



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UAEC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA

Área de Concentração: Geotecnia

CHRISTIAN RAFAEL ZIEGLER

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM
TRECHO DA BR 101 EM PERNAMBUCO COM O AUXÍLIO
DE INSTRUMENTAÇÃO *IN SITU***

Campina Grande – PB

Janeiro/2021

CHRISTIAN RAFAEL ZIEGLER

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DA BR
101 EM PERNAMBUCO COM O AUXÍLIO DE INSTRUMENTAÇÃO *IN
SITU***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre (Msc) em Engenharia Civil e Ambiental

Área de concentração: Geotécnica

Orientador: D. Sc. John Kennedy Guedes Rodrigues
Co-orientador: D. Sc. Jonny Dantas Patricio

Campina Grande – PB
Janeiro/2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOR: CHRISTIAN RAFAEL ZIEGLER

TÍTULO: ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DA BR 101 EM
PERNAMBUCO COM O AUXÍLIO DE INSTRUMENTAÇÃO *IN SITU*

Área de Concentração: Geotécnica

Dissertação defendida em: ___/___/____

Dissertação aprovada em: ___/___/____

Pela Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

D. Sc. (Coorientador) Jonny Dantas Patricio
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. D. Sc. (Examinador Interno) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. D. Sc. (Examinador Externo) Lélío Antônio Teixeira Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Campina Grande – PB
Janeiro/2021

Z66a

Ziegler, Christian Rafael.

Análise do desempenho estrutural de um trecho da BR 101 em Pernambuco com o auxílio de instrumentação *In Situ* / Christian Rafael Ziegler. - Campina Grande, 2021.

98 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. Dr. Jonny Dantas Patricio".

Referências.

1. Sistema de Análise Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. 2. Medição de Deformação, Tensão e Temperatura. 3. Instrumentos Medidores. 4. Retroanálise. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Patricio, Jonny Dantas. III. Título.

CDU 624.13(043)

RESUMO

A necessidade do desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de análise estrutural dos pavimentos flexíveis possibilitou o surgimento de novos instrumentos de avaliação do seu desempenho mecânico. A instrumentação fundamenta-se na instalação de aparelhos medidores dos tipos *strain gages*, células de tensão e termopares. Estes, possibilitam a medição de deformação, tensão e temperatura, viabilizando uma análise aprofundada acerca da estrutura do pavimento e de suas patologias desenvolvidas. Esta pesquisa tem o objetivo de analisar o desempenho estrutural de um trecho reestruturado da BR-101 na cidade de Recife por meio da instrumentação do pavimento. Para tanto, foi feita uma caracterização funcional e mecânica dos diferentes tipos de misturas asfálticas utilizados. Posteriormente foram instalados instrumentos medidores em diferentes camadas do pavimento e desenvolvido um *software* para a filtragem e organização dos dados recebidos pelas leituras registradas para cada veículo. Por fim, foi realizada a avaliação estrutural não destrutiva por meio do aparelho FWD. Os resultados foram satisfatórios para a instalação dos instrumentos medidores com uma taxa de funcionamento de 57% para os *strain gages* e 50% das células de tensão e termopares. Os valores de deformação foram da ordem de 330 a 380 $\mu\epsilon$ e a pressão vertical de cerca de 420 kPa. Comparando-se valores médios obtidos na instrumentação com os calculados na retroanálise, notou-se resultados similares entre as deformações e tensões encontradas. Portanto, a utilização da instrumentação *in situ* se provou como um artifício de grande valor para a análise do desempenho estrutural do pavimento estudado, demonstrando valores de tensão e deformação similares aos encontrados na utilização de outros métodos de análise.

Palavras-chave: Análise estrutural, Deformação, Tensão, Instrumentos medidores, retroanálise.

ABSTRACT

The need to develop and improve structural analysis systems for flexible pavements enabled the emergence of new evaluation methods of its mechanical behavior. Instrumentation is based on install strain gages, pressure cells and thermostats. These, make it possible to measure strain, stress and temperature, enabling a deeper analysis of pavement structures and its developed pathologies. This research aims to analyze the structural performance of a restructured stretch of BR-101 in Recife, by means of pavements instrumentation. Thereunto, a functional and mechanical characterization of the different asphalt mixture types was made. Subsequently, measuring instruments were installed in different layers of the pavement and a software was developed to filter and organize the received data from the recorded readings of each vehicle. Finally, a non-destructive structural evaluation was performed using the FWD device. Results were satisfactory for the installation of measuring instruments with an operating rate of 57% for the strain gages and 50% for tension cells and thermostats. Strain values were in range of 330 to 380 $\mu\epsilon$ and vertical pressure was about 420 kPa. Comparing the average values obtained in the instrumentation with those calculated in the retroanalysis, similar results were noted between deformation and stress. Therefore, using instrumentation proved to be a valuable device to analyze structural performance of this pavement, demonstrating similar stress and deformation values to those found in other analysis methods.

Key-words: Structural analysis, Deformation, Stress, Measuring instruments, Retroanalysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transmissão de cargas em pavimentos rígidos x flexíveis	20
Figura 2 - Deformações medidas no revestimento do pavimento asfáltico	21
Figura 3 - Distribuição de tensões no pavimento asfáltico	22
Figura 4 - Trincas e afundamentos causados nos pavimentos flexíveis	23
Figura 5 - Outros defeitos causados nos pavimentos flexíveis	23
Figura 6 - Trinca isolada - transversal.....	24
Figura 7 - Trinca isolada - longitudinal.....	24
Figura 8 - Trinca interligada – tipo jacaré.....	24
Figura 9 - Trinca interligada – tipo bloco	24
Figura 10 - Afundamento de trilha de roda	24
Figura 11 - Afundamento local	24
Figura 12 - Ondulação.....	25
Figura 13 - Exsudação.....	25
Figura 14 - Escorregamento	25
Figura 15 - Panela/buraco	25
Figura 16 - Desgaste	26
Figura 17 - Estágios existentes no processo de fadiga	27
Figura 18 - Fatores que influenciam no comportamento à fadiga de pavimentos asfálticos	28
Figura 19 - Configurações para ensaios de fadiga em misturas asfálticas	29
Figura 20 - Corpos de prova antes, durante e após a ruptura	30
Figura 21 - Configuração e distribuição de tensões no ensaio fadiga à flexão em vigas 4 pontos	31
Figura 22 - Aparato de colagem do corpo de prova nos pratos fixadores.....	32
Figura 23 - Prensa AMPT utilizada para a realização do ensaio.....	32
Figura 24 - Queda do ângulo de fase durante o ensaio de tração compressão direta	33
Figura 25 - Deformação permanente no revestimento (trilha de roda esquerda) e em todas as camadas (trilha de roda direita).....	34
Figura 26 - Influência dos agregados e do ligante nas patologias de misturas asfálticas.....	35
Figura 27 - Equipamento e arranjo experimental do ensaio de creep estático	36
Figura 28 - Resultado típico da função fluência no ensaio de creep estático.....	37
Figura 29 - Deformação plástica vertical acumulada versus número de ciclos	38
Figura 30 - LCPC do laboratório de pavimentação da USP	39
Figura 31 - Placas de misturas asfálticas compactadas	40
Figura 32 - Asphalt Pavement Analyzer	40
Figura 33 - Dados para retroanálise de um pavimento.....	42
Figura 34 - Treliça para medição das flechas da trilha de roda.....	43
Figura 35 - Pêndulo britânico do laboratório de engenharia de pavimentos	44
Figura 36 - Método da mancha de areia.....	45
Figura 37 - Esquema da viga Benkelman.....	46
Figura 38 - Esquema de leituras com a viga Benkelman	47
Figura 39 - Falling weight deflectometer	48
Figura 40 - Instrumentação utilizada no projeto NCAT	51
Figura 41 - Heavy Vehicle Simulator	52
Figura 42 - Configuração da instrumentação das pistas experimentais do LAPAV-UFRGS	53
Figura 43 - Posição relativa dos sensores em cada camada e arranjo dos strain gages.....	53
Figura 44 - Vista superior do trecho da BR – 116	54

Figura 45 - Sistema de proteção em perfil H	56
Figura 46 - Informações comerciais dos extensômetros adquiridos da marca Kyowa	56
Figura 47 - Células de tensão adquiridas	57
Figuras 48 -(a) e (b): Sistema de aquisição de dados	58
Figura 49 - Localização do trecho monitorado	59
Figura 50 - Croqui do posicionamento das juntas de dilatação onde foram instalados strain gages sob a camada do binder	61
Figura 51 - Croqui representativo da área sem utilização de geogrelha	61
Figura 52 - Croqui da instalação dos sensores entre as novas camadas do binder e do revestimento	62
Figura 53 - Recebimento dos instrumentos, conferência e verificação de sinais	62
Figura 54 - Passagem da fiação	63
Figura 55 - Preparação para colagem	63
Figura 56 - Colagem dos strain gages	63
Figura 57 - Colagem dos strain gages	63
Figura 58 - Aplicação de emulsão	63
Figura 59 - Aplicação de massa asfáltica passante na peneira N°4 para proteção mecânica dos sensores	64
Figura 60 - Cobertura dos sensores com massa asfáltica	64
Figura 61 - Passagem da acabadora	64
Figura 62 - Passagem do rolo compactador	64
Figura 63 - Verificação do funcionamento dos sensores após a instalação	64
Figura 64 - Marcação do eixo da trilha de roda	64
Figura 65 - Colagem dos sensores	65
Figura 66 - Aplicação de emulsão e massa asfáltica fina	65
Figura 67 - Aplicação de massa asfáltica para proteção dos sensores	65
Figura 68 - Passagem da acabadora	65
Figura 69 - Ciclos versus deformação plástica - Faixa B	66
Figura 70 - Ciclos versus deformação plástica - Faixa C	67
Figura 71 - Curva mestra - Faixa B	68
Figura 72 - Curva mestra - Faixa C	68
Figura 73 - Sensores instalados com sua respectiva legenda	72
Figura 74 - Leituras dos sensores dos canais no sistema de aquisição de dados	74
Figura 75 : Trecho experimental analisado com o FWD	75
Figura 76 - Deformação Longitudinal	76
Figura 77 - Deformação a 45°	76
Figura 78 - Deformação Transversal	77
Figura 79 - Pressão vertical	77
Figura 80 - Variação diária da temperatura a 40 mm de profundidade	78
Figura 81 - Variação diária da temperatura a 160 mm de profundidade	78
Figura 82 - Bacia deflectométrica I (41 KN)	79
Figura 83 - Bacia deflectométrica II (41 KN)	80
Figura 84 - Bacia deflectométrica III (41 KN)	80
Figura 85 - Bacia deflectométrica I (81 KN)	81
Figura 86 - Bacia deflectométrica II (81 KN)	82
Figura 87 - Deformações no período entre 06 e 12 de Janeiro	84
Figura 88 - Pressão vertical no período entre 06 e 12 de Janeiro	85
Figura 89 - Comparação entre a Deformação Longitudinal	85

Figura 90 - Comparação entre a Deformação Transversal.....	86
Figura 91 - Comparação entre a Pressão Vertical	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência a derrapagem utilizando o método do pêndulo britânico.....	44
Tabela 2 - Avaliação da macrotextura do pavimento através do método da altura da areia	46
Tabela 3 - Características das camadas do pavimento monitorado	60
Tabela 4 - Módulos de resiliência das faixas B e C	66
Tabela 5 - Flow Number das Faixas B e C.....	67
Tabela 6 - Resistência a derrapagem através do método do pêndulo britânico.....	69
Tabela 7 - Alturas médias da mancha de areia	70
Tabela 8 - Inventário dos canais associados aos strain gages	72
Tabela 9 - Inventário dos canais associados as células de carga	73
Tabela 10 - Inventário dos canais associados aos termopares.....	73
Tabela 11 - Módulos de resiliência das camadas (41 KN).....	81
Tabela 12 - Módulos de resiliência das camadas (81 KN).....	82
Tabela 13 - Valores de deformação e pressão vertical estimados pelo AEMC a 4 cm de profundidade	83
Tabela 14 - Valores de deformação e pressão vertical estimados pelo AEMC a 16 cm de profundidade	83
Tabela 15 - Deformações e pressão vertical entre 06 e 12 de Janeiro.....	84

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

%	Percentual
°C	Graus Celsius
E*	Módulo Dinâmico
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AEMC	Análise Elástica de Multiplas Camadas
AFNOR	Association Française de Normalisation
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester
APA	Asphalt Pavement Analyzer
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAM	Cracking Activity Meter
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CH	Canal
cm	Centímetro
cm ²	Centímetros Quadrados
CP	Corpo de Prova
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DASR	Dominant Aggregate Size Range
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E N	European Standards
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FWD	Falling Weight Deflectometer
HVS	Heavy Vehicle Simulator
HS	Altura de Areia
Hz	Hertz
I	Integridade
IGG	Indice de Gravidade Global
ISC	Indice de Suporte California
Kgf	Quilograma Força
Kn	Quilo Newton
KPa	Quilo Pascal
LAPAV	Laboratório de Pavimentação - UFRGS
LCPC	Laboratoire Central et Chaussées
LWD	Light Weight Deflectometer
MDD	Multh-Deph Deflectometer

MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
mm	Milímetros
Mn/DOT	Department of Transportation of Minnessota
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
NCAT	National Center for Asphalt Technology
OAE	Obra de Arte Especial
PG	Performance Grade
RMS	Raíz Média Quadratica
RT	Resistência a Tração por Compressão Diametral
s	Segundo
S	Dano
S-VECD	Simplified Viscoelastic Continuum Damage
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USP	Universidade de São Paulo
VDOT	Virginia Department of Transportation
VRD	Valor de Resistência a Derrapagem
z	Profundidade
σ	Tensão
μ	Micro
$\mu\epsilon$	Micro Strain
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
Objetivos	17
1.1 Objetivo geral	17
1.2 Objetivos específicos	17
1.3 Organização do trabalho	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Carregamentos em pavimentos flexíveis	19
2.2 Desenvolvimento das tensões nos pavimentos.....	21
2.3 Patologias das misturas asfálticas	22
2.4 O fenômeno da degradação do pavimento por fadiga	26
2.4.1 Ensaio laboratoriais para avaliação do fenômeno da fadiga	28
2.4.1.1 Ensaio de fadiga a tração indireta por compressão diametral.....	29
2.4.1.2 Ensaio de flexão em viga 4 pontos.....	30
2.4.1.3 Ensaio de tração-compressão direta.....	31
2.5 Deformação permanente em trilhas de rodas	33
2.5.1 Ensaio laboratoriais para avaliação da deformação permanente	35
2.5.1.1 <i>Creep</i> estático	36
2.5.1.2 <i>Creep</i> dinâmico	37
2.5.1.3 Simuladores de tráfego em laboratório	38
2.6 Avaliações funcionais e estruturais dos pavimentos asfálticos.....	41
2.6.1 Ensaio <i>in situ</i> para avaliação funcional e estrutural do pavimento.....	42
2.6.1.1 Método da Treliça metálica	42
2.6.1.2 Método do Pêndulo britânico	43
2.6.1.3 Método da mancha de areia	45
2.6.1.4 Método da viga Benkelman	46
2.6.1.5 Método do FWD (<i>Falling Weight Deflectometer</i>).....	47
2.7 Instrumentação mecânica de pavimentos flexíveis.....	48
2.6.1 Instrumentação em campo – Estado da arte.....	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 Materiais	55
3.1.1 <i>Strain gage</i>	55
3.1.2 Células de tensão	57
3.1.3 Termopares	57

3.1.4	Sistema de aquisição de dados.....	58
3.2	Métodos	59
3.2.1	Seleção e características do trecho experimental	59
3.2.2	Etapas da instalação do sistema de instrumentação	62
3.2.3	Caracterização mecânica	65
3.2.3.1	Módulo de Resiliência	65
3.2.3.2	<i>Flow Number</i>	66
3.2.3.3	Módulo Dinâmico	68
3.2.4	Caracterização funcional.....	69
3.2.4.1	Pêndulo britânico	69
3.2.4.2	Mancha de areia	70
3.2.5	Desenvolvimento do <i>software</i> para o tratamento dos dados.....	70
3.2.6	Validação do sistema de instrumentação	71
3.2.7	Retroanálise das deflexões com o auxílio do FWD	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1	Resultados primários da instrumentação.....	76
4.2	Retroanálise dos levantamentos do FWD	79
4.3	Tensões e deformações estimadas	82
4.4	Tensões e deformações medidas através da instrumentação.....	83
5	CONCLUSÕES	87
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	ANEXOS	96

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis no Brasil são objetivo de inúmeras pesquisas, principalmente em relação à sua capacidade estrutural. A metodologia de dimensionamento vigente até o ano de 2020 foi criada e desenvolvida no ano de 1966 pelo engenheiro Murillo Lopez de Souza, baseando-se no método CBR (*california bearing ration*), utilizado nos Estados Unidos desde primórdios da década de 1920 (Silva, 2018). Devido à natureza empírica e arcaica da metodologia de dimensionamento até o ano de 2020, notou-se uma necessidade de desenvolver procedimentos mais atualizados, considerando propriedades fundamentais das misturas asfálticas, utilizando-se assim técnicas mecanístico-empíricas.

Para tal fim, foi desenvolvido por Franco (2007) o método de dimensionamento MeDiNa (método de dimensionamento nacional) que passará a entrar em vigência no ano de 2021. Este método busca dimensionar os pavimentos asfálticos levando-se em consideração o desenvolvimento de patologias no pavimento, tais como, o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Pesquisas como a de Nascimento (2015) e a de Fritzen (2016) foram realizadas com o intuito de desenvolver funções de transferência campo-laboratório para a calibração da nova metodologia de dimensionamento.

Além do desenvolvimento do dimensionamento em pavimentos asfálticos, existe também a necessidade de se ampliar técnicas para o acompanhamento e avaliação da qualidade da estrutura construída. Atualmente tem-se como técnicas bem estabelecidas de avaliação estrutural não-destrutiva o método da viga Benkelman, o FWD (*Falling weight deflectometer*) e o *Dynaflect*. Consequentemente, desde a metade do século passado, têm surgido um instrumento calibrador campo x laboratório para o entendimento do desempenho estrutural do pavimento.

