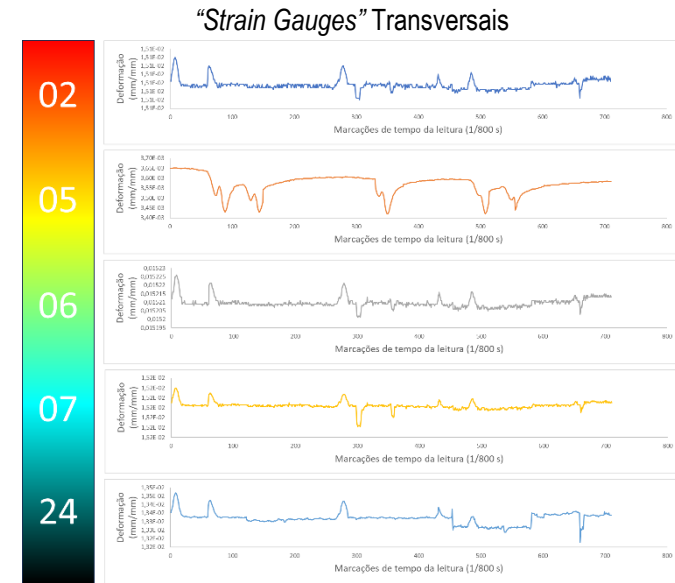
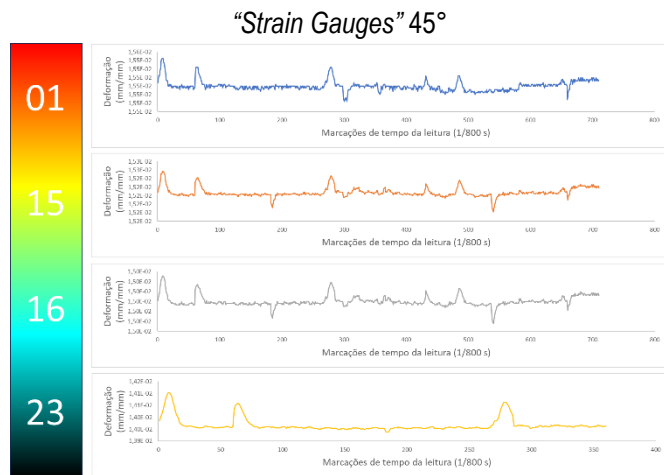
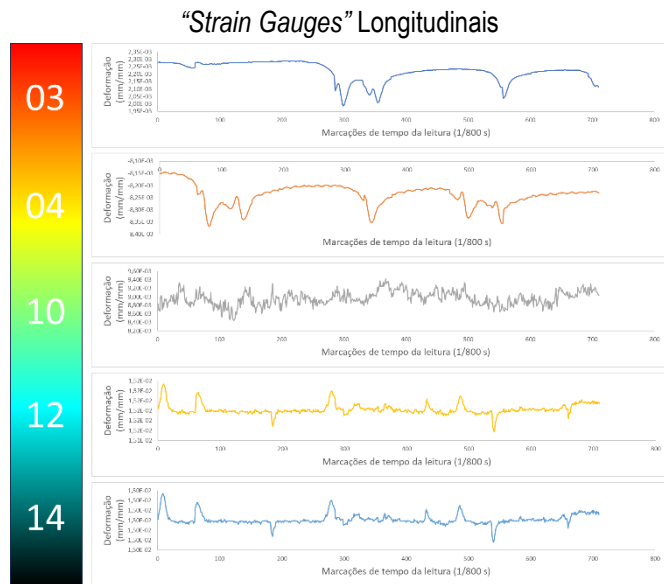


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

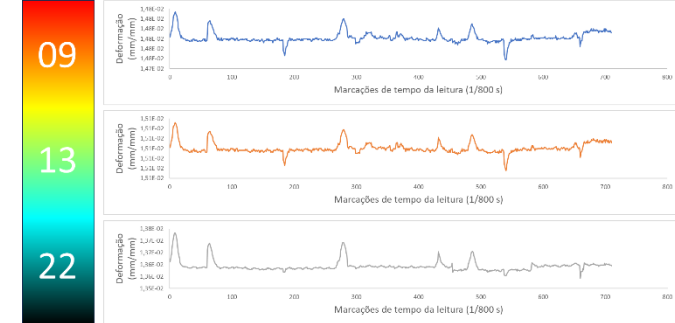


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 6: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 14 de Julho de 2020 às 14:50:05

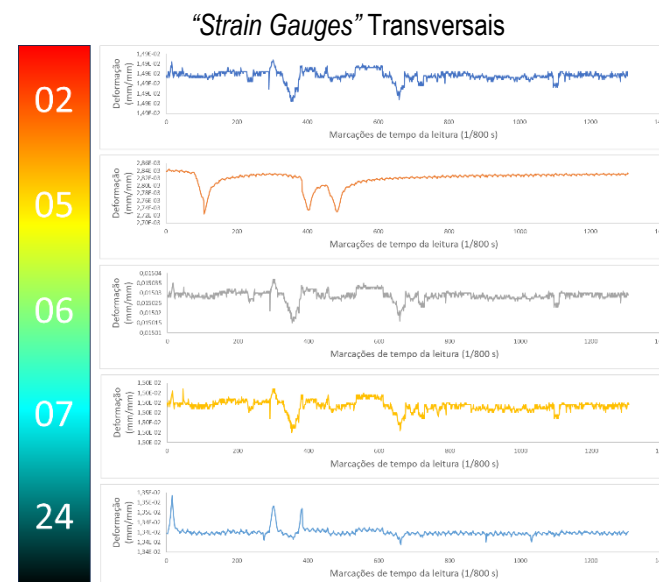
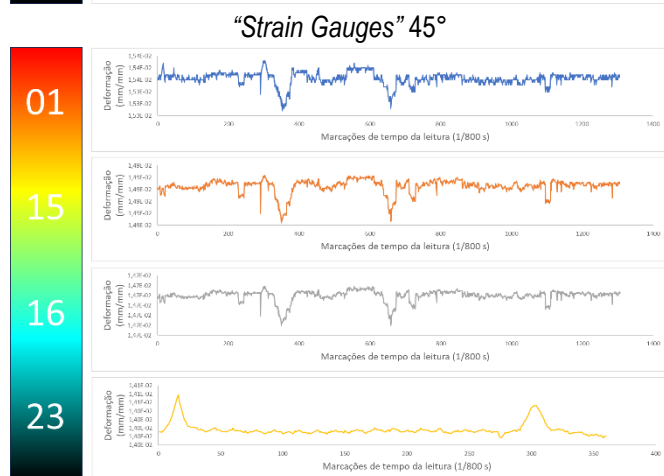
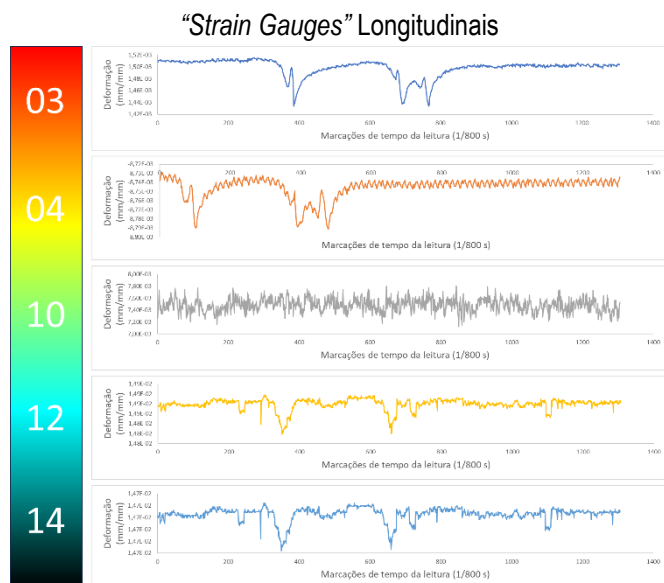