A instrumentação consiste na instalação de *strain gages* e células de tensão abaixo da camada do revestimento, para avaliar a deformação e a tensão aplicada, respectivamente. Através da instrumentação é possível analisar e comparar as tensões e patologias desenvolvidas no pavimento com as técnicas existentes. No Brasil, as primeiras experiências utilizando a instrumentação foram realizadas durante o projeto de Silva e Motta (1999) e posteriormente por pesquisadores como Gonçalves (2002), a

Universidade Federal de Santa Catarina (2008), Bastos (2016), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2017) e Colpo (2019).

Outra problemática estudada nos pavimentos asfálticos é a correta conservação e restauração das estruturas. Barca e Nogueira (2015) pontuam que as rodovias necessitam de intervenções, motivadas não somente pelos materiais utilizados e sua vida útil de projeto, mas também por fatores como a má execução da obra, falha de projeto e variação de condições ambientais.

Logo, o recapeamento de pavimentos existentes tem sido utilizado cada vez mais como solução para a restauração das estruturas. Dentre as metodologias de recapeamento se destaca o “*Whitetopping*“. De acordo com Sanchez e Cancian (2012), *Whitetopping* se trata do recapeamento do pavimento asfáltico com uma camada de um pavimento de concreto Portland, tornando-se o concreto a capa e o asfalto a base.

Nesta pesquisa utilizou-se a reestruturação do pavimento flexível sobre o pavimento rígido como base, aplicando-se uma malha sintética, a geogrelha. Esta, que possui a função de transferência de tensões para evitar a propagação das trincas surgidas através na base para a camada de revestimento.

Desta forma entende-se a profunda necessidade do aprimoramento e desenvolvimento dos sistemas de análise estrutural dos pavimentos asfálticos através da instrumentação “*in situ*“. Além disso, a pesquisa também propõe avaliar a viabilidade da utilização da reestruturação do pavimento flexível sob a base de concreto, com o uso de malhas de geogrelhas como solução para a restauração de um trecho da BR-101 na cidade de Recife.

Objetivos

1.1 Objetivo geral

Essa pesquisa tem como objetivo principal analisar o desempenho estrutural de um trecho restaurado da BR-101 na cidade de Recife por meio da instrumentação do pavimento.

1.2 Objetivos específicos

- Definir as características funcionais e mecânicas do trecho restaurado da BR-101;
- Instalar extensômetros dos tipos *strain gage*, célula de tensão e termostato no trecho experimental e verificar a sua funcionalidade;
- Desenvolver um *software* para a análise e filtragem dos dados coletados a partir da instrumentação;
- Avaliar de forma comparativa as tensões e deformações obtidas pela instrumentação com modelos numéricos.

1.3 Organização do trabalho

Essa dissertação é composta por 5 capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

- Capítulo 1 – composto por Introdução, Objetivos e Organização do trabalho;
- Capítulo 2 – é concebida pela Fundamentação Teórica, que trata de assuntos relevantes a esta pesquisa, tais como: desenvolvimento de carregamentos em pavimentos flexíveis, patologias dos pavimentos flexíveis, ensaios laboratoriais para análise e dimensionamento dos pavimentos, instrumentação *in situ*;
- Capítulo 3 – consiste na descrição das metodologias e procedimentos utilizados, bem como dos materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa;
- Capítulo 4 – são apresentados os resultados obtidos com as análises realizadas a partir dos procedimentos utilizados;
- Capítulo 5 – este capítulo descreve as conclusões da presente pesquisa, bem como traz sugestões para pesquisas futuras acerca do tema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Carregamentos em pavimentos flexíveis

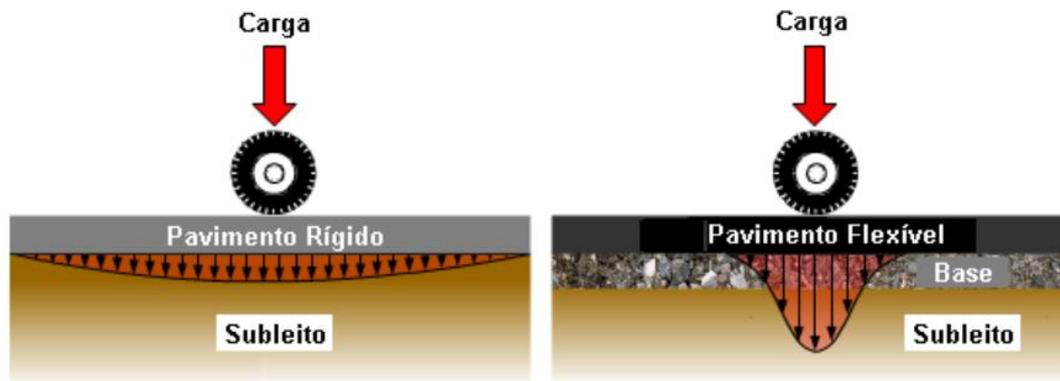
Os pavimentos rodoviários são compostos por múltiplas camadas capazes de suportar as diversas cargas e intempéries sobre elas impostas. Além disso, possuem a obrigação de atender a certos critérios de performance, tais como, durabilidade, impermeabilização, conforto, entre outros.

De acordo com Colpo (2019), outro fator importante a ser analisado são os tipos de carregamentos impostos sobre o pavimento. Enquanto outras obras de engenharia possuem uma maior preocupação com as cargas fixas, na engenharia de pavimentação, as cargas mais importantes são as cargas móveis. Estas que desenvolvem na estrutura tensões cisalhantes, de compressão e de tração, geradas pela passagem dos eixos dos veículos.

As estruturas dos pavimentos podem ser classificadas em rígidas e flexíveis. Onde os pavimentos rígidos são aqueles compostos de concreto de cimento Portland e suas subcamadas, e os pavimentos flexíveis são aqueles compostos pelos diversos concretos asfálticos de petróleo e camadas adjacentes.

Bernucci et al., (2008) afirmam que os pavimentos de concreto de cimento Portland, devido a sua elevada rigidez do revestimento em relação as demais camadas, possuem cargas de superfície distribuídas em uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, o que diminui drasticamente 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 1.

Figura 1 - Transmissão de cargas em pavimentos rígidos x flexíveis



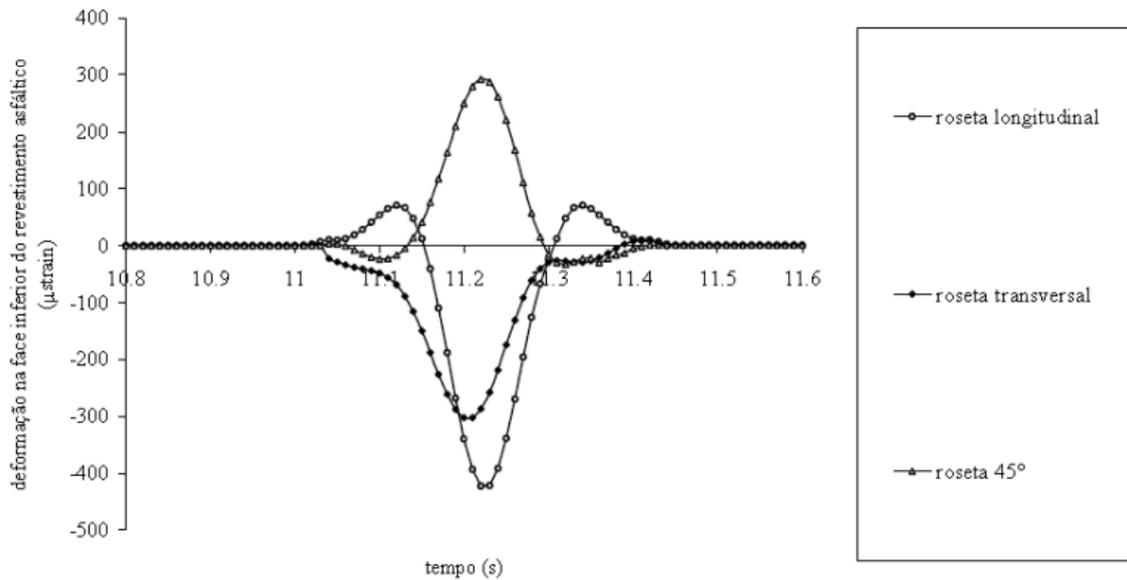
Fonte: Adaptado de *Bernucci et al., 2008*.

Devido à maior distribuição de esforços entre as diferentes camadas dos pavimentos asfálticos, existe uma maior preocupação em definir as deflexões que propiciem uma melhor interação entre as mesmas. Esta metodologia é chamada de compatibilização de camadas e é amplamente utilizado para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis nos dias atuais.

A definição em laboratório e em campo para estes níveis deflectométricos não é nada fácil, devido à natureza dos solos e dos pavimentos flexíveis não ser puramente elástica. Em laboratório, por muitos anos dimensionou-se as estruturas de fundações dos solos do pavimento através do índice de suporte Califórnia e mais recentemente através do ensaio de módulo de resiliência. Já a estrutura do pavimento flexível é também mais recentemente dimensionada através do módulo de resiliência, buscando-se assim, uma solução elástica para este tipo de construção.

Nota-se uma necessidade de um estudo mais aprofundado em campo para um melhor entendimento sobre como as solicitações sobre o pavimento se comportam na prática. Pioneiramente no Brasil, Gonçalves (2002) utilizou a instrumentação, onde foram instalados *strain gages* para leitura de deflexões, nas direções transversal, longitudinal e a 45° do sentido da passagem do eixo dos veículos. A Figura 2 demonstra algumas deformações medidas pelo autor.

Figura 2 - Deformações medidas no revestimento do pavimento asfáltico



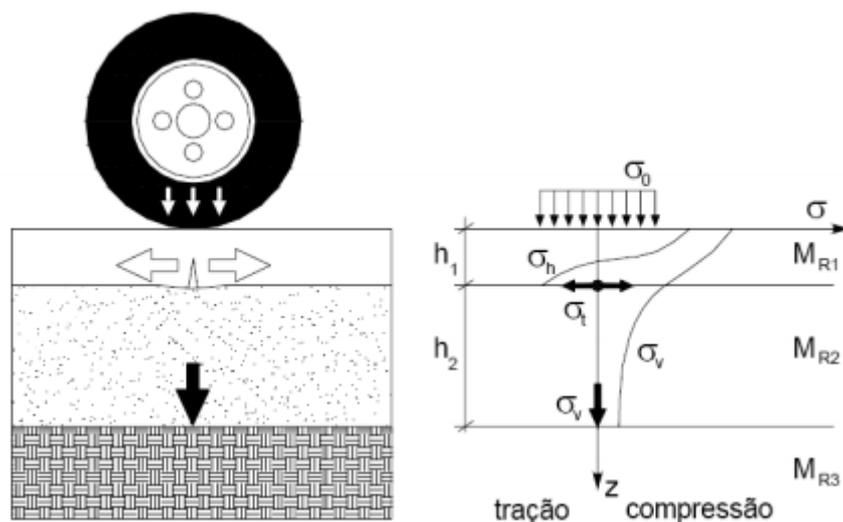
Fonte: Gonçalves, 2002.

No estudo foi observado que os *strain gages* na direção longitudinal possuem tanto esforços de tração como de compressão, enquanto que na direção transversal, possuem esforços apenas de tração. Comportamento que já era observado através de diferentes pesquisas no exterior, como a de Loulizi et al., (2001). Pode-se inferir também que geralmente os esforços de tração, abaixo da linha neutra do pavimento, são maiores devido a maiores deflexões observadas, tornando este esforço o mais prejudicial para o pavimento asfáltico.

2.2 Desenvolvimento das tensões nos pavimentos

De acordo com Medina e Motta (2015), as tensões geradas nas estruturas do pavimento iniciam-se no topo da fibra do revestimento devido às solicitações verticais repetidas dos veículos. Devido a estas cargas verticais, surgem tensões de compressão na fibra superior e de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição de tensões no pavimento asfáltico



Fonte: Medina e Motta, 2015.

O ciclo contínuo de carregamento e descarregamento provoca a deterioração do pavimento devido ao surgimento de microtrincas na base do revestimento asfáltico, que posteriormente, se propagam até o topo, ocasionando a total ruptura da estrutura.

Também de acordo com a Figura 3, pode-se observar que os veículos geram uma carga de compressão sobre as camadas inferiores ao revestimento asfáltico, o que também pode causar danos pelo afundamento da estrutura.

2.3 Patologias das misturas asfálticas

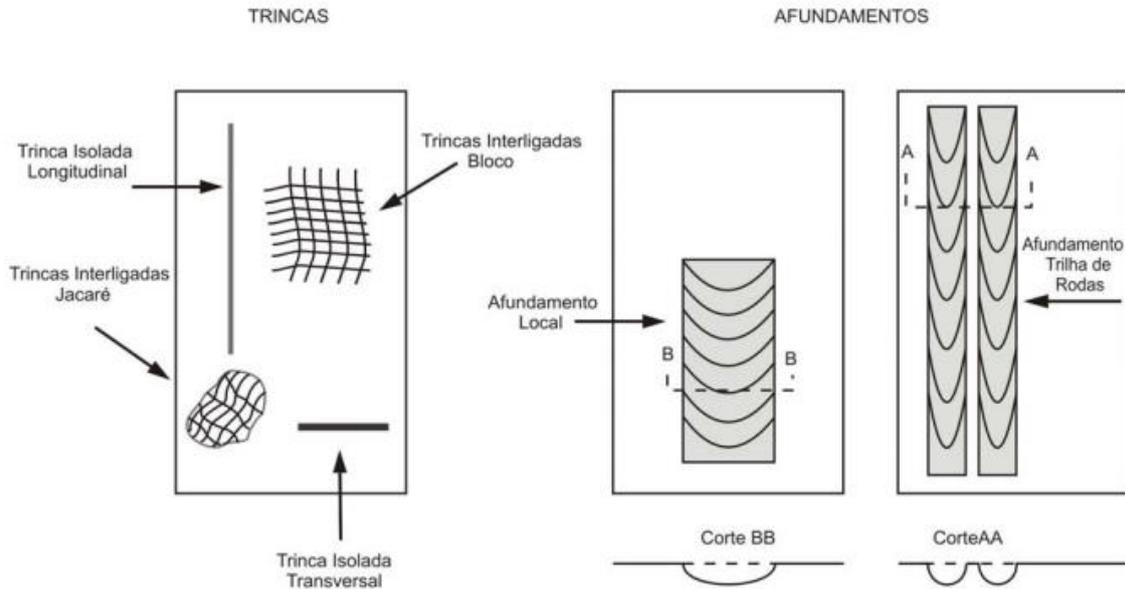
O manual de restauração de pavimentos rodoviários do DNIT (2006) tem como objetivo apresentar elementos técnicos para a identificação das patologias, além da quantificação e análises das deteriorações já existentes. Estes defeitos nos pavimentos flexíveis são gerados devido aos diversos carregamentos submetidos, além também das intempéries, qualidade dos insumos e das técnicas de construção (Machado, 2013).

As principais causas e defeitos de acordo com a norma DNIT 005/2003 podem ser subdivididos e classificados em:

- Trincamento por fadiga - fenda, fissura, trinca transversal, trinca longitudinal, trinca tipo couro de jacaré e trinca tipo bloco;
- Trincamento térmico - trinca térmica;
- Deformação permanente – afundamento plástico e afundamento de consolidação;
- Outros defeitos por diversas causas – ondulação ou corrugação, escorregamento, exsudação, panela ou buraco, remendo.

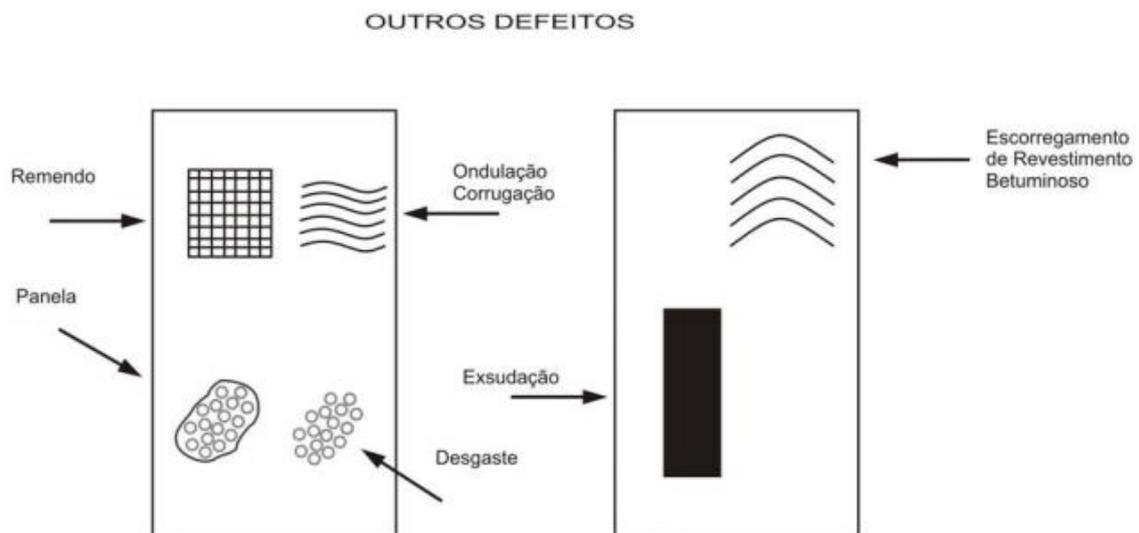
As Figuras 4 e 5 demonstram esquematicamente como ocorrem estes defeitos na superfície dos pavimentos flexíveis.

Figura 4 - Trincas e afundamentos causados nos pavimentos flexíveis



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 5 - Outros defeitos causados nos pavimentos flexíveis



Fonte: DNIT 005/2003.

A seguir podem ser vistas representações gráficas das Figuras 6 a 16 dos defeitos nos pavimentos segundo o DNIT 005/2003 em campo (DAER-RS, 1978).

Figura 6 - Trinca isolada - transversal



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 7 - Trinca isolada - longitudinal



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 8 - Trinca interligada – tipo jacaré



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 9 - Trinca interligada – tipo bloco



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 10 - Afundamento de trilha de roda



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 11 - Afundamento local



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 12 - Ondulação



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 13 - Exsudação



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 14 - Escorregamento



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 15 - Painela/buraco



Fonte: DNIT 005/2003.

Figura 16 - Desgaste



Fonte: DNIT 005/2003.

2.4 O fenômeno da degradação do pavimento por fadiga

A fadiga ocorre devido a repetidos carregamentos gerados pelo tráfego. Este fenômeno se inicia na base da camada de rolamento através do surgimento de microtrincas devido a carregamentos de tração e compressão. Com a repetição das solicitações do tráfego, além de fatores climáticos, como a entrada de água nas fendas criadas e fatores térmicos de dilatação e retração, estas microtrincas vão se desenvolvendo em macrotrincas, que são mais visíveis (Mocelin, 2018).

Reconhecidamente, a fadiga é considerada um dos principais fenômenos de degradação dos pavimentos asfálticos, além de demandar onerosos recursos de manutenção dos mesmos. Por estes fatores, Nascimento (2015) afirma que o trincamento por fadiga se trata do principal fenômeno patológico em pavimentos asfálticos no Brasil.

O primeiro estudo acerca da fadiga foi feito pelo administrador alemão Wilhelm Albert (1838), que observou o rompimento de correntes de aço de uma mina em que trabalhava, posteriormente construindo uma máquina para aplicar cargas cíclicas nestas correntes. Adiante, Wöhler (1870) concentrou os seus trabalhos na aplicação de cargas cíclicas, menores do que a de falha, em materiais metálicos, até a obtenção da sua ruptura. Ele notou que quanto maior for a amplitude de tensões, menor será a vida útil do material, representada pelos ciclos até a sua ruptura.

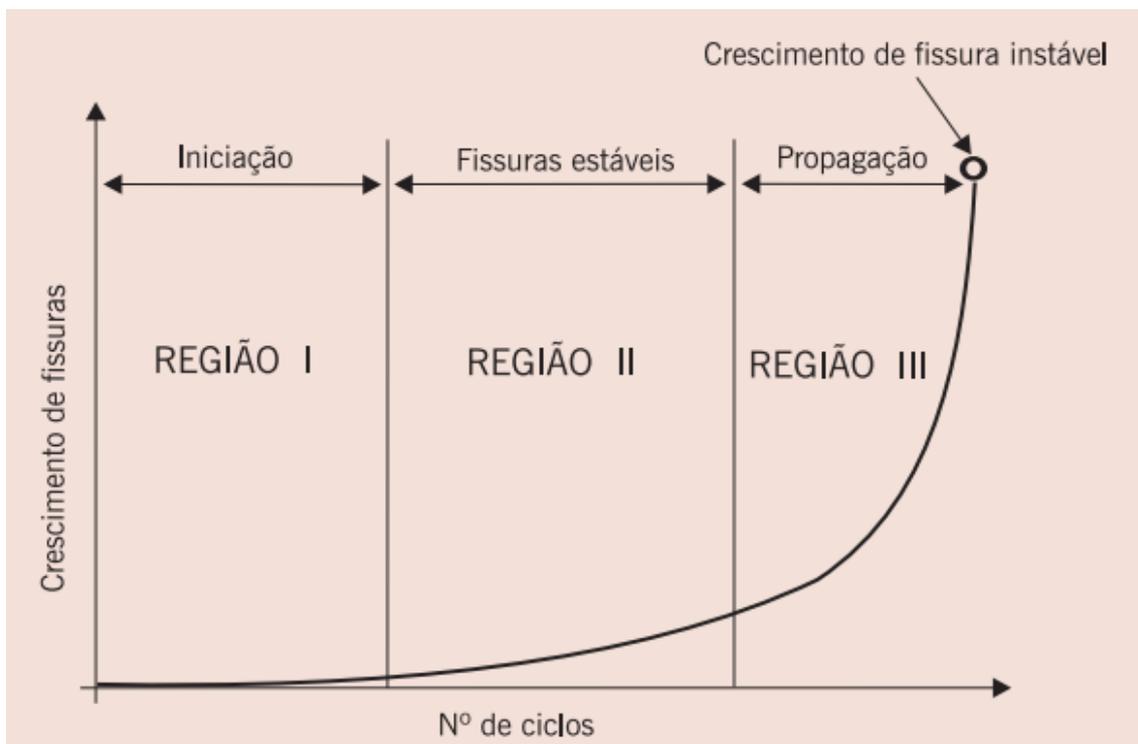
Segundo Colpo (2019), o revestimento asfáltico não possui uma ruptura frágil, como ocorre no concreto de cimento Portland. Isto ocorre devido a sua natureza viscoelástica. Conforme ocorre a propagação das trincas, o material vai perdendo a sua estabilidade estrutural até que acabe a sua vida útil.

Bernucci et al., (2008), afirma que estruturas sob carregamento cíclico, podem ser divididas em 3 estágios claros de propagação de trincas.

- Região I: ocorrem as primeiras mudanças microestruturais, surgem as microfissuras e o material inicia a ter os primeiros processos irreversíveis.
- Região II: surgem as primeiras macrofissuras devido a união das microfissuras desenvolvidas.
- Região III: desenvolvimento das macrofissuras que levam a degradação total da estrutura.

A Figura 17 demonstra o desenvolvimento deste fenômeno.

Figura 17 - Estágios existentes no processo de fadiga



Fonte: Bernucci et al., 2008.

Vários são os fatores que influenciam na degradação do pavimento por meio da fadiga. Pinto (1991) definiu-os como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Fatores que influenciam no comportamento à fadiga de pavimentos asfálticos

Fatores de Carga	(a) Magnitude do carregamento
	(b) Tipo do carregamento; tensão ou deformação controlada
	(c) Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento
	(d) Histórico de tensões: carregamento simples ou composto
	(e) Forma do carregamento: triangular, quadrado, etc.
Fatores de Mistura	(a) Tipo do agregado, forma e textura
	(b) Granulometria do agregado
	(c) Penetração do ligante asfáltico
	(d) Teor de ligante
	(e) Temperatura
Fatores Ambientais	(a) Temperatura
	(b) Umidade
Outras Variáveis	(a) Módulo de resiliência ou de rigidez
	(b) Volume de vazios

Fonte: Pinto, 1991.

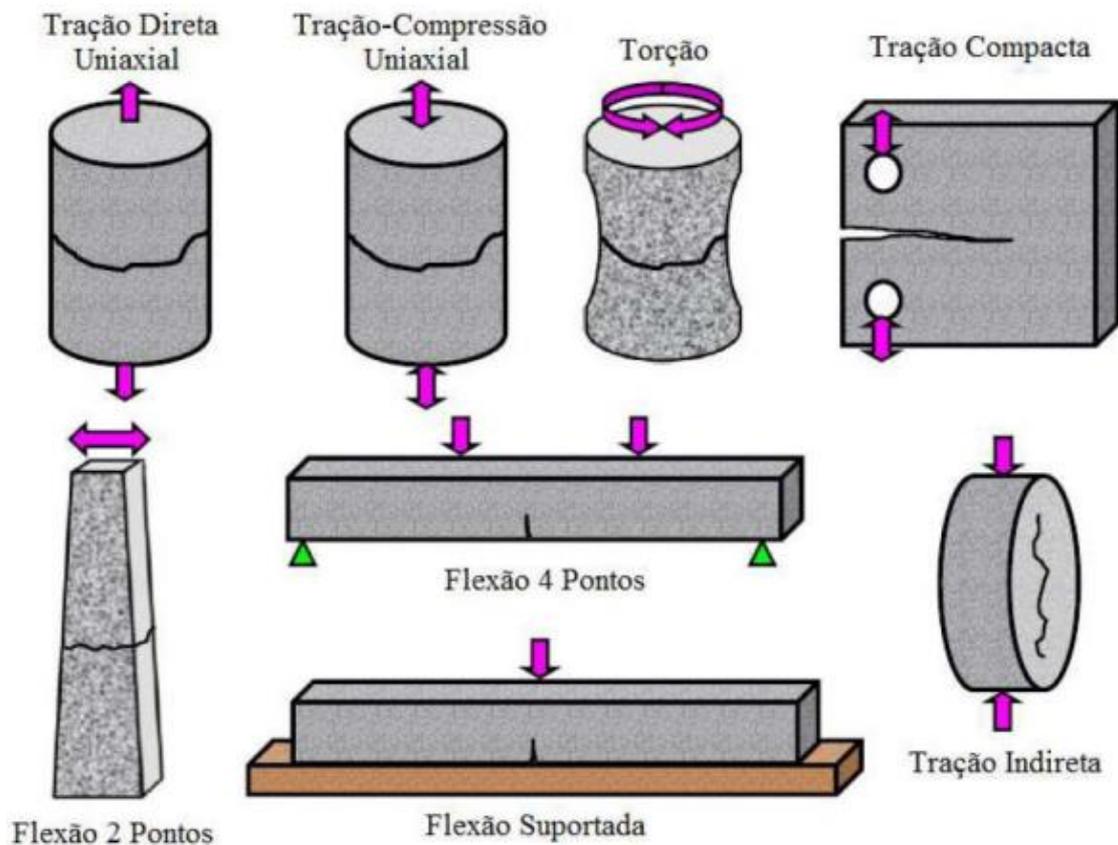
Outro fator bastante conhecido é o do envelhecimento do ligante. Muitas vezes em campo, empresas utilizam temperaturas elevadas para a etapa da usinagem, acelerando o processo de oxidação do ligante asfáltico. O que ocorre muitas vezes para um melhor recobrimento dos agregados ou devido a distância entre a usina e a obra. Porém, o envelhecimento precoce torna as misturas demasiadamente rígidas, conferindo uma menor resistência a fadiga e conseqüentemente reduzindo o desempenho do material (Tonial et al., 2001).

2.4.1 Ensaios laboratoriais para avaliação do fenômeno da fadiga

Ensaio laboratoriais são o principal recurso para a previsão da vida de fadiga em pavimentos asfálticos. De acordo com Schuster (2018), devido às solicitações geradas pelo tráfego, simulações com carregamentos de tração e compressão são feitas variando diversas propriedades e parâmetros dos materiais. A principal característica destes ensaios, é a aplicação de cargas cíclicas, para que se possa analisar de uma melhor forma a propagação do dano nos materiais, até a sua posterior ruptura.

Porém, uma grande dificuldade encontrada por pesquisadores, é a de reproduzir fielmente as condições de campo para o laboratório. Dificilmente pode-se simular condições de tráfego, carregamento, temperatura, entre outros fatores. Portanto, muitas vezes é necessário que se façam correlações de campo-laboratório, também conhecidas como *shift factors*. Nos dias atuais existem vários ensaios para a avaliação da fadiga. Na Figura 19, podem-se ver os principais e as suas formas de carregamento.

Figura 19 -Configurações para ensaios de fadiga em misturas asfálticas



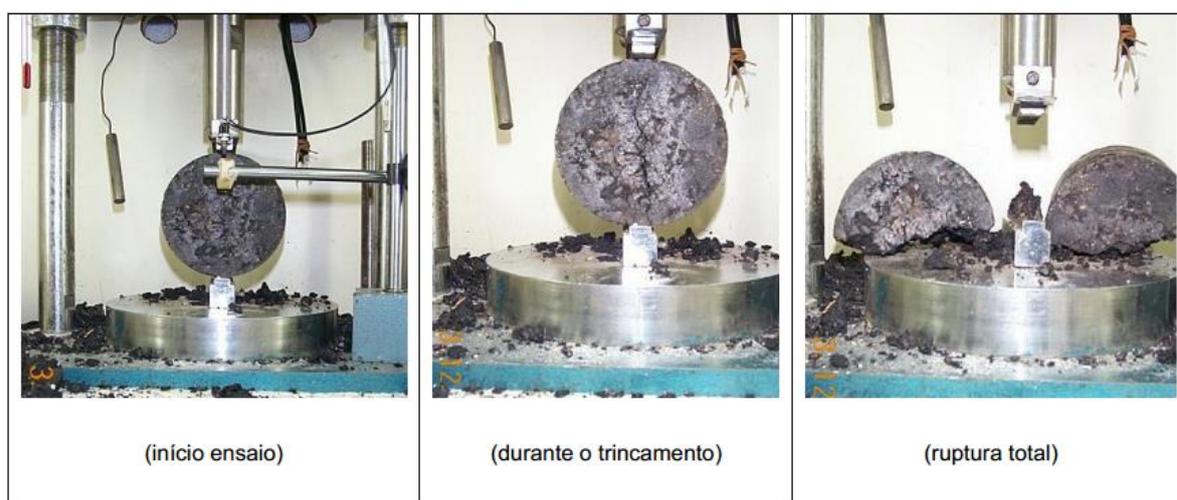
Fonte: Zeiada, 2012.

2.4.1.1 Ensaio de fadiga a tração indireta por compressão diametral

Este ensaio é o mais disseminado e utilizado no Brasil comumente e é regido pela norma DNIT 183/2018 – ME. O ensaio consiste basicamente em aplicar cargas cíclicas repetidas em corpos de prova cilíndricos, variando-se os carregamentos e mantendo a frequência de aplicação em 1 Hz e a temperatura a 25°C. Para isto, são utilizados níveis de tensão correspondentes a cargas variando de 5% a 40% da resistência a tração da mistura asfáltica em questão.

O critério de ruptura do ensaio é a ruptura total da amostra, como pode ser visto na Figura 20. Após as aplicações de cargas em diversos níveis de tensão, são geradas as curvas de vida de fadiga versus diferença de tensões, para que seja feita a análise da resistência à fadiga da mistura em questão.

Figura 20 - Corpos de prova antes, durante e após a ruptura



Fonte: DNIT 183/2018 – ME.

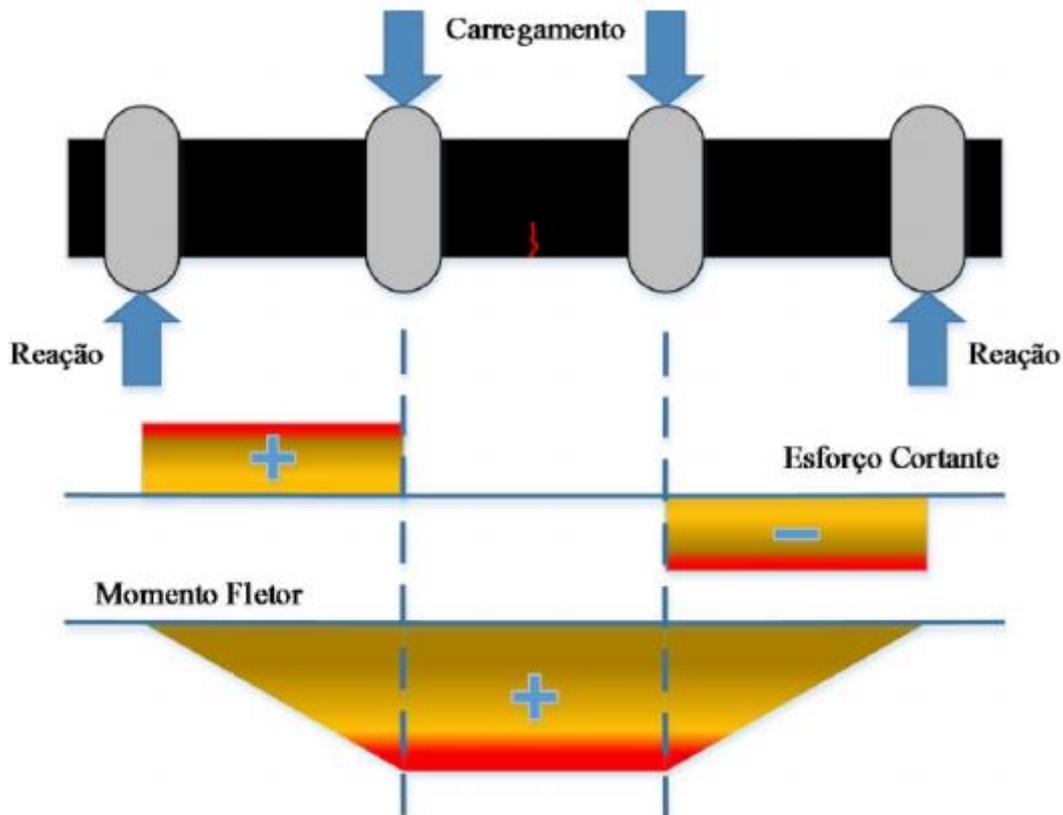
Apesar da facilidade de execução do ensaio, existe uma grande crítica em relação ao mesmo. Durante a aplicação das cargas, ocorre o surgimento de deformação permanente nos frisos de carregamento, comprometendo a interpretação do potencial de trincamento do material. Além disso, durante a aplicação de cargas acima de 30% da RT, a parcela viscosa do material começa a predominar, impedindo a avaliação correta quanto ao trincamento do mesmo (Tayebali et al., 1994).

2.4.1.2 Ensaio de flexão em viga 4 pontos

No Brasil ainda não existem normas acerca deste ensaio. Para tanto, ele pode ser realizado de acordo com as normas AASHTO T 321-17, ASTM D 7460-10 e EN 12697:24-10. Devido a sua forte correlação laboratório-campo, e a sua facilidade de realização, este ensaio é um dos mais difundidos mundialmente nos dias de hoje. Este ensaio, possui a mesma lógica aplicada no ensaio de flexão em viga 4 pontos utilizando concreto de cimento Portland. São aplicadas cargas verticais, afastadas entre si em um terço do vão da viga, para que ocorra flexão na parte central do corpo de prova, por ser este o local mais propenso a ter propagação de micro e macrofissuras (Melo, 2014).

Pode-se medir assim a força máxima aplicada e a deformação no centro da viga e com base nestes parâmetros, a medição da rigidez à flexão da viga. O ensaio é feito com frequências de 5 e 10 Hz e a temperatura de 20°C em vigotas com medidas de comprimento de 380 mm, largura de 63 mm e altura de 50 mm. Na Figura 21 pode-se ver a configuração e distribuição de tensões durante o ensaio.

Figura 21 - Configuração e distribuição de tensões no ensaio fadiga à flexão em vigas 4 pontos



Fonte: Melo, 2014.

2.4.1.3 Ensaio de tração-compressão direta

O ensaio cíclico de tração-compressão direta foi idealizado e desenvolvido pelo professor Richard Kim da universidade da Carolina do Norte, nos Estados Unidos. Segundo Mocelin (2018), um dos grandes diferenciais deste protocolo, é o de que se trata de um ensaio constitutivo, que define características fundamentais das misturas asfálticas quando ensaiadas.