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

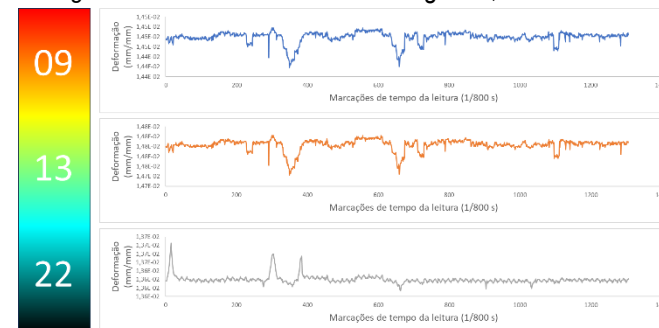


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 7: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 29 de Julho de 2020 às 09:02:01

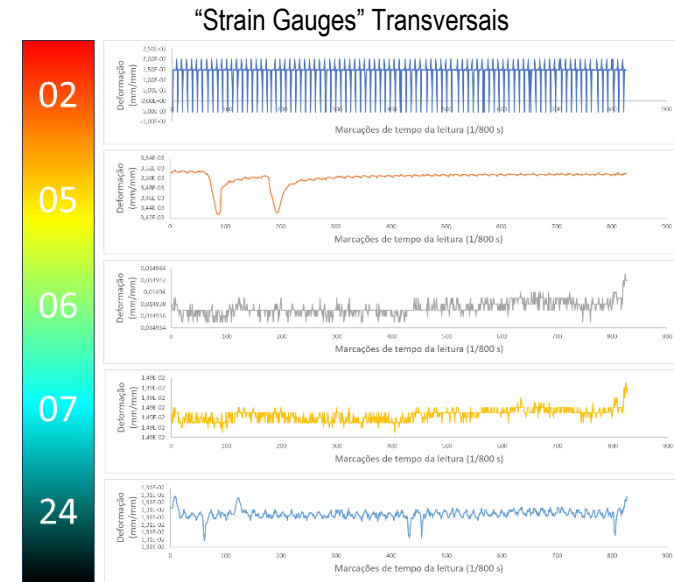
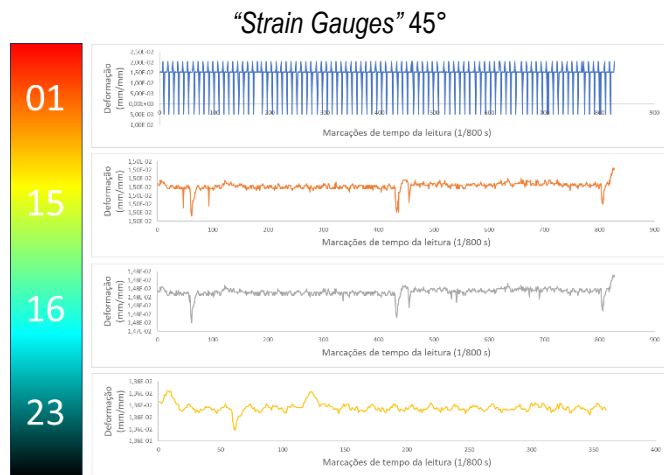
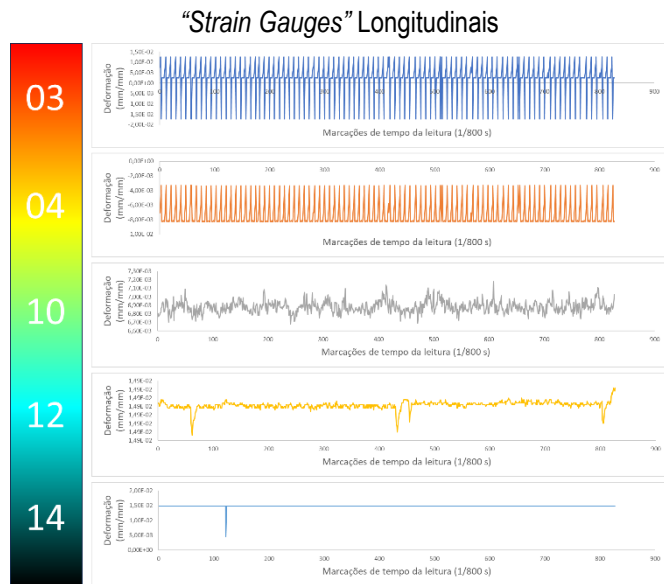


“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

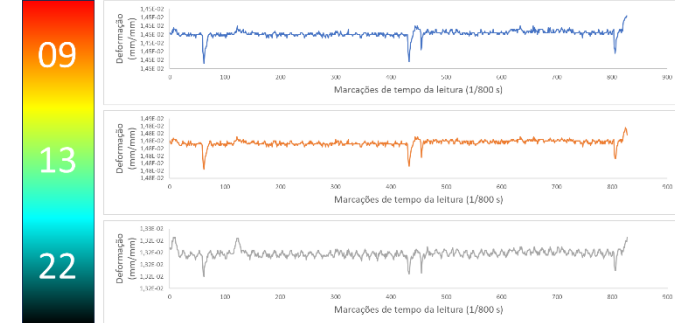


Fonte: Próprio Autor.

Figura A1. 8: Avaliação do Comportamento dos “Strain Gauges” – 30 de Julho de 2020 às 14:14:03



“Strain Gauges” Fibra Inferior – 13 Com Geogrelha, 9 e 22 Com Geogrelha

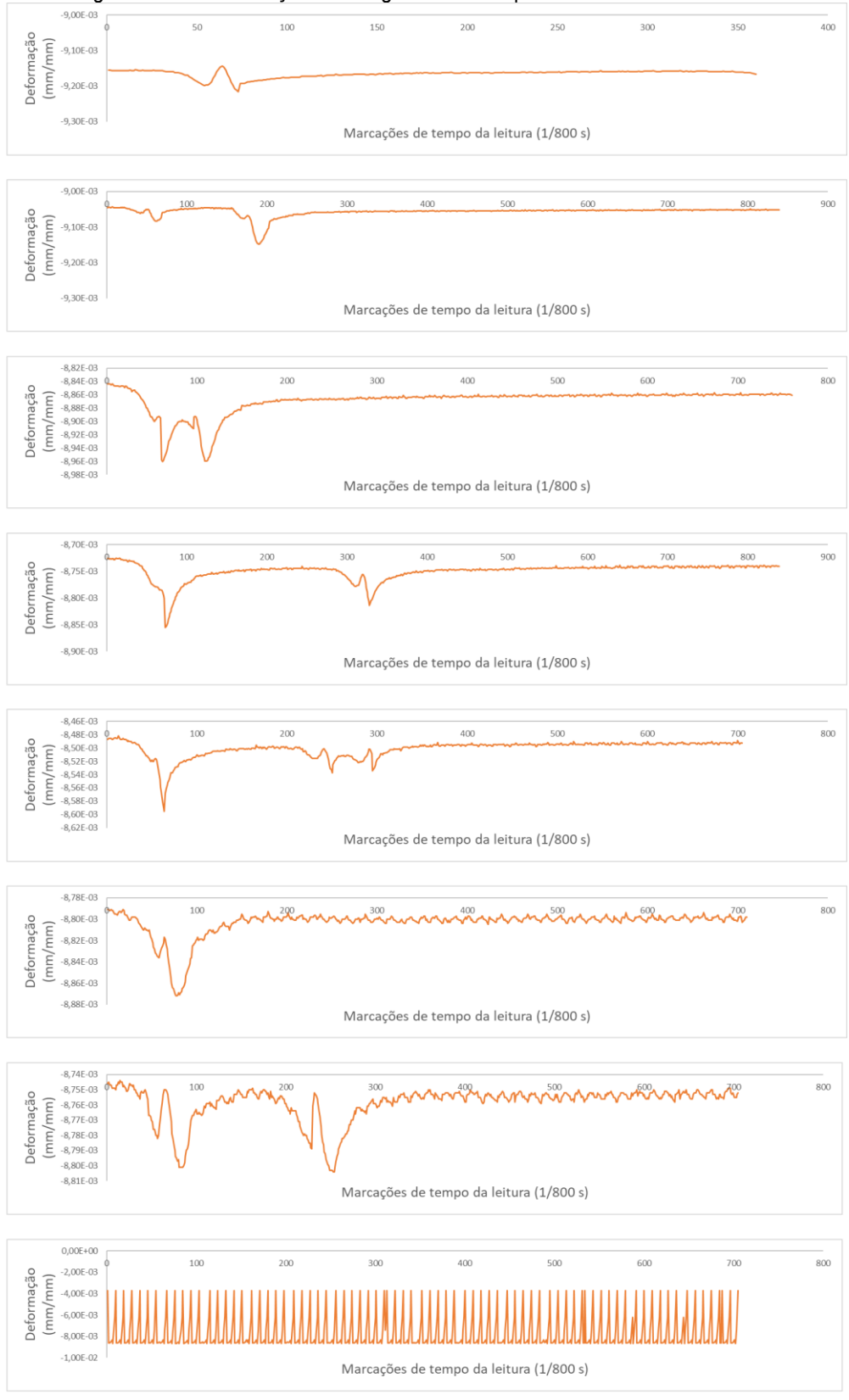


Fonte: Próprio Autor

Apêndice 2: Deformações ao longo dos meses por canais de leitura

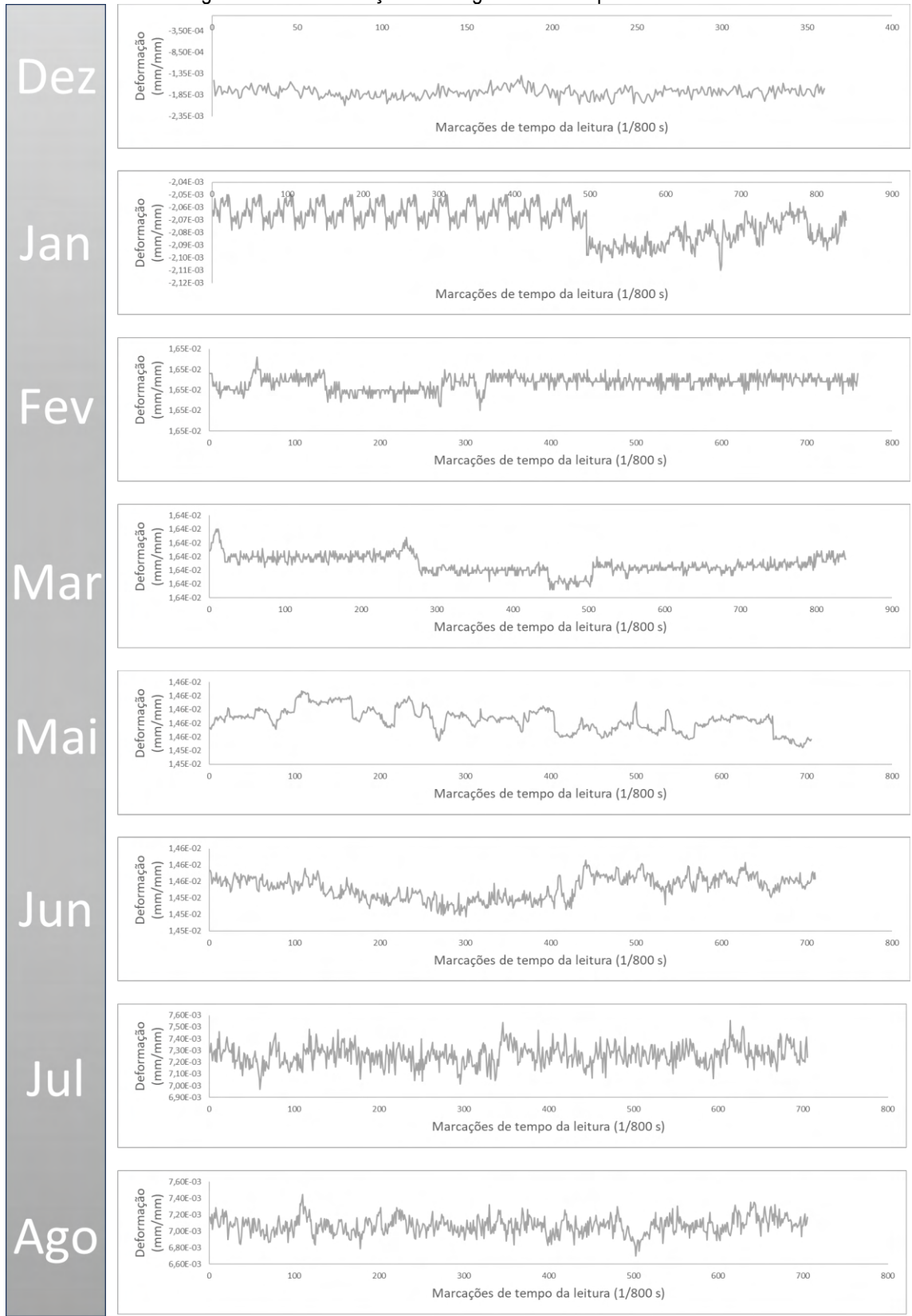
Figura A2. 1: Deformações ao longo dos meses para o canal 04