Este ensaio é regido pela AASTHO TP-107/2014, e consiste na aplicação de carregamentos cíclicos de tração e compressão em corpos de prova com uma frequência de 10 Hz, temperatura definida através do PG e deformação controlada. Para que seja possível a aplicação de esforços de tração e compressão, o corpo de prova é colado em pratos fixadores. As Figuras 22 e 23 mostram o equipamento de colagem e a prensa utilizados com a amostra devidamente fixada. A norma sugere que sejam ensaiados 3 corpos de prova com deformações controladas distintas e que o critério de parada do

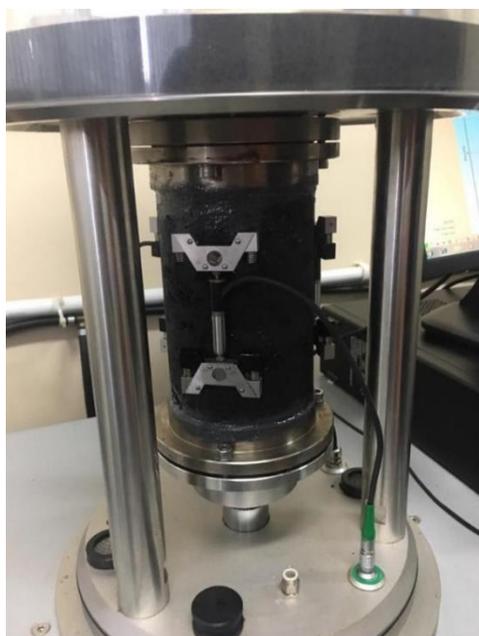
ensaio, seja a queda do ângulo de fase ou o completo rompimento do corpo de prova. A Figura 24 mostra o gráfico com o desenvolvimento do ensaio.

Figura 22 - Aparato de colagem do corpo de prova nos pratos fixadores



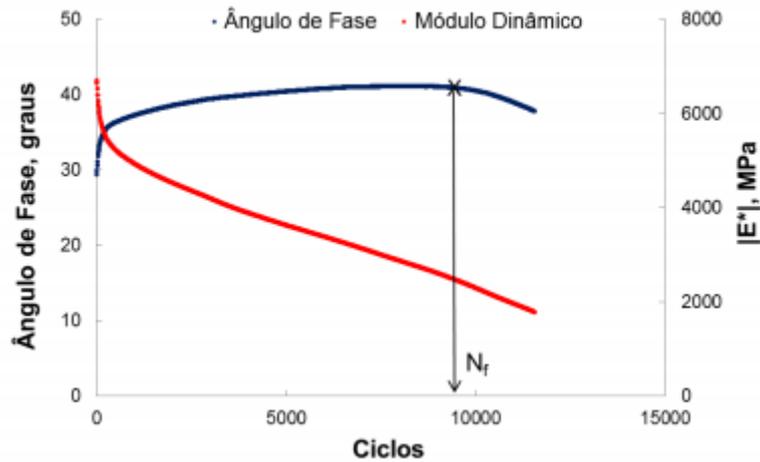
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 23 - Prensa AMPT utilizada para a realização do ensaio



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 24 - Queda do ângulo de fase durante o ensaio de tração compressão direta



Fonte: Nascimento et al., 2014.

Através dos dados medidos do ângulo de fase e módulo dinâmico, e utilizando a teoria do dano contínuo em meio viscoelástico simplificada (S-VECD) desenvolvidos pelo professor Richard Kim, são gerados gráficos de dano (S) versus integridade (I), que são propriedades intrínsecas do material. Portanto este protocolo tem se desenvolvido bastante durante a última década e tem se tornado uma ferramenta valiosa para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos.

2.5 Deformação permanente em trilhas de rodas

A deformação permanente pode ser atribuída ao revestimento, às subcamadas, ou a uma combinação de ambos (Bernucci et al., 2008). A mesma ocorre devido a uma distorção de uma ou mais camadas através das cargas sobre elas impostas. Yoder e Witczac (1975) definem a deformação permanente como um acúmulo de deformações não recuperáveis provenientes do tráfego de veículos. A Figura 25 demonstra os tipos de deformações permanentes possíveis.

Figura 25 - Deformação permanente no revestimento (trilha de roda esquerda) e em todas as camadas (trilha de roda direita)



Fonte: Bernucci et al., 2008.

De acordo com Boeira (2018), como qualquer outro defeito no pavimento asfáltico, a deformação permanente causa desconforto e insegurança nas estradas. Isto pode prejudicar a utilidade do revestimento, devido ao acúmulo de água nestes locais, o que pode ocasionar perigo para o tráfego de veículos. Os principais fatores que influenciam a ocorrência de deformação permanente são os materiais empregados, volume de vazios atingidos durante a compactação, temperatura do ambiente e tráfego local.

Nascimento (2008) apresenta a influência dos materiais empregados nas misturas asfálticas, dividindo-os em dois grupos:

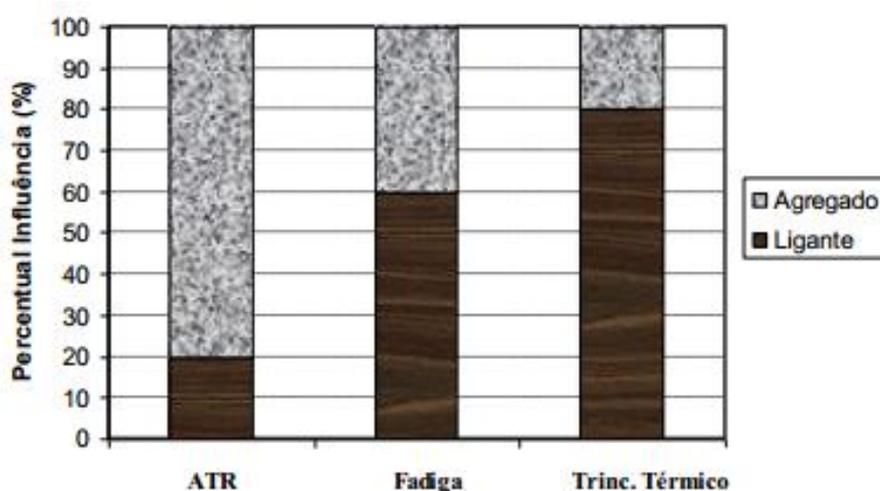
- Agregados: para que ocorra uma melhor resistência a deformação permanente, é de suma importância que a granulometria dos agregados possua o melhor intertravamento possível, além de agregados de maior dimensão, o que teoricamente faria com que a mistura possua sua densidade máxima. A forma dos agregados também é muito importante, visto que agregados cúbicos possuem maiores ângulo de atrito do que agregados rolados ou alongados.
- Ligante asfáltico: o excesso de ligante pode ser prejudicial, pois pode funcionar como um lubrificante, auxiliando no escorregamento das partículas. Ligantes mais viscosos tendem a aumentar a rigidez da mistura e assim prevenir a deformação permanente.

Como citado anteriormente, a compactação da camada também é um fator que exerce grande influência sobre a deformação permanente. A compactação inadequada da camada de rolamento pode ser responsável por um volume de vazios maior do que o de

projeto, o que ocasiona um menor intertravamento da estrutura. A temperatura ambiente influencia na viscosidade que o ligante pode apresentar em certos horários do dia e o tráfego além do projetado também pode gerar uma maior deformação permanente.

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 2002), afirma em estudo que os agregados possuem uma maior influência sobre a resistência a deformação permanente do que o ligante asfáltico. Diferentemente de outras patologias como o trincamento por fadiga e térmico. Na deformação permanente a influência do agregado é de cerca de 80% do total como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Influência dos agregados e do ligante nas patologias de misturas asfálticas



Fonte: FHWA, 2002.

Como citado, o maior fator de resistência quanto a deformação permanente é o esqueleto mineral apresentado. Portanto é de suma importância que projetos de misturas asfálticas sejam feitos, buscando encontrar o melhor intertravamento no agregado mineral. Para tanto, se destacam principalmente a metodologia Bailey, proposta pelo engenheiro Robert Bailey, além da *Dominant Aggregate Size Range Model* (DASR) proposta pelo professor Kim. Onde a principal constante entre os métodos, é a maior preocupação em encontrar curvas granulométricas que interajam entre si da melhor forma possível, para assim aumentar a resistência à deformação permanente.

2.5.1 Ensaios laboratoriais para avaliação da deformação permanente

A seguir serão apresentados os principais ensaios laboratoriais para análise da resistência a deformação permanente de misturas asfálticas. Os ensaios de *creep* estático e dinâmico, além de simuladores de tráfego em laboratório.

2.5.1.1 *Creep* estático

De acordo com Bernucci et al., (2008), o ensaio de *creep* estático, bastante utilizado na mecânica dos materiais, consiste na aplicação ao longo do tempo de uma carga de compressão axial, estática e contínua em um corpo de prova regular, moldado normalmente através da metodologia Marshall, ou através de corpos de prova extraídos em campo através de sondas rotativas. Normalmente o ensaio é feito durante uma hora, na qual é feita a medição do deslocamento vertical sofrido no próprio corpo de prova ou com o auxílio de extensômetros acoplados ao mesmo.

O parâmetro obtido durante o ensaio é basicamente o histórico de deformação durante o carregamento. Através deste parâmetro pode-se calcular a *creep compliance* (função fluência), que se trata do inverso do módulo de elasticidade, porém como uma função do tempo.

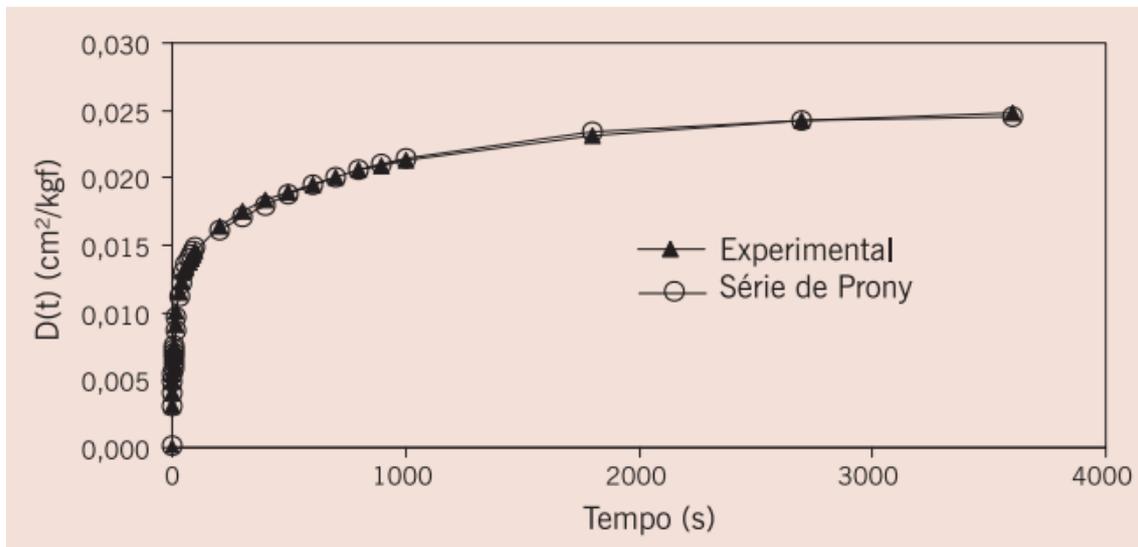
As Figuras 27 e 28 exibem o arranjo experimental do ensaio de *creep* estático e um resultado típico da função fluência.

Figura 27 - Equipamento e arranjo experimental do ensaio de *creep* estático



Fonte: Bernucci et al., 2008.

Figura 28 - Resultado típico da função fluência no ensaio de creep estático



Fonte: adaptado de Bernucci et al., 2008.

2.5.1.2 Creep dinâmico

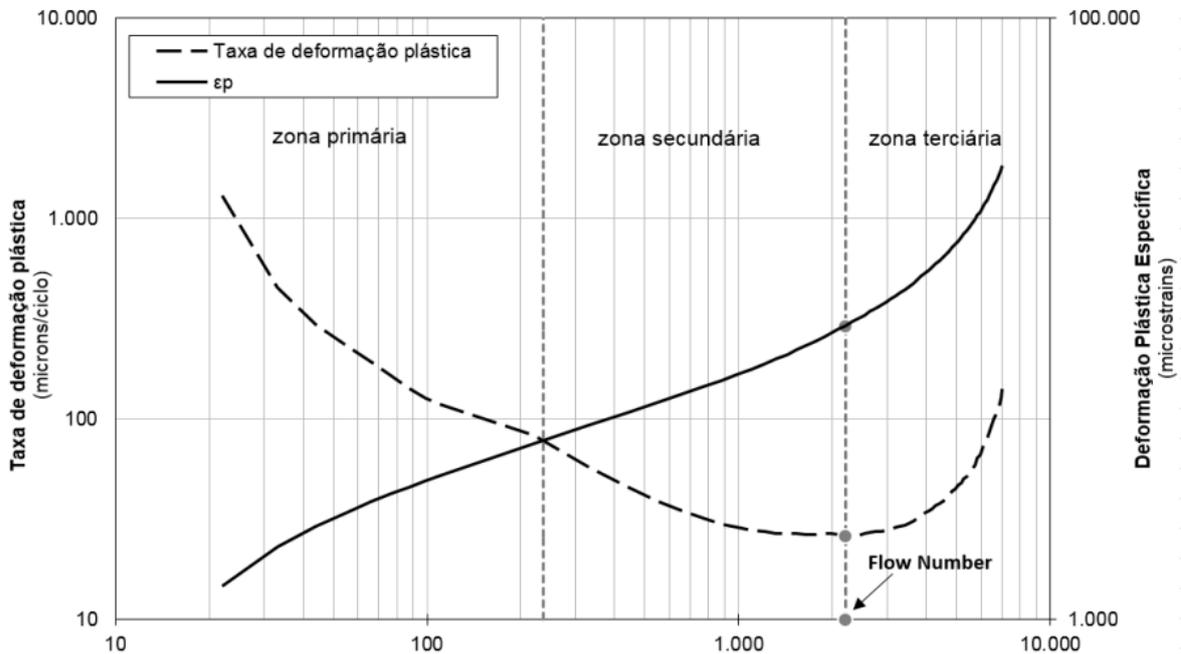
O ensaio de *creep* dinâmico, é muitas vezes chamado também pelo seu parâmetro encontrado, o *Flow Number* (FN). Nascimento (2008) afirma que o FN é o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima em um corpo de prova que atinja a ruptura. Pode-se definir também o FN como o ponto de inflexão da curva deformação versus ciclos em que a deformação não possui mais parâmetros elásticos. A partir deste ponto a deformação ocorre de forma mais acelerada.

O ensaio é normatizado no Brasil pelo DNIT 184/2018. É feito um carregamento cíclico de 204 KPa em um corpo de prova de 150mm, a uma temperatura de 60°C. Este carregamento é feito por 0,1 segundos e 0,9 segundos de repouso. Os critérios de parada adotados pela norma são:

- Quando o FN é atingido durante o ensaio ou;
- Quando são atingidos 7200 ciclos, equivalentes a duas horas de ensaio.

A Figura 29 demonstra um resultado típico do ensaio de *creep* dinâmico:

Figura 29 - Deformação plástica vertical acumulada versus número de ciclos



Fonte: DNIT 184/2018.

É possível notar três regiões distintas durante o ensaio de *creep* dinâmico que serão descritas a seguir:

- Zona primária: É uma zona onde ocorre uma elevada compressão do CP, diminuindo os seus vazios.
- Zona secundária: É a zona em que ocorrem deformações bastante homogêneas. Durante este período ocorre a transição da deformação elástica para a plástica.
- Zona terciária: Nesta zona, ocorre elevada e rápida deformação plástica devido à perda de resistência do corpo de prova.

Diante das dificuldades encontradas em ensaios de deformação permanente, o ensaio de *creep* dinâmico tem crescido bastante nos últimos anos e é amplamente considerado o ensaio que melhor descreve e avalia o fenômeno da deformação permanente.

2.5.1.3 Simuladores de tráfego em laboratório

Os simuladores de tráfego são principalmente utilizados com pequenas seções do pavimento, utilizando modelos reduzidos, mas com escala real em relação aos materiais.

Aplicam-se cargas aceleradas pré-definidas, para assim, em tempo reduzido, se obter parâmetros de vida útil do pavimento quanto a deformação permanente. Porém um problema destes simuladores, é o de não poder reproduzir fatores de campo, tais como, intempéries, temperatura, umidade e insolação (Boeira, 2018).

Bernucci et al., (2008) divide os tipos de simuladores em dois: em laboratório e em verdadeira grandeza. Neste segundo caso, apesar de serem bastante similares a realidade, estes equipamentos podem possuir uma grande onerosidade, além da necessidade da criação de pistas experimentais e laboratórios em campo.

Já em relação a simuladores em laboratório, se destacam o francês desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central et Chaussées*) e o norte-americano APA (*Asphalt Pavement Analyzer*) que serão descritos a seguir.

No LCPC, a mistura asfáltica é previamente compactada por amassamento com o auxílio de uma roda de pneu com carga e pressão previamente definidos. Após isso, as placas com padrão de 500 mm de comprimento, 180 mm de largura e espessura de 50 mm ou 100 mm são ensaiadas a uma temperatura de usualmente 60°C. O ensaio é realizado com carregamentos pneumáticos em duas placas paralelas simultaneamente com movimentos longitudinais de idas e vindas, a 1 Hz. O resultado do ensaio, é o afundamento na trilha de rodas em diversos pontos durante as solicitações. As Figuras 30 e 31 trazem o LCPC e placas de misturas asfálticas compactadas do laboratório de tecnologia de pavimentação da escola politécnica da USP.

Figura 30 - LCPC do laboratório de pavimentação da USP



Fonte: Bernucci et al., 2008.

Figura 31 - Placas de misturas asfálticas compactadas



Fonte: Bernucci et al., 2008.

Em relação ao APA, o procedimento do ensaio é bastante similar ao LCPC, com a principal diferença consistindo no tipo de compactação das placas. Neste ensaio as placas são compactadas por vibração, utilizando mangotes de borracha preenchidos por ar. Além disso, o equipamento possui a opção de saturação do corpo de prova, o que é bastante útil para a avaliação do efeito deletério da água. Os resultados do ensaio são a deformação sofrida durante os ciclos de carregamentos. A Figura 32 mostra um aparelho APA.