Dez
Jan
Fev
Mar
Mai
Jun
Jul
Ago



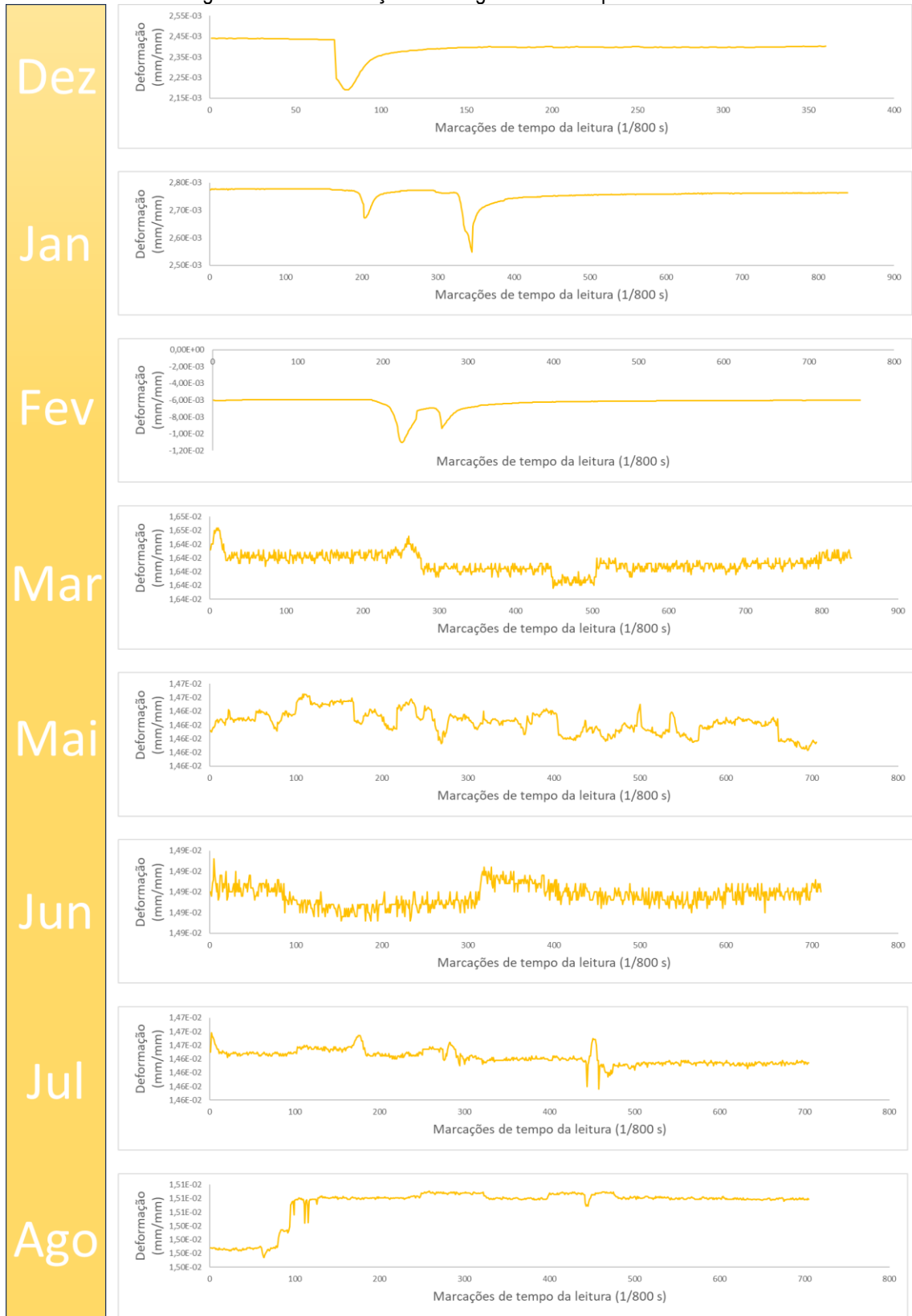
Fonte: Próprio Autor.