Figura 32 - Asphalt Pavement Analyzer



Fonte: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/laboratory-wheel-tracking-devices/>

2.6 Avaliações funcionais e estruturais dos pavimentos asfálticos

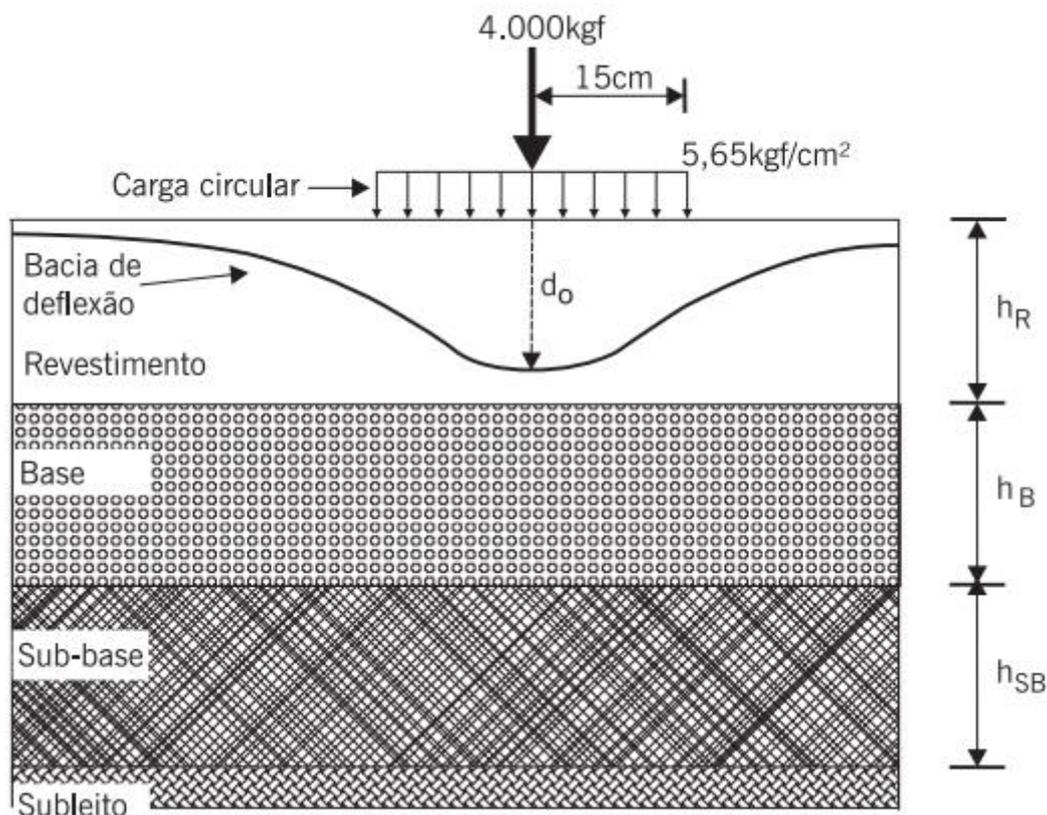
Para se avaliar objetivamente as condições funcionais de um pavimento asfáltico, é necessário que seja feito um prévio levantamento das condições vistas em campo. Para isto existem várias metodologias, destacando-se o índice de gravidade global (IGG), normatizado pelo DNIT 006/2003 – PRO e as metodologias da SHRP e Vizir. A norma explicita como devem ser feitos os levantamentos através da localização e demarcação das superfícies de avaliação, e a observação dos defeitos como flechas, panelas e trincas. Posteriormente é feito um inventário destes defeitos e o cálculo do IGG.

Colpo (2019) alerta também sobre a necessidade de se avaliar a resistência a derrapagem entre pneu/pavimento, vista a sua extrema importância para a segurança dos veículos. Portanto é necessário avaliar a faixa de rolamento quanto a sua microtextura usando o ensaio do pêndulo britânico e quanto a sua macrotextura, utilizando o ensaio da mancha de areia.

Para se avaliar estruturalmente um pavimento é necessário conhecer as condições de rigidez do mesmo. Bernucci et al., (2008) afirmam que mesmo se sabendo os parâmetros de rigidez inicial das camadas do pavimento, como o ISC ou MR, estes tendem a mudar através do tempo e uso do pavimento ou também das intempéries, além de possíveis falhas durante a etapa da construção. Portanto, para se efetuar esta avaliação, seria necessária a abertura de poços para a coleta do material indeformado para futura avaliação em laboratório, o que pode ser um processo lento e oneroso.

Para solucionar este problema, surgiu a retroanálise. Como o nome já sugere, é feita uma análise estrutural após a construção do pavimento, interpretando as suas bacias de deformação. Através das cargas utilizadas, deflexões medidas e características dos materiais de construção, é possível inferir os módulos de elasticidade atuais do pavimento. A Figura 33 demonstra os dados necessários para se fazer a retroanálise de um pavimento.

Figura 33 - Dados para retroanálise de um pavimento



Fonte: adaptado de Bernucci et., al, 2008.

A retroanálise além do mais, se trata de uma técnica não-destrutiva, ao contrário da abertura de poços, o que além de ser um processo mais lento e oneroso, pode também causar transtornos futuros para o pavimento. O ensaio mais utilizado e difundido mundialmente é o da viga Benkelman. Destacam-se também os ensaios do *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Light Weight Deflectometer* (LWD), que serão discutidos no próximo tópico.

2.6.1 Ensaios *in situ* para avaliação funcional e estrutural do pavimento

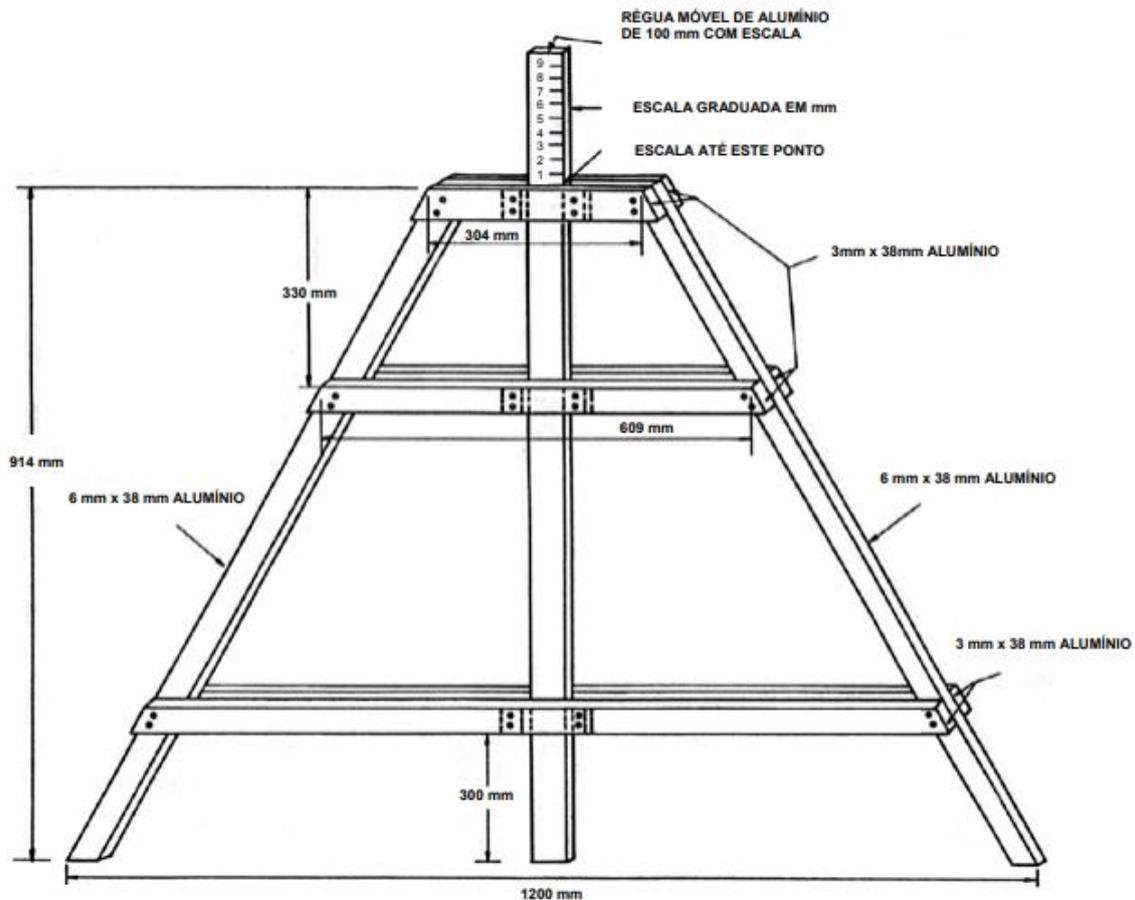
Nos próximos tópicos serão abordadas avaliações funcionais de pavimentos utilizando a treliça metálica, o pendulo britânico e a mancha de areia. As avaliações estruturais citadas serão a viga Benkelman e o FWD.

2.6.1.1 Método da Treliça metálica

A treliça metálica é utilizada para o levantamento de afundamentos nas trilhas de roda externas e internas da faixa de rolamento, usando como base a norma DNIT 006/2003

PRO. As bases da treliça ficam apoiadas em pontos externos da trilha de rodas, dotada de régua móvel em seu ponto médio. Caso não haja afundamento, a marcação na régua será zero. A medida que existir afundamento, a régua irá medir a magnitude da flecha em milímetros pelo fato de ficar desnivelada com os apoios externos da treliça. A Figura 34 demonstra um esquema da treliça metálica.

Figura 34 - Treliça para medição das flechas da trilha de roda



Fonte: DNIT 006/2003 PRO.

2.6.1.2 Método do Pêndulo britânico

O método do pêndulo britânico, citado no manual de restauração de pavimentos asfálticos (DNIT IPR-720, 2006) e normatizado pela ASTM E303 (*Surface Fictional Properties Using the British Pendulum Tester*), determina uma medida de atrito entre pneu e faixa de rolamento, podendo também ser chamado de coeficiente de atrito cinemático.

O equipamento é composto por uma placa de borracha, simulando um pneu de veículo que fica no extremo de um pêndulo como pode ser visto na Figura 35. Quando solta em queda livre realizando um movimento circular, a placa toca a superfície do pavimento friccionando-a. Sabendo-se da altura de queda da placa de borracha, é possível avaliar a perda de energia devido ao atrito. Este parâmetro é chamado de valor de resistência a derrapagem (VRD) e possui classes definidas pela *Marshall Committee*, que podem ser vistos na Tabela 1. O limite sugerido é o de $VRD \geq 55$.

Figura 35 - Pêndulo britânico do laboratório de engenharia de pavimentos



Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 1 - Classes de resistência a derrapagem utilizando o método do pêndulo britânico

Classes	Valor de resistência a derrapagem
1 – Perigosa	< 25
2 – Muito lisa	25 – 31
3 – Lisa	32 – 39
4 – Insuficientemente rugosa	40 – 46
5 – Medianamente rugosa	47 – 54
6 – Rugosa	55 – 75
7 – Muito rugosa	> 75

Fonte: DNIT IPR-720,2006.

2.6.1.3 Método da mancha de areia

O método da mancha de areia é preconizado pela norma francesa AFNOR NF-P.98-216-7. O objetivo deste ensaio é o de avaliar a macrotextura do revestimento e a capacidade de drenagem de água entre o pneu e o pavimento. Isto é, a qualidade de intertravamento dos agregados.

O ensaio consiste em espalhar um volume conhecido de uma areia padrão sobre a superfície do pavimento em movimentos circulares para o preenchimento dos vazios da mistura, de forma que o diâmetro da mancha seja em função da altura média e, portanto, do volume consumido. A Figura 36 demonstra o ensaio em andamento.

Figura 36 - Método da mancha de areia



Fonte: Arquivo pessoal

O resultado final a ser encontrado é expresso em altura da areia (HS) em milímetros. O manual da restauração de pavimentos asfálticos sugere um valor de altura da areia de $0,6 \text{ mm} < \text{HS} < 1,2 \text{ mm}$. Os limites da textura superficial podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Avaliação da macrotextura do pavimento através do método da altura da areia

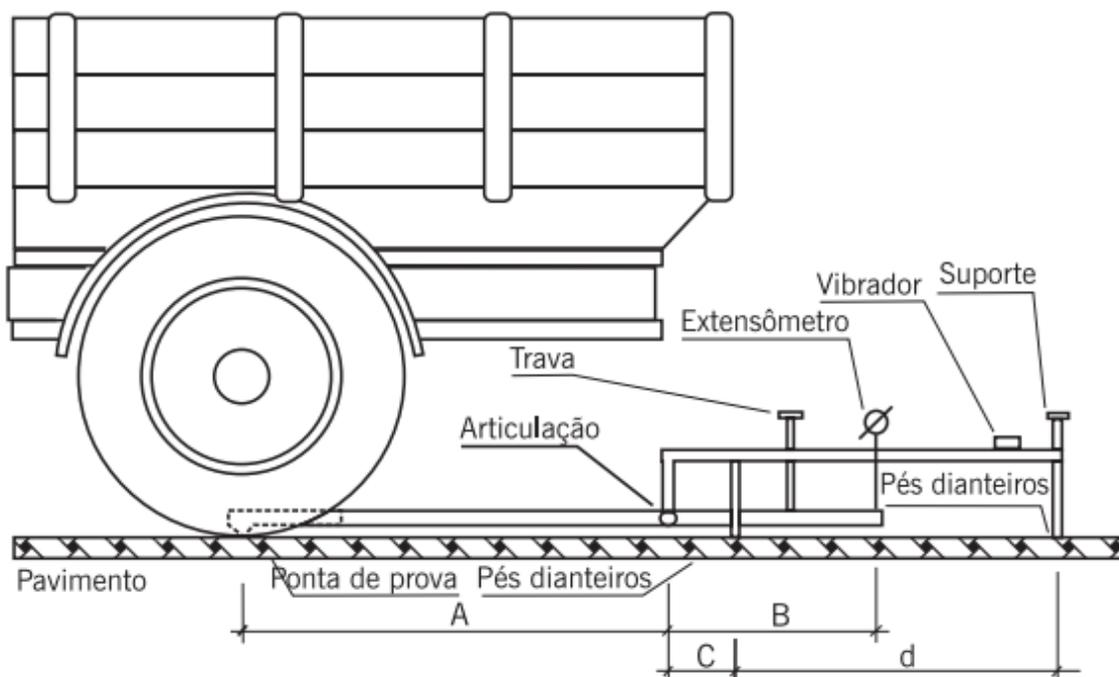
Profundidade média (mm)	Textura superficial
HS < 0,20 mm	Muito fina ou muito fechada
0,21 mm < HS < 0,40 mm	Fina ou fechada
0,41 mm < HS < 0,80 mm	Média
0,81 mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou aberta
HS > 1,20 mm	Muito grosseira ou aberta

Fonte: DNIT IPR-720,2006.

2.6.1.4 Método da viga Benkelman

A viga Benkelman, normatizada no Brasil pelo DNER-ME 24/94, se trata de um ensaio para a avaliação estrutural do pavimento. Para a realização do ensaio, é utilizado um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla e carregado com 8,2 toneladas. Esta carga será utilizada para medir a deformação elástica do pavimento. A viga Benkelman é posicionada entre as duas rodas para a efetuação da leitura inicial e posteriormente o caminhão se desloca 10 metros ou até que não haja mais variação de leitura no extensômetro para que seja feita a leitura final. A Figura 37 mostra um esquema do caminhão e da viga. Além das leituras inicial e final, recomenda-se que sejam feitas outras leituras para a obtenção da bacia deflectométrica do pavimento.

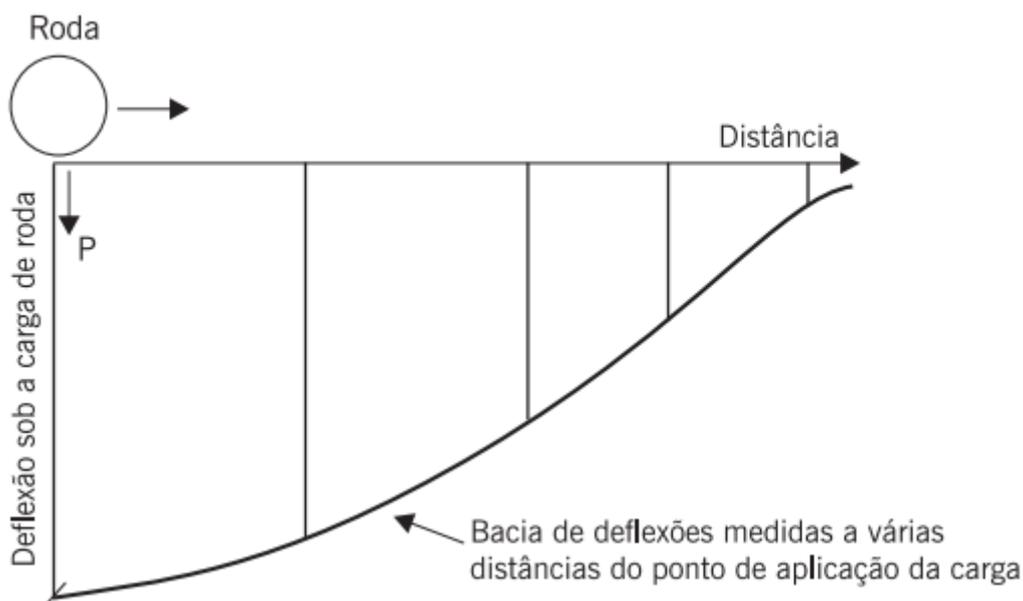
Figura 37 - Esquema da viga Benkelman



Fonte: DNER ME 24/94.

A partir destas bacias deflectométricas e com o auxílio da retroanálise, é possível inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento. O que é uma ferramenta valiosa para a gerência ou para futuras intervenções de manutenção no pavimento. Na Figura 38 pode-se ver como se configura uma bacia deflectométrica obtida através da viga Benkelman.