Figura A2. 2: Deformações ao longo dos meses para o canal 10



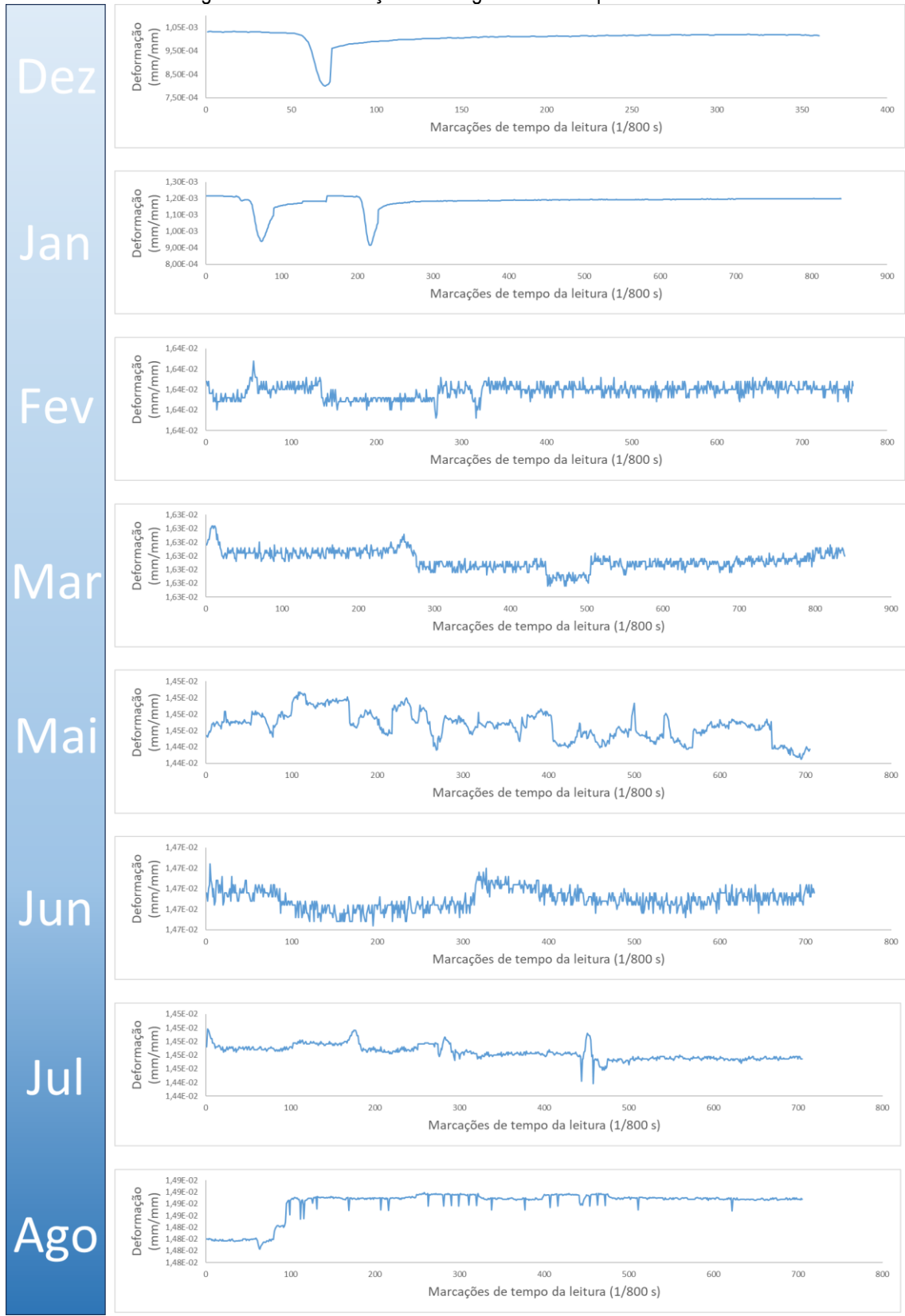
Fonte: Próprio Autor.

Figura A2. 3: Deformações ao longo dos meses para o canal 12



Fonte: Próprio Autor.

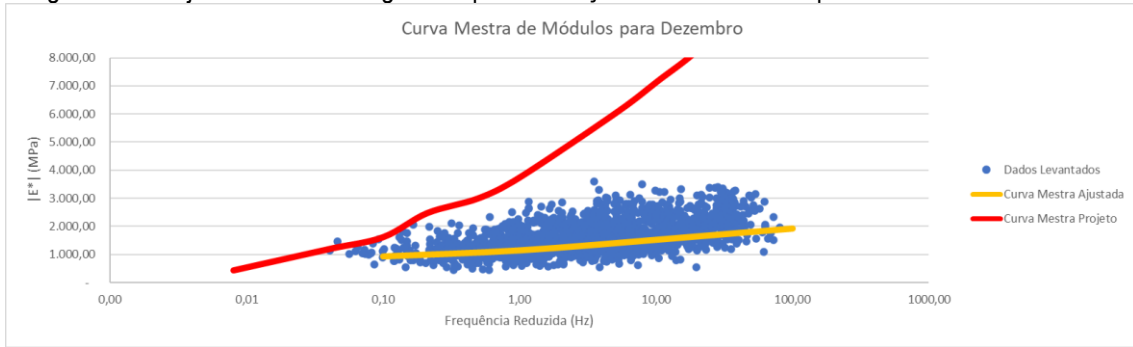
Figura A2. 4: Deformações ao longo dos meses para o canal 14



Fonte: Próprio Autor.

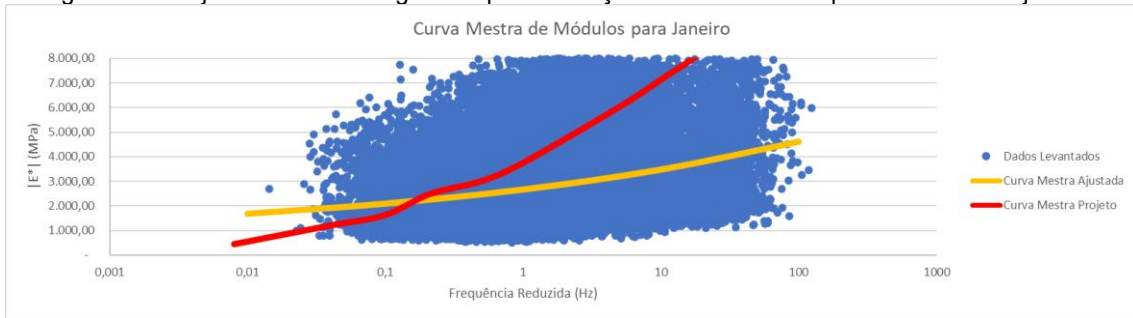
Apêndice 3: Ajustes do Modelo Sigmoidal mês a mês.

Figura A3. 1: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de dezembro



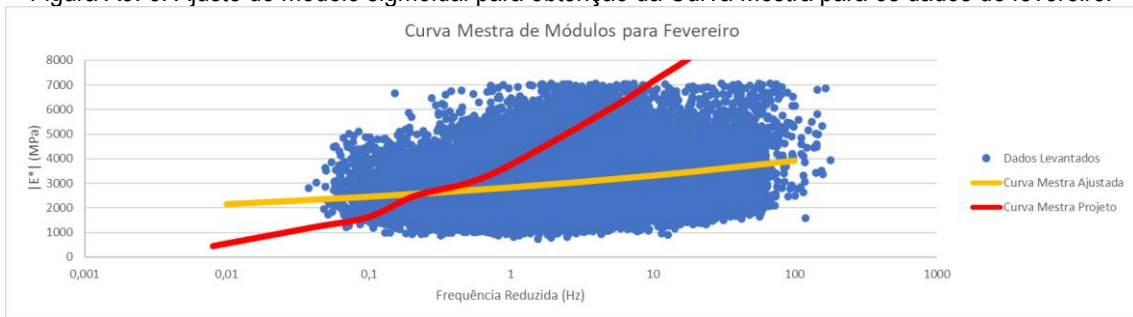
Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 2: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de janeiro.