Figura 38 - Esquema de leituras com a viga Benkelman



Fonte: adaptado de Bernucci et., al, 2008.

2.6.1.5 Método do FWD (*Falling Weight Deflectometer*)

O FWD, é descrito pelas normas DNER – PRO 273/96 e ASTM D 4695. O principal diferencial deste método em relação a viga Benkelman que é um ensaio estático, é que o carregamento é feito de forma dinâmica. O carregamento é feito através da queda de um peso suspenso até uma certa altura sobre amortecedores que comunicam a leitura de deflexão.

A grande vantagem deste equipamento é a sua automatização. Sensores são colocados em localizações apropriadas para que assim sejam proporcionadas leituras de deformação ao longo do pavimento. Com estas leituras, armazenadas em computador, pode ser gerada a bacia deflectométrica. Porém, como se trata de um equipamento de alta precisão, existe uma grande necessidade de constante calibração. A Figura 39 mostra o modelo de FWD utilizado durante a pesquisa.

Figura 39 - Falling weight deflectometer



Fonte: Arquivo pessoal

Segundo Bernucci et al., (2008), as deflexões no pavimento dependem muito do material utilizado em sua estrutura, como também de condições do ambiente e o seu estado de deterioração. Valores típicos de deflexão são da ordem de 0,3 a 0,5 mm para pavimentos de CBUQ em boas condições e por volta de 0,8 mm para pavimentos construídos com tratamento superficial.

2.7 Instrumentação mecânica de pavimentos flexíveis

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 mecânica é uma ferramenta muito útil para o monitoramento de pistas experimentais ou rodovias já existentes. De acordo com o projeto de instrumentação *in situ* de um segmento da BR – 116 realizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a CONCEPA/ANTT (2017), um fator preocupante é o aumento da quantidade de veículos, acima do previsto em projeto, além de uma falta de controle de peso dos mesmos, o que acarreta em um desenvolvimento prematuro destas patologias.

O projeto de instrumentação para medição de deformações do pavimento realizado entre o DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina (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 tem a sua origem em outras ciências, além da adaptação de tecnologias já utilizadas em outras áreas da Engenharia Civil.

A principal tecnologia adaptada da instrumentação aeroespacial são os *strain gages*. O *strain gage*, também chamado de extensômetro elétrico de resistência, é um medidor de deformação. A deformação é medida através da variação da resistência elétrica de um filamento metálico.

As células de tensão, 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. Já os termopares são utilizados para a medição da temperatura. Além disto, existem sensores utilizados para medir umidade e os efeitos deletérios da água.

Colpo (2019), afirma que a instalação destes sensores pode ocorrer durante a construção do pavimento ou até mesmo após. O local de instalação ocorre normalmente na parte inferior do revestimento ou acima da camada de subleito, para a melhor análise das patologias de fadiga e deformação permanente.

2.7.1 Instrumentação em campo – Estado da arte

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.

Citando alguns programas de instrumentação, vale destacar o que foi realizado no campo de testes de Nardo, na Italia em 1984. Onde o principal objetivo era o de analisar a deformação sofrida pelas camadas do pavimento. Quando construída a camada de rolamento, pesquisadores utilizaram compactador não vibratório e baixas temperaturas de compactação da mistura asfáltica para evitar ao máximo o dano dos sensores. Porém ainda assim, cerca de 13% dos 200 sensores foram danificados.

O projeto *Minnesota Road Research Project*, foi um projeto desenvolvido pelo departamento de transportes do estado de minessota (Mn/DOT). A construção ocorreu entre 1990 e 1993 e inaugurada ao tráfego no ano de 1994. Foi monitorado o desempenho de 40 seções de teste com aproximadamente 8500 sensores, dentre eles *strain gages* e células de carga (Johnson et al., 2009). Os dados foram então armazenados pelo Mn/DOT e utilizados para avaliar e desenvolver novos métodos de dimensionamento de pavimentos.

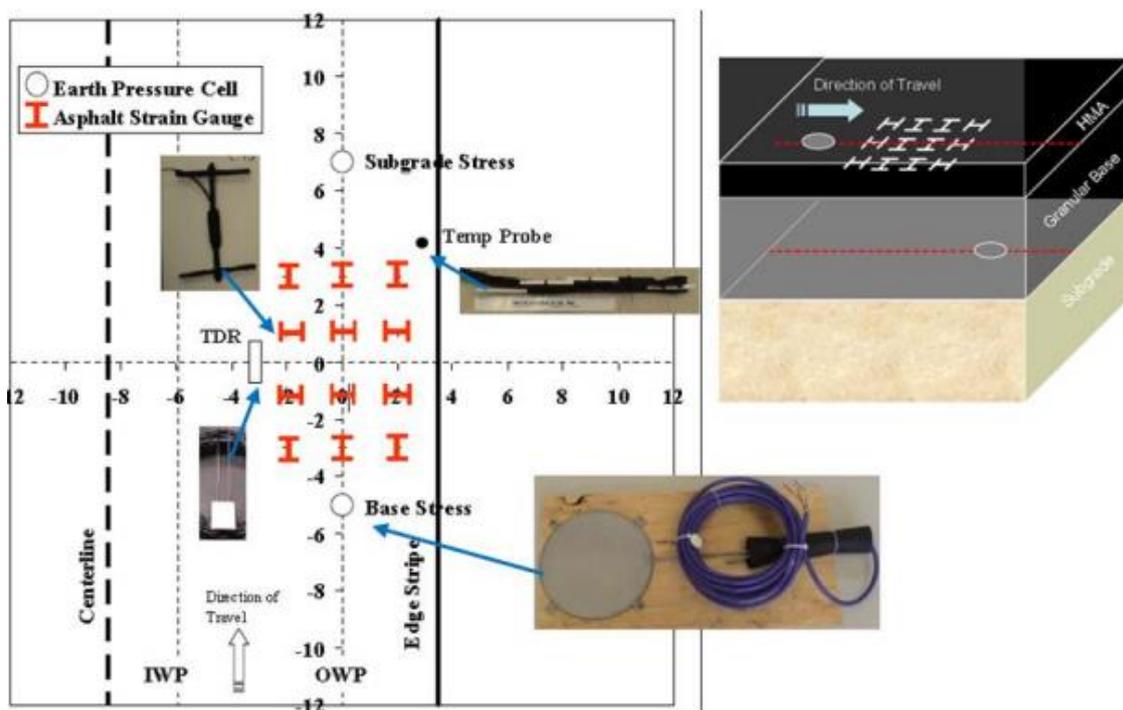
De acordo com Loulizi et al., (2001), o departamento de transportes da Virginia (VDOT) construiu em 1998 a *Virginia Smart Road*, com 12 seções de testes, para a avaliação do pavimento em diferentes condições climáticas e de solicitações de tráfego. Foram usados *strain gages*, termopares, sondas de reflectometria para a análise da umidade e sondas de resistividade para verificar a penetração do gelo. Durante a construção cerca de 4,6% dos sensores falharam e após um ano de monitoramento, cerca de 13%. Um importante resultado foi a verificação da influência no comportamento das misturas asfálticas quando estas foram submetidas a carregamentos com velocidades mais lentas. Fazendo com que as deformações e as flexões de compressão e tração aumentassem, diminuindo a vida útil do pavimento.

Brown e Broderick (1999) citam resultados obtidos em ensaios acelerados em pavimentos asfálticos durante 25 anos na Universidade de Nottingham, na Inglaterra. Exibindo também um histórico em relação a utilização de simuladores de tráfego na Inglaterra. Outra pista experimental construída na Europa que merece destaque é a de Madri, na Espanha. Esta pista foi construída em 6 seções dotadas de 25 metros cada. Simuladores com cargas correspondentes às de um caminhão com carga máxima legal permitida na Espanha foram utilizados e guiados através de uma viga de concreto.

O Centro Nacional para Tecnologia de Asfalto (NCAT) na Universidade de Auburn, desenvolveu o projeto *NCAT Test Track* nos Estados Unidos no ano de 2004.

Foi construída uma pista experimental com 8 seções diferentes utilizando espessuras e ligantes asfálticos diferentes para a validação de modelos mecanístico-empíricos. Foram utilizadas células de carga, sensores de deformação e sensores de umidade. A Figura 40 traz detalhes da disponibilização destes sensores no pavimento. Ao final da construção, todas as células de carga e cerca de 85% dos sensores de deformação funcionaram (Timm et al., 2004).

Figura 40 - Instrumentação utilizada no projeto NCAT



Fonte: Timm et al., 2004.

Um grande avanço para a instrumentação *in situ* foi a criação do *Heavy Vehicle Simulator* (HVS) na África do Sul a partir da década de 60. Este equipamento simula cargas de veículos pesados, além de fazer uso de alguns testes, tais como, o *mult-depth deflectometer* (MDD), perfilômetros, *cracking activity meter* (CAM), deflectômetro de superfície e termopares (Gonçalves, 2002). Este equipamento é bastante utilizado como auxílio para o desenvolvimento de modelos de dimensionamento mecanístico-empíricos. Horak et al., (1999) comenta sobre o avanço que o HVS foi capaz de proporcionar na África do Sul, permitindo um melhor entendimento dos elementos ambientais na modelagem do comportamento do pavimento em serviço. A Figura 41 demonstra uma configuração do HVS.

Figura 41 - Heavy Vehicle Simulator

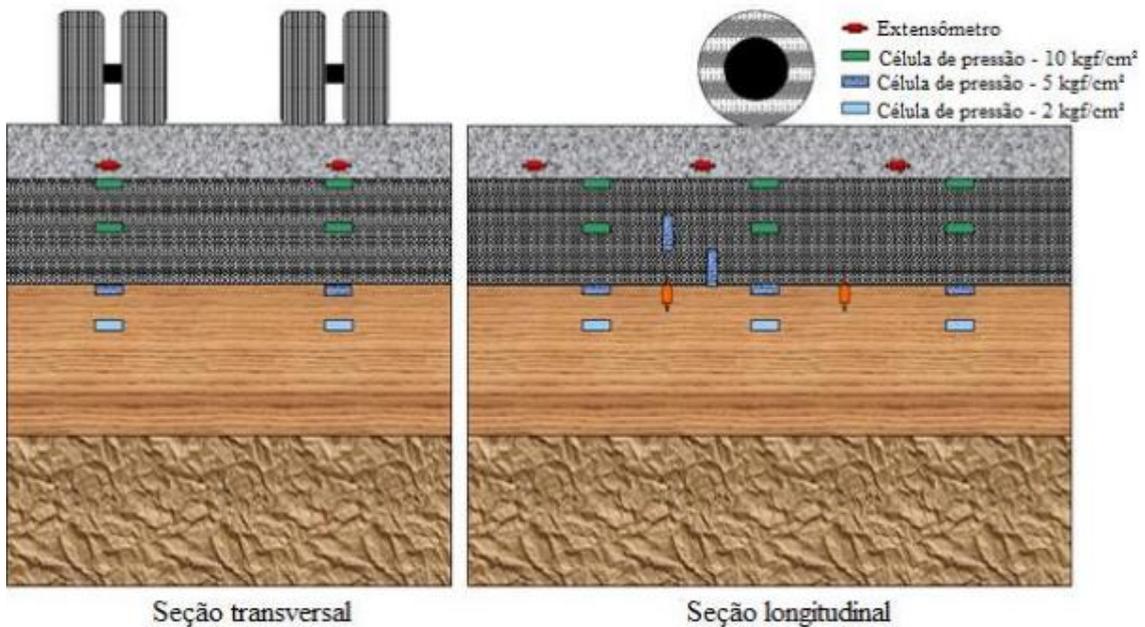


Fonte: <https://www.erdc.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2001792970/>

Silva e Motta (1999), destacam que 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 42.

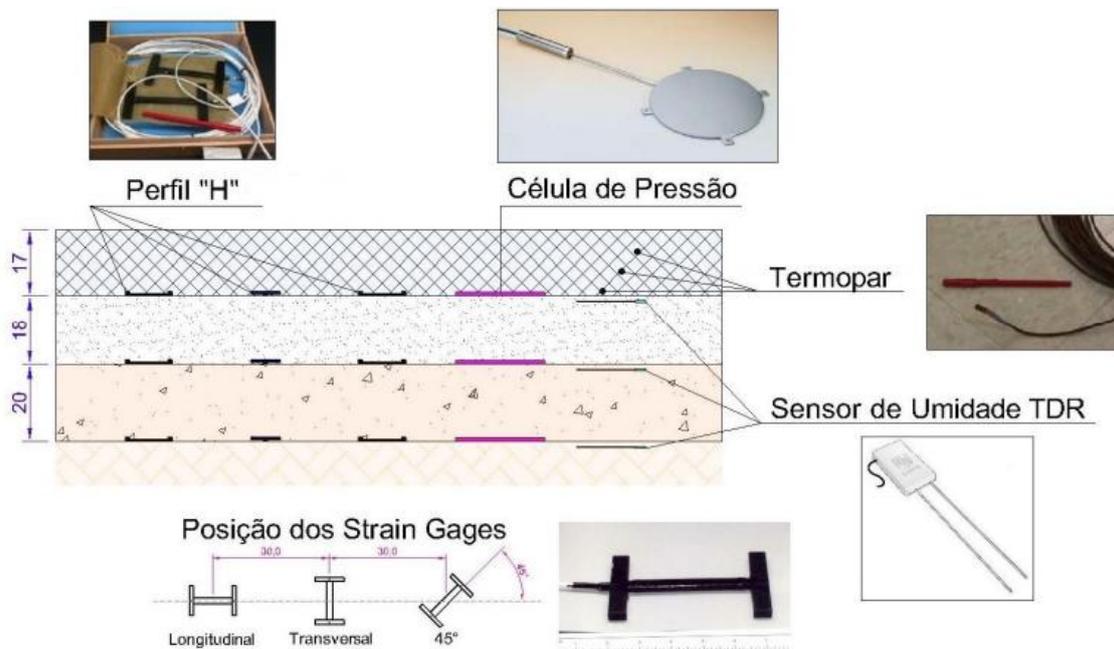
Figura 42 - Configuração da instrumentação das pistas experimentais do LAPAV-UFRGS



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. Onde foram instalados 27 extensômetros, 6 células de tensão, 3 sensores de umidade e 3 termopares nas diferentes camadas do pavimento como pode ser observado na Figura 43.

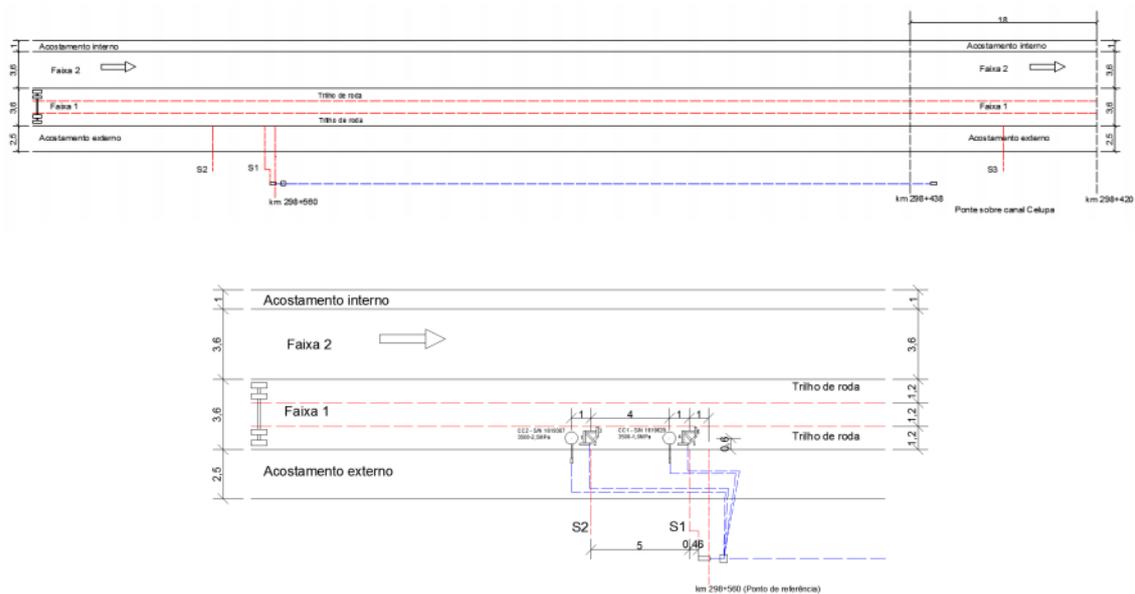
Figura 43 - Posição relativa dos sensores em cada camada e arranjo dos strain gages



Fonte: UFSC – DNIT, 2008.

No ano de 2017, o LAPAV da UFRGS em parceria com a CONCEPA/ANTT fez a instrumentação de um trecho na BR 116 em revestimento flexível e de uma obra de arte especial de concreto armado. A escolha de instrumentação da OAE foi feita para a análise das deformações que ocorrem nas armaduras e a corrosão desenvolvida na mesma. Na Figura 44 pode-se observar vistas superiores do projeto de instalação dos sensores nos 2 trechos analisados.

Figura 44 - Vista superior do trecho da BR – 116



Fonte: LAPAV, 2017.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados para a instrumentação do trecho experimental da BR 101 no estado de Pernambuco.

3.1.1 *Strain gaige*

Os sensores de deformação, ou extensômetros do tipo *strain gaige*, são extremamente frágeis e sensíveis em comparação com os componentes da mistura asfáltica, o que faz necessária a correta proteção destes equipamentos.

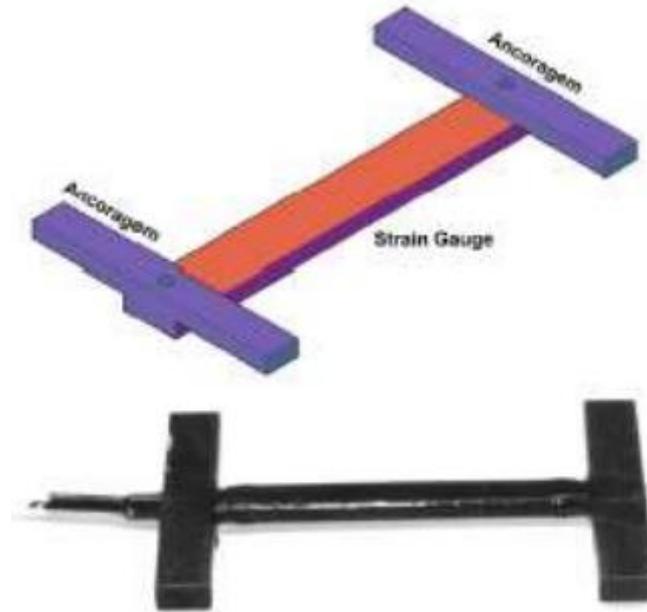
As características de um sistema de proteção em perfil H são listadas a seguir.