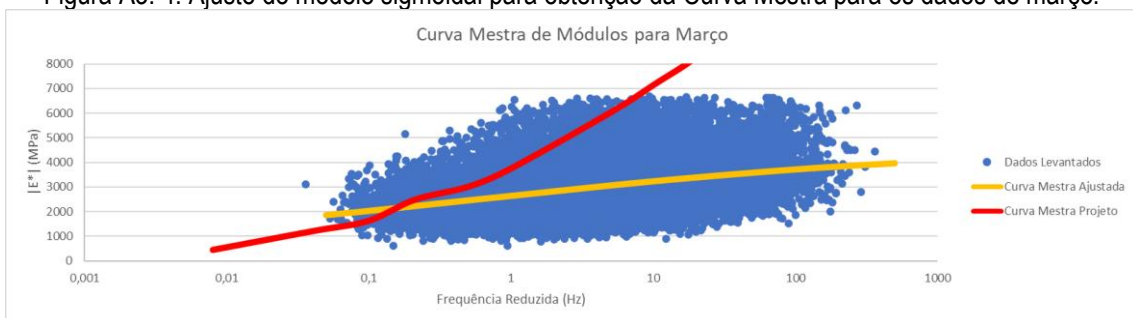
Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 3: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de fevereiro.



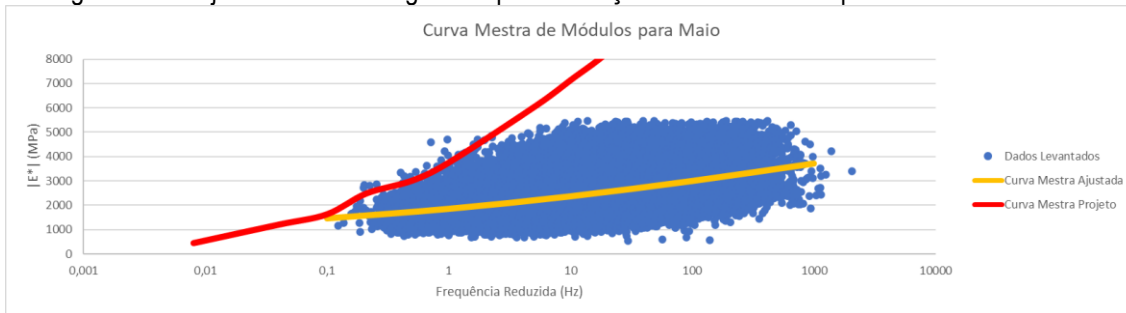
Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 4: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de março.



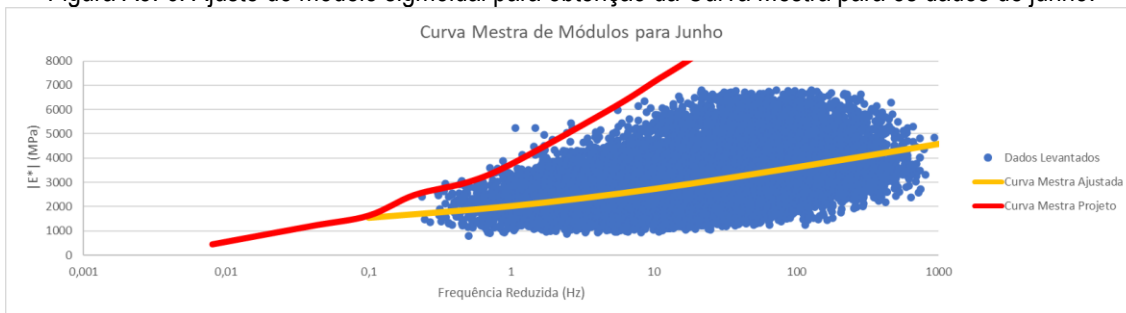
Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 5: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de maio.



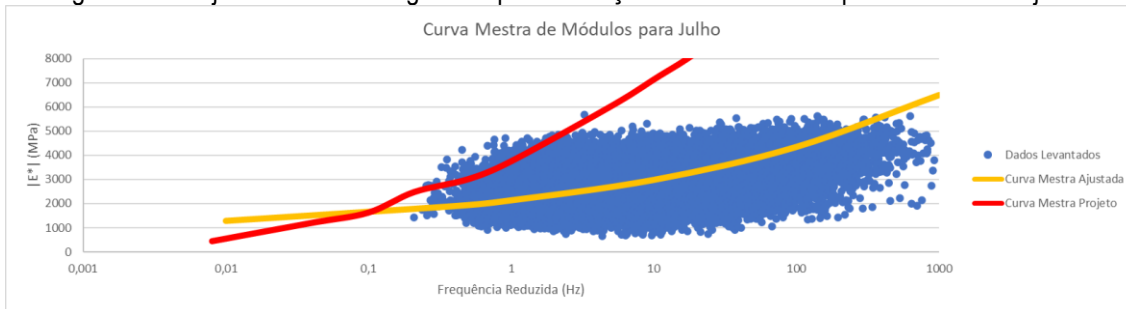
Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 6: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de junho.



Fonte: Próprio autor.

Figura A3. 7: Ajuste do modelo sigmoidal para obtenção da Curva Mestra para os dados de julho.



Fonte: Próprio autor.

Apêndice 4: Protocolo – Instrumentação para a determinação do módulo dinâmico “in situ”.

Resumo

Este protocolo descreve os procedimentos sugeridos para a determinação do módulo dinâmico “in situ” de misturas asfálticas, em uma série de temperaturas e frequências de carregamento. Aplicável a misturas asfálticas executadas em rodovias.