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

O sistema de proteção nesta pesquisa foi feito em perfil H, contendo o próprio extensômetro, barras chatas de acrílico, rebites metálicos, cola epóxi, fita isolante de auto-fusão e pintura selante, de acordo com o esquema observado na Figura 45.

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 45 - Sistema de proteção em perfil H



Fonte: DNIT, UFSC (2008).

Informações técnicas acerca do extensômetro utilizado nesta pesquisa podem ser verificadas na Figura 46.

Figura 46 - Informações comerciais dos extensômetros adquiridos da marca Kyowa



Model	Dimensions (mm)				Remarks
	Grid		Base		
	Length	Width	Length	Width	
KHCS-10-120-G12-11	10	-	20	3	
KHCS-10-120-G12-13	10	-	20	3	
KHCS-10-120-G12-16	10	-	20	3	

Fonte: http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gaes/khcs/index.html

3.1.2 Células de tensão

As células de tensão, utilizadas em várias áreas da Engenharia Civil, permitem a leitura das tensões desenvolvidas nas camadas dos pavimentos através da passagem dos eixos dos veículos. São de suma importância devido a possibilidade, em combinação com os *strain gages*, de relacionar a tensão com a deformação sofrida pelo tráfego.

Nesta pesquisa foram utilizadas células de tensão compatíveis com os esforços apresentados na rodovia, com a capacidade de 1 MPa e de 2,5 MPa, além de uma velocidade de até 1000 leituras por segundo. Pode-se observar na Figura 47 as células de tensão adquiridas.

Figura 47 - Células de tensão adquiridas



Fonte: Arquivo pessoal

3.1.3 Termopares

Os termopares, também chamados de detectores de temperatura ou elementos primários de temperatura, são sensores de alta sensibilidade e precisão utilizados para medir a temperatura em diversas camadas do revestimento asfáltico. Possuem elevada importância, porque o desempenho das misturas asfálticas está intimamente ligado a temperatura de operação existente no pavimento em diversas fases do dia e do ano.

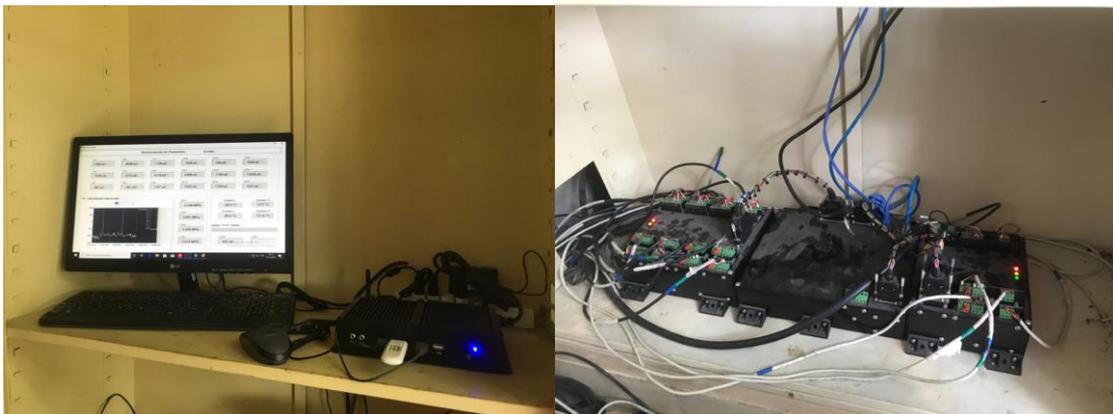
Os termopares utilizados nesta pesquisa foram os do tipo J e os sensores LM 35 que possuem um limite de erro de 1°C ou até 0,75%.

3.1.4 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é o meio utilizado para a coleta e armazenamento dos dados gerados através da instrumentação. O conjunto possui sistema de alimentação, placa de contato de canais, placas condicionadoras, um notebook e gabinete de proteção dos mesmos. As características deste sistema foram desenvolvidas de acordo com a necessidade do monitoramento, sendo as principais listadas a seguir.

- Taxa de amostragem de 800 leituras por segundo (0,8kHz);
- Resolução de 16 bits;
- 24 canais para leitura de *strain gages* de 120 ohms e células de pressão com capacidade de 1 Mpa e 2,5 Mpa, com taxa de amostragem de 800 leituras por segundo;
- 2 canais para leitura de termopares tipo J com taxa de amostragem de 1 leitura por segundo;
- 2 canais para leitura de sensores de temperatura LM 35 com taxa de amostragem de 1 leitura por segundo.
- Nas figuras 48(a) e 48 (b) é possível observar o sistema de aquisição de dados instalado e em operação.

Figuras 48 -(a) e (b): Sistema de aquisição de dados



Fonte: Arquivo pessoal

3.2 Métodos

Neste tópico serão apresentadas as características mecânica e funcional das misturas asfálticas, e será discutida a metodologia de escolha, instalação e análise da instrumentação do trecho experimental da BR-101 no estado de Pernambuco.

3.2.1 Seleção e características do trecho experimental

O trecho de monitoramento escolhido se localiza na BR-101, aproximadamente no quilômetro 69,8, no bairro do Curado na cidade de Recife em Pernambuco e possui cerca de 200 metros. Diante deste trecho se localiza a unidade local do DNIT, que foi utilizada como centro de apoio para a instalação e monitoramento do trecho experimental. A figura 49 apresenta a localização do trecho monitorado.

Figura 49 - Localização do trecho monitorado



Fonte: Arquivo pessoal

A obra em si, se trata da restauração de um trecho com alta incidência de tráfego na região de Recife. O pavimento, previamente, era composto de um revestimento de concreto de cimento Portland como base e uma camada de revestimento asfáltico de 6,0 centímetros. O reforço do pavimento se deu através da fresagem da camada de mistura

asfáltica e posterior reforço com 12,0 cm de binder da faixa B e 4,0 cm de revestimento asfáltico modificado por polímero, como pode ser analisado na Tabela 3.

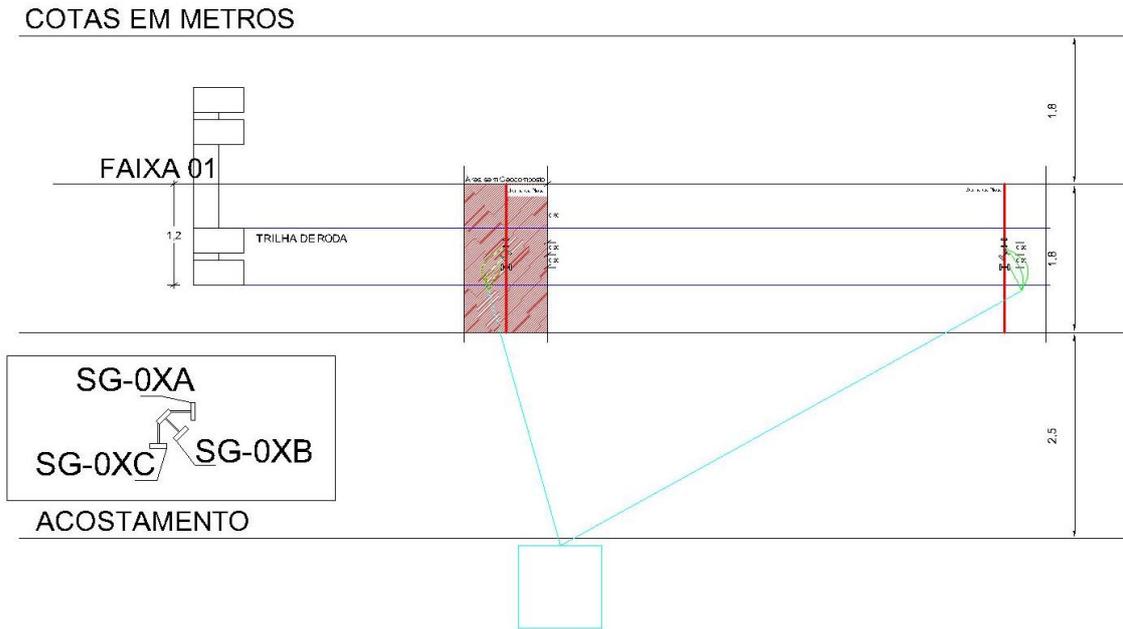
Tabela 3 - Características das camadas do pavimento monitorado

Estrutura	Espessura (cm)
Faixa C – AMP 55/75 (revestimento)	4,0
Faixa B – CAP 50/70 (binder)	12,0
Revestimento de Concreto Portland (pré-existente)	20,0
Concreto compactado a rolo CCR	10,0

Justamente pelo fato da base do pavimento ser formada por placas de concreto Portland, existiu uma preocupação com a propagação das tensões sofridas pelas solicitações do tráfego ao longo das juntas de dilatação através de trincas para as camadas superiores. Portanto, utilizou-se uma solução bastante difundida de se instalar geogrelhas entre a camada de concreto de cimento Portland e a do binder.

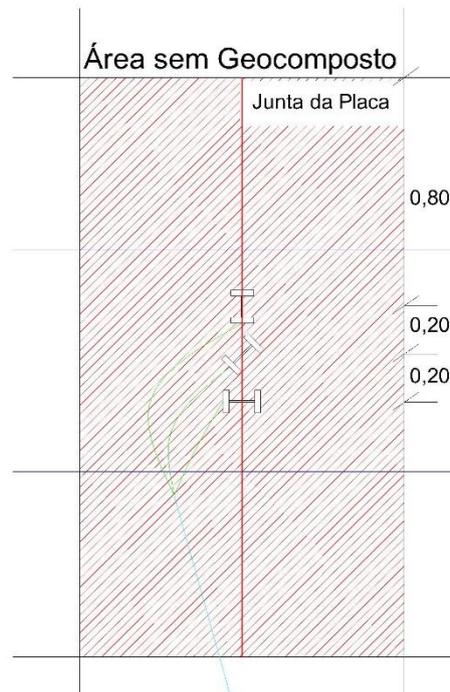
Para analisar a efetividade das geogrelhas, fez-se a instalação entre a camada de concreto de cimento portland e a do binder, de 3 *strain gages* sob formato de roseta em uma junta de dilatação com a aplicação da geogrelha e mais 3 em uma junta sem a instalação da geogrelha, como pode ser observado nas figuras 50 e 51.

Figura 50 - Croqui do posicionamento das juntas de dilatação onde foram instalados strain gages sob a camada do binder



Fonte: Arquivo pessoal

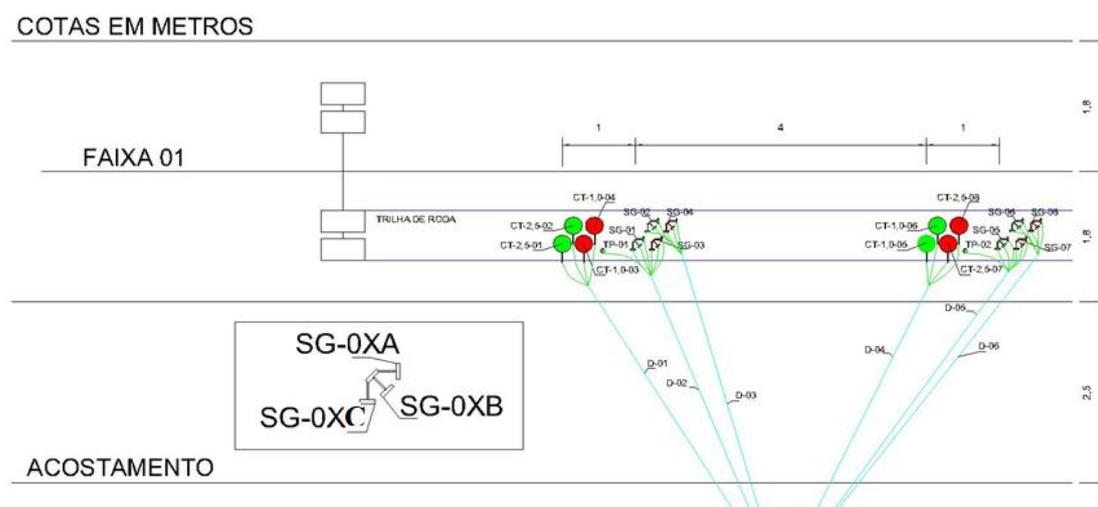
Figura 51 - Croqui representativo da área sem utilização de geogrelha



Fonte: Arquivo pessoal

Após esta etapa, foram instalados mais 9 *strain gages* em formato de roseta, 4 células de tensão e 2 termostatos sobre cada junta de dilatação, porém entre as camadas do binder e do novo revestimento. Como pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 - Croqui da instalação dos sensores entre as novas camadas do binder e do revestimento



Fonte: Arquivo pessoal

Portanto, ao total, foram instalados 24 *strain gages*, 8 células de tensão e 4 termostatos ao longo do trecho experimental monitorado.

3.2.2 Etapas da instalação do sistema de instrumentação

A execução da montagem dos sensores ocorreu no mês de abril de 2019 em parceria do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande com o DNIT de Pernambuco. Já a montagem do sistema de aquisição de dados ocorreu no mês de outubro do mesmo ano. As Figuras 53 a 68 ilustram o desenvolvimento desta montagem que durou dois dias.

Figura 53 - Recebimento dos instrumentos, conferência e verificação de sinais



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 54 - Passagem da fiação



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 55 - Preparação para colagem



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 56 - Colagem dos strain gages



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 57 - Colagem dos strain gages



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 58 - Aplicação de emulsão



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 59 - Aplicação de massa asfáltica passante na peneira N°4 para proteção mecânica dos sensores



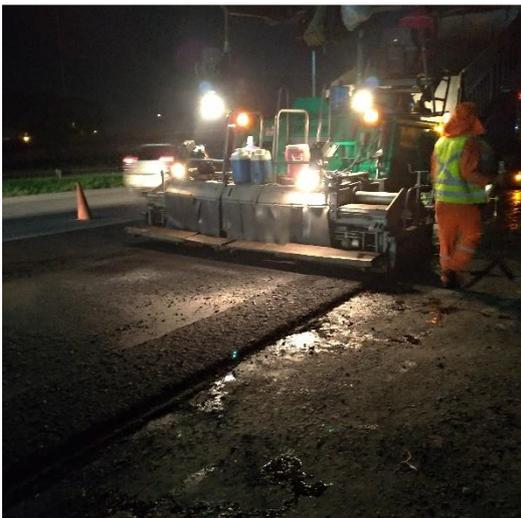
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 60 - Cobertura dos sensores com massa asfáltica



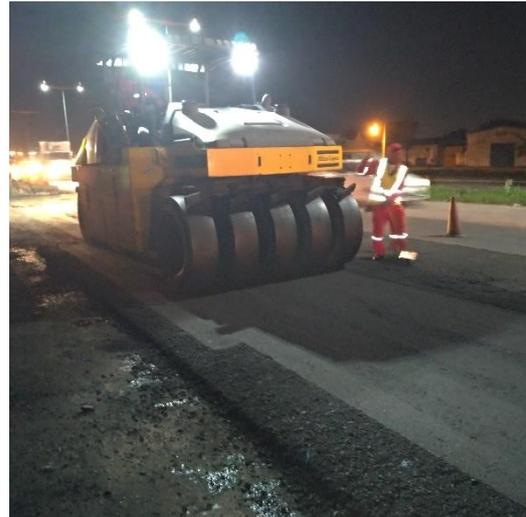
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 61 - Passagem da acabadora



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 62 - Passagem do rolo compactador



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 63 - Verificação do funcionamento dos sensores após a instalação



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 64 - Marcação do eixo da trilha de roda



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 65 - Colagem dos sensores



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 66 - Aplicação de emulsão e massa asfáltica fina



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 67 - Aplicação de massa asfáltica para proteção dos sensores



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 68 - Passagem da acabadora



Fonte: Arquivo pessoal

3.2.3 Caracterização mecânica

Para o trecho da BR-101, foram realizados ensaios em laboratório de caracterização mecânica, abrangendo o módulo de resiliência, *Flow Number* e o módulo dinâmico. A seguir serão apresentados os resultados para as faixas B (binder) e C (revestimento).

3.2.3.1 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência foi realizado a uma temperatura de 25°C, utilizando uma carga axial de 10% do valor da resistência a tração por compressão diametral, com um pulso de 1 Hz, de acordo com as determinações da norma DNIT 135/2010. Os resultados podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 - Módulos de resiliência das faixas B e C

Revestimento	CP 1 (Mpa)	CP 2 (Mpa)	CP 3 (Mpa)	Média (Mpa)
Faixa B	8732	8727	7877	8445
Faixa C	6865	7618	6628	7037

Bernucci et. al., (2008) afirmam que valores típicos do módulo de resiliência para concretos asfálticos a 25°C, giram em torno de 2000 a 8000 Mpa. Valores menores do módulo podem corresponder a ligantes modificados por polímero, como é o caso do ligante utilizado na Faixa C. Porém, diversos fatores como a carga utilizada, temperatura do ensaio e a granulometria dos agregados são fatores que podem influenciar nos resultados do módulo de resiliência. Nota-se que as misturas utilizadas para este trecho experimental possuem um alto grau de rigidez, necessário devido ao alto índice de tráfego na região.

3.2.3.2 Flow Number

O ensaio do *Flow Number* foi realizado de acordo com a norma DNIT 184/2018, utilizando o modelo de Franken para ajustar as curvas dos ciclos versus deformação plástica. As Figura 69 e 70 ilustram os gráficos de resultados das misturas da faixa B e C, respectivamente.