Prefácio

O presente protocolo foi preparado para servir como diretriz básica, visando estabelecer os procedimentos para a determinação do módulo dinâmico “in situ” de misturas asfálticas. A criação deste protocolo procede da Tese de Doutorado “Proposta de Método para determinação da Curva Mestre de misturas asfálticas “in situ”: estudo de caso de Trecho Instrumentado na BR 101 – PE”, elaborada submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Objetivo

Este protocolo consiste na leitura, através de sensores de tensão, deformação e temperatura, com a utilização de uma central de controle, das respostas apresentadas pela camada asfáltica as cargas de tráfego. As deformações longitudinais e radiais são utilizadas para calcular a deformação vertical. Os valores de módulo são então, determinados, para uma série de temperatura e frequência de carregamento, que serão ajustados numa curva mestra que caracteriza a mistura asfáltica.

Aparelhagem

Strain-gauge

O strain-gauge é um equipamento, do tipo extensômetro, que permite avaliar as informações referentes as deformações observadas na fibra de cada camada em que estiver imersa. Sugere-se a utilização de barras de ancoragem. Após a fixação das barras de ancoragem aos extensômetros com o auxílio dos rebites e da cola epóxi, necessária a realização do envelopamento completo do perfil em modelo H com a fita isolante de auto-fusão.

Célula de Tensão

Esse sensor permite avaliar as tensões aplicadas em uma camada da estrutura que está sendo investigada. Sugere-se que as leituras a serem realizadas pelos sensores atuem em aproximadamente 10% da capacidade máxima do sensor, de maneira a possibilitar melhor comportamento ao longo do tempo, em função da falta de controle das cargas atuantes na cama da asfáltica.

Sensores Temperatura

Equipamento com dois fios condutores de eletricidade que, quando unidos em uma de suas extremidades, geram tensões elétricas que podem ser medidas para indicar a variação de temperatura sofrida naquele ponto. Sugere-se a utilização de sensores LM 35 que possuem um limite de erro de 1°C ou até 0,75%.

Central de Controle

Deve ser utilizada central de controle com capacidade suficiente para a leitura de todos os sensores ao mesmo tempo, como também, com capacidade de registrar os dados a uma taxa conhecida no tempo, sugerimos a utilização de 800 leituras por segundo.

Seleção e Caracterização do Trecho

Verificação de atendimento as características intrínsecas.

Importante verificar a disponibilidade dos elementos mínimos para se garantir o bom funcionamento dos equipamentos, garantindo sua guarda e operação durante a pesquisa. Importante haver a disponibilidade de ambiente com energia elétrica, com acesso restrito e vigilância mínima, de forma a garantir a integridade dos sensores, conectores, fios e central de controle.

Cuidado na escolha do trecho a ser instrumentado, sugere-se a utilização de segmentos em tangente, de preferência com velocidade controlada, de forma a espelhar melhor o estado de tensões que ocorrerá no substrato instrumentado ao realizado em laboratório.

Dimensionamento da quantidade dos sensores

Para a quantificação dos sensores, necessário a consideração das possíveis perdas de sensores durante a execução da camada asfáltica, devido a fatores como temperatura e esforços mecânicos (compactação da camada asfáltica), como também a perda de sensores com o tempo, devido a picos de tensão, descargas elétricas e/ou desligamentos.

No estudo realizado foi possível verificar que não há controle sobre quais sensores podem apresentar falhas durante a instalação ou durante o tempo da instrumentação. Desta forma recomenda-se realizar quantas redundâncias forem necessárias, levando-se em consideração que 50% de perdas na instalação devido a execução da camada asfáltica, e uma perda de 57% dos remanescentes ao longo do tempo.

Desta forma, é prudente estimar que aproximadamente 22% dos sensores instalados realizarão leituras após o período de 365 dias, tempo de referência adotado no estudo para a determinação da curva mestra "in situ".

Calibração dos sensores

Necessária a verificação do bom funcionamento da central de controle, garantindo a capacidade de leitura e armazenamento dos dados fornecidos pelos sensores de campo. Importante garantir que não haja superposições de leituras devido ao conjunto de eixos, como também, a continuidade dos registros quando da identificação de leituras consideradas espúrias.

Outro fator importante é a boa definição de um critério para tomada de decisão da central de controle de realizar o registro da passagem do veículo. No presente Protocolo se sugere a simulação, através de um software de modelagem do comportamento mecânico de camadas (ex. o AEMC do MeDiNa), a tensão gerada por um eixo padrão simples descarregado.

Os sensores de tensão devem ser verificados em prensas hidráulicas, tendo o cuidado de utilizar superfícies que preencham toda a membrana de aço, garantindo a distribuição da carga por toda a superfície do sensor.

Para os strain-geuges importante verificar se apresentam boas respostas elétricas antes de sua utilização, de forma a minimizar o risco de falha de funcionamento devido a instalação.

Verificar se os sensores de temperatura apresentam leitura, como também o cuidado no seu manuseio, com utilização de fita isolante de auto-fusão protegendo toda a fiação do sensor, de maneira a garantir sua integridade durante a execução da camada asfáltica que será instrumentada.

Caracterização da camada a ser instrumentada

Importante fator para o conhecimento do comportamento da curva mestra “in situ” é a determinação da curva mestra em laboratório, através da Norma DNIT 416/2019 – ME. Este ensaio determinará a estimativa do comportamento da mistura em laboratório, como também fornecerá os fatores da função de transferência para as várias temperaturas de ensaio.

Instalação

Preparação dos sensores

Importante a identificação, por topografia, da trilha de roda que os veículos estarão sujeitos quando da operação do segmento instrumentado, de maneira a garantir que as cargas sejam aplicadas sobre os sensores.

Outro cuidado é na proteção mecânica dos condutores e dos fios dos sensores. Sugere-se a utilização de tubos metálicos instalados em sulcos realizados com uma serra, de forma a garantir sua proteção aos esforços dos veículos de carga. Devido as distâncias entre os sensores e a central de controle, sugere-se a construção de caixas de passagem em concreto, de maneira a fornecer a proteção mecânica das conexões, como também possibilitar manutenção quando necessário.

Instalação dos sensores

Devem ser instalados sobre a superfície limpa, com o uso de epóxi de secagem rápida para amarração, na profundidade que se deseja conhecer as tensões, deformações e temperaturas. Devem ser realizadas marcações e medidas as distâncias entre os sensores.

Antes da passagem da vibroacabadora, deve-se realizar proteção mecânica dos sensores, com a coleta de material na bandeja e espalhamento sobre os sensores, preenchendo os sulcos e os bordos dos sensores, garantindo-se a temperatura de compactação durante o processo.

Logo após a passagem da vibroacabadora devem ser realizadas leituras dos sensores, para identificar se apresentam resposta elétrica, de maneira a indicar se estão aptos a serem utilizados na central de controle.

Coleta de dados

Após a instalação dos sensores, devem ser realizadas as conexões na central de controle e, quando da liberação do tráfego, devem ser iniciados os registros das tensões e deformações que estão ocorrendo nos sensores. Nesta fase importante realizar nova bateria de calibração dos sensores. Primeiro, sugere-se a realização de levantamento deflectométrico para, através de retroanálise, realizar a estimativa dos módulos resilientes que melhor representam as bacias de deformação.

Com estes módulos conhecidos, passa-se um veículo de carga conhecida, para avaliar se as tensões que ocorrem com a passagem do veículo através de simulação computacional (AEMC por exemplo), com os módulos provenientes da retroanálise, apresentam correlação com as medidas de tensão apresentadas pelas células de carga.

Caso as tensões estejam apresentando valores adequados, inicia-se a fase de registro dos pares de tensão, deformação, temperatura e frequência.

Resultados

Esta seção apresenta o procedimento padrão para calcular o módulo dinâmico $[E^*]$, usando os dados fornecidos pelos sensores da instrumentação.

Matrizes de dados dos sensores

Os dados produzidos pela passagem de cada veículo sobre os sensores serão dispostos em matrizes, uma para a variável tempo, uma para tensão, uma para deformação.

a) Determinar as frequências

Para a determinação das frequências adota-se que o tempo de aplicação do pulso de carga é definido pela deformada das células de tensão, levando-se em consideração a frequência de captação de dados da central de controle (800/s no estudo). A frequência é então determinada pela equação:

$$f = \frac{1}{t}$$

Sendo f a frequência do carregamento (Hz) e t o tempo do pulso (s)

Figura 1 – Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso completa.

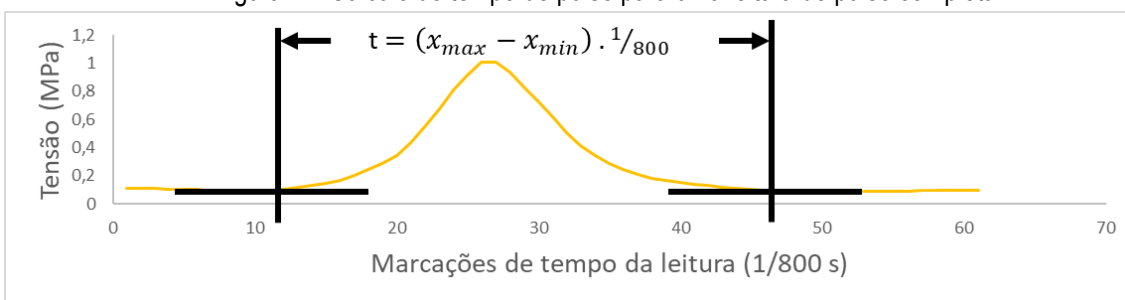
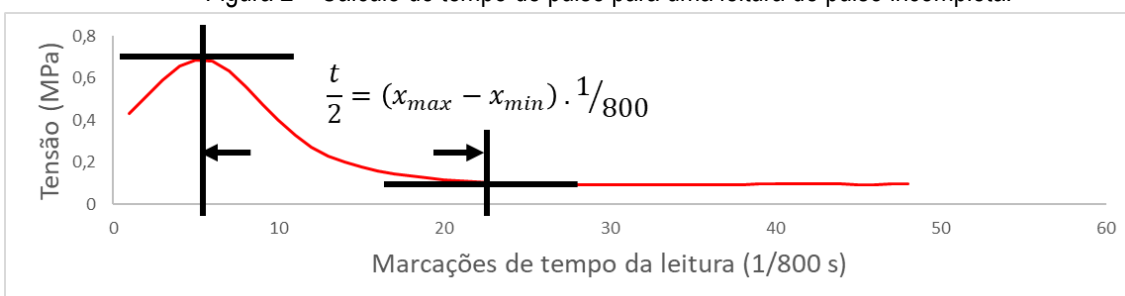


Figura 2 – Cálculo do tempo de pulso para uma leitura de pulso incompleta.



b) Determinar as frequências reduzidas

Para a construção da curva é escolhida uma temperatura de referência (T_r), em que um segmento de curva permanece fixo e os demais segmentos da curva são transladados no eixo horizontal para gerar uma única curva. A temperatura de referência na Norma DNIT 416/2019 – ME é de 20°C.

Utilizando os dados do ensaio de caracterização mecânica da camada, foram determinados os coeficientes de ajuste a_1 , a_2 e a_3 , utilizados para a determinação do fator de deslocamento a_t . Desta forma foi possível calcular as frequências reduzidas, através da equação:

$$f_r = f a_t$$

Sendo:

f_r – Frequência Reduzida

f – Frequência de aplicação do pulso de carga

a_t – Fator de deslocamento.

Uma vez que:

$$\log a_t = a_1 T^2 + a_2 T + a_3$$

Desta forma, os pares de temperatura e frequência se transformam em uma matriz de frequências reduzidas, que serão utilizadas no ajuste da curva.

c) Determinar os módulos dinâmicos.

De posse dos pares de tensão e deformação, torna-se possível a determinação dos módulos dinâmicos através da equação:

$$|E^*| = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v}$$

Sendo:

$|E^*|$ – Módulo Dinâmico para a condição P, S e T (carga, tempo e temperatura no instante da medição dos equipamentos)

σ_v – Tensão vertical

ε_v – Deformação Vertical

Para a medida das deformações verticais, foi utilizado o coeficiente de Poisson, que estabelece a correlação existente entre as deformações axiais e as deformações longitudinais conforme a equação abaixo:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$

Sendo ε_j a deformação vertical e ε_i a deformação transversal.

Em virtude da pouca variação dos valores calculados devido a variação do coeficiente de Poisson em função da temperatura e frequência da aplicação de carga, recomenda-se a utilização do coeficiente de Poisson constante e idêntico ao adotado no ensaio de laboratório, comumente o valor de 0,30.

Uma vez que foram realizadas leituras de deformação longitudinal e transversal, devido a consideração do efeito linear do comportamento do material, sugere-se adotar a média entre estas deformações para cada par de temperatura, frequência e tensão e calcular a deformação vertical.

De posse da deformação vertical, calcula-se o módulo dinâmico.

Curva Mestre “in situ”

Determina-se a curva mestra “in situ” através da regressão não-linear dos pares de frequência reduzida e módulos dinâmicos ao modelo sigmoidal abaixo:

$$\log|\hat{E}^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}}$$

Sendo

$|E^*|$ - Módulo dinâmico determinado pelos sensores

f_r – frequência reduzida

δ , α , β e γ – fatores de ajuste