Figura 69 - Ciclos versus deformação plástica - Faixa B

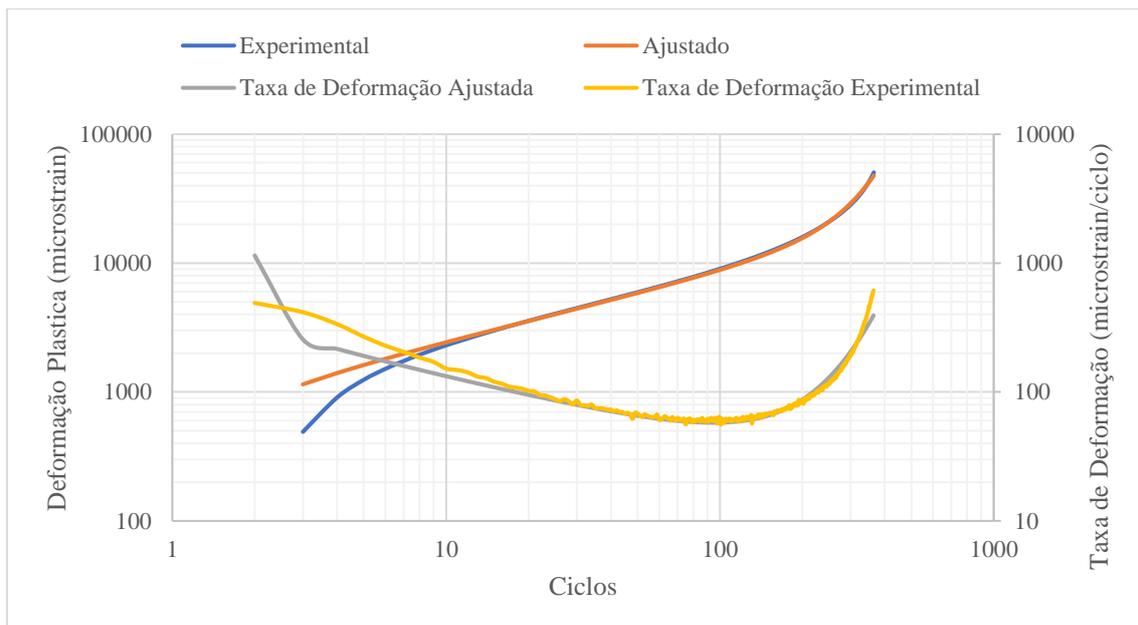
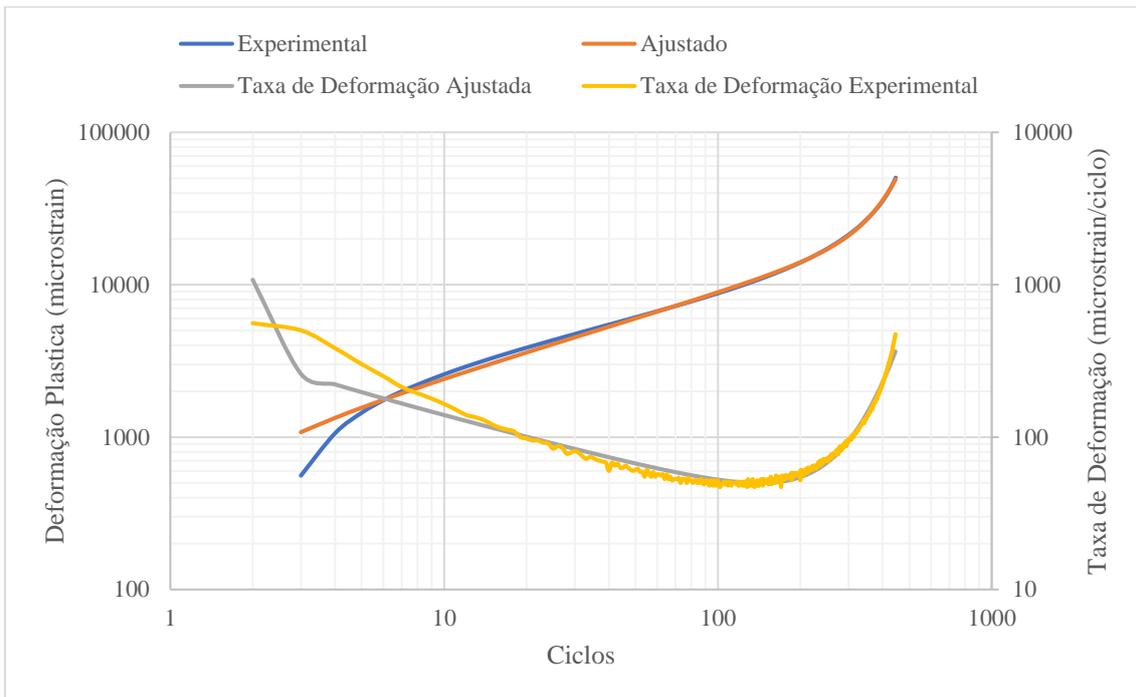


Figura 70 - Ciclos versus deformação plástica - Faixa C



Após encontrar o ponto de inflexão da curva, foi possível definir-se o *Flow Number* para cada um dos corpos de prova ensaiados, como pode ser observado na Tabela 5:

Tabela 5 - Flow Number das Faixas B e C

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

Como discutido no item 2.5, a granulometria utilizada nas misturas asfálticas possui uma influência predominante em relação ao ligante asfáltico no que concerne a resistência a deformação permanente. Usualmente misturas com granulometrias mais grosseiras possuem uma maior resistência, o que não foi o observado nos revestimentos utilizados.

Este fenômeno também foi constatado na pesquisa de Costa (2018). Utilizando misturas com granulometrias similares e ligantes puro e modificado por polímero, foi observada a grande influência que o ligante possuía sobre a resistência à deformação permanente das misturas. Portanto a utilização do AMP 55/75, concedeu um grande acréscimo de resistência a mistura da Faixa C, o que pode ser observado devido ao valor do *Flow Number* ser mais elevado, apesar de se tratar de uma mistura mais fina.

3.2.3.3 Módulo Dinâmico

O ensaio do módulo dinâmico foi realizado seguindo as prerrogativas definidas pela norma DNIT 416/2019. Para isto, utilizou-se a prensa AMPT, efetuando-se o ensaio nas temperaturas de 4, 20 e 40°C. As curvas mestras do módulo dinâmico das misturas das Faixas B e C podem ser observadas nas Figuras 71 e 72.

Figura 71 - Curva mestra - Faixa B

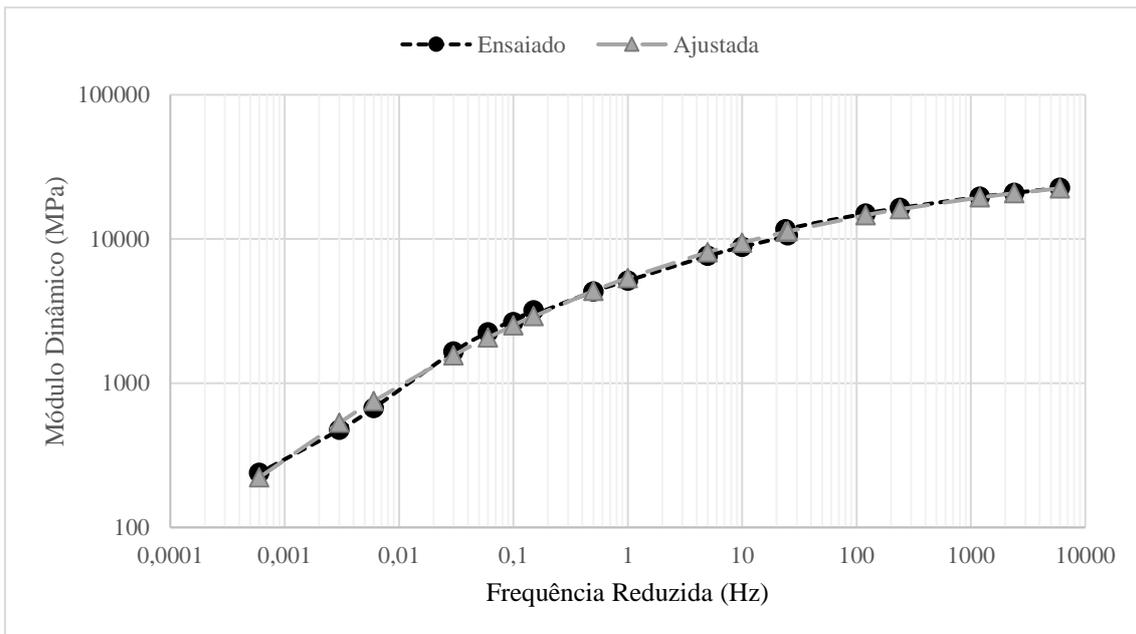
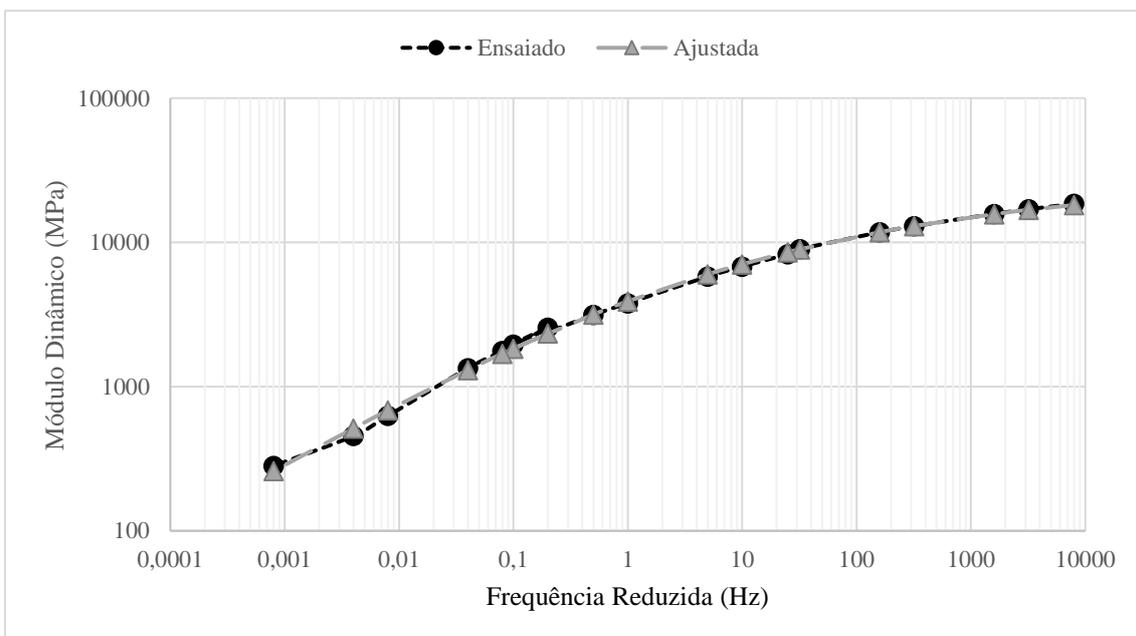


Figura 72 - Curva mestra - Faixa C



Através da análise do módulo dinâmico versus a frequência reduzida, é possível notar uma maior rigidez da mistura asfáltica da faixa C, apontado pela menor amplitude

apresentada nos valores absolutos do módulo dinâmico. Apresentando, portanto, menores deformações para as mesmas cargas e frequências aplicadas em ambas as misturas asfálticas e ainda uma menor susceptibilidade a variação de temperatura. Este comportamento já era esperado devido a maior rigidez apresentada pela mistura asfáltica da faixa C, devido ao uso de asfalto modificado por polímero.

3.2.4 Caracterização funcional

No trecho da BR-101, foram realizados ensaios em campo de caracterização funcional, abrangendo o método do pêndulo britânico e o da mancha de areia. Devido à estrutura bastante rígida do pavimento, optou-se por não realizar o método da treliça metálica, por não ser possível observar deformações relativamente significativas.

3.2.4.1 Pêndulo britânico

O trecho estudado é composto por 200 metros e foi dividido em 11 estacas, distando entre si 20 metros. A Tabela 6 expõe os valores encontrados durante o levantamento em campo.

Tabela 6 - Resistência a derrapagem através do método do pêndulo britânico

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
875	113	114	105	112	115	112	Muito rugosa
876	109	104	103	103	107	105	Muito rugosa
877	110	108	107	108	115	110	Muito rugosa

O manual de restauração de pavimentos asfálticos DNIT – IPR-720, 2006, recomenda valores de resistência a derrapagem maiores que 55, o que corresponderia a uma superfície medianamente rugosa a rugosa. Os requisitos de microtextura normatizados são satisfeitos, já que todos os valores encontrados no ensaio de campo correspondem a uma superfície classificada como muito rugosa.

Portanto, a superfície do pavimento possui características essenciais para que não ocorra a derrapagem de veículos devido a aquaplanagem, contribuindo assim para a segurança dos usuários.

3.2.4.2 Mancha de areia

Igualmente ao pêndulo britânico, o método da mancha de areia foi realizado nas estacas de número 867 a 877. As alturas médias da mancha de areia e suas respectivas classificações podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Alturas médias da mancha de areia

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
875	30,00	32,00	30,00	32,00	0,33	Fina
876	32,50	28,00	29,00	27,50	0,37	Fina
877	35,50	29,50	29,50	32,00	0,32	Fina

Limites sugeridos pelo manual de restauração de pavimentos asfálticos DNIT – IPR-720 (2006) para a altura da mancha de areia são da ordem de 0,6 mm a 1,2 mm. De acordo com a classificação do manual, a textura superficial do revestimento é classificada como fina. Este valor inferior ao recomendado, ocorreu devido a granulometria da mistura asfáltica da faixa C possuir uma estrutura bastante fechada.

3.2.5 Desenvolvimento do *software* para o tratamento dos dados

Para o registro das leituras de tensão e deformação dos veículos, utilizou-se como critério a medição de leituras correspondentes a pelo menos 80% do peso de um eixo padrão rodoviário permitido pela legislação brasileira, que é de 8,2 toneladas. Estes arquivos foram então armazenados no sistema de aquisição de dados para cada canal de leitura, no formato excel.

Aliado a estes critérios, a alta quantidade de leituras para cada veículo (cerca de 800), tornou necessário o desenvolvimento de um software para a filtração dos dados relevantes de cada veículo transitante na rodovia. Este *software* foi desenvolvido na linguagem *python script*.

A partir dele, busca-se em cada canal de *strain gages* a leitura máxima e mínima de deformação para encontrar a diferença de deformação ocorrida com a passagem do veículo. Já para os canais das células de tensão, é registrado o valor máximo da pressão desenvolvida. Os canais dos termopares, devido a leitura ser de apenas 1 segundo, registram apenas o valor da temperatura no momento da passagem do veículo. O código completo pode ser encontrado nos arquivos anexos desta pesquisa.

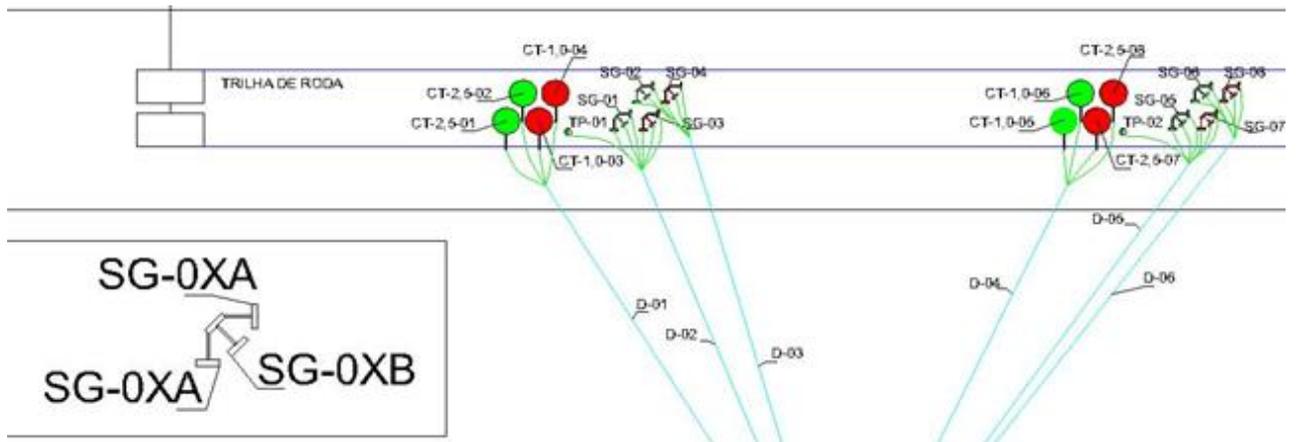
Por fim, o *software* organiza os valores dos canais dos *strain gages*, células de carga e termopares em um novo arquivo excel correspondente a passagem de todos os veículos relevantes durante o tempo desejado, o que se provou útil para a confecção e análise de gráficos.

3.2.6 Validação do sistema de instrumentação

A validação do sistema de instrumentação passou por três etapas principais. A instalação dos sensores de instrumentação, a conexão dos sensores ao sistema de aquisição de dados e o processamento dos dados com o auxílio do *software* desenvolvido durante a pesquisa.

Após a instalação dos sensores, foram criados canais para o recebimento dos dados de cada sensor a partir do mês de outubro de 2019, os quais podem ser analisados com auxílio da legenda da Figura 73 e das Tabelas 8, 9 e 10.

Figura 73 - Sensores instalados com sua respectiva legenda



Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 8 - Inventário dos canais associados aos strain gages

<i>Strain gage</i>	Canal
Geogrelha A	-
Geogrelha B	CH 13
Geogrelha C	-
Sem Geogrelha A	-
Sem Geogrelha B	CH 22
Sem Geogrelha C	CH 9
01 A	-
01 B	-
01 C	-
02 A	CH 4
02 B	CH 5
02 C	-
03 A	-
03 B	-
03 C	CH 16
04 A	CH 14
04 B	CH 24
04 C	-
05 A	CH 12
05 B	CH 2

05 C	CH 1
06 A	CH 3
06 B	CH 7
06 C	CH 23
07 A	CH 10
07 B	CH 6
07 C	-
08 A	-
08 B	-
08 C	CH 15

Tabela 9 - Inventário dos canais associados as células de carga

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

Tabela 10 - Inventário dos canais associados aos termopares

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

Como pode ser observado na Figura 73, os *strain gages* na direção longitudinal receberam a sigla A, a 45°, B, e na direção transversal a sigla C. Além de serem classificados em com/sem geogrelha para os sensores instalados abaixo da camada do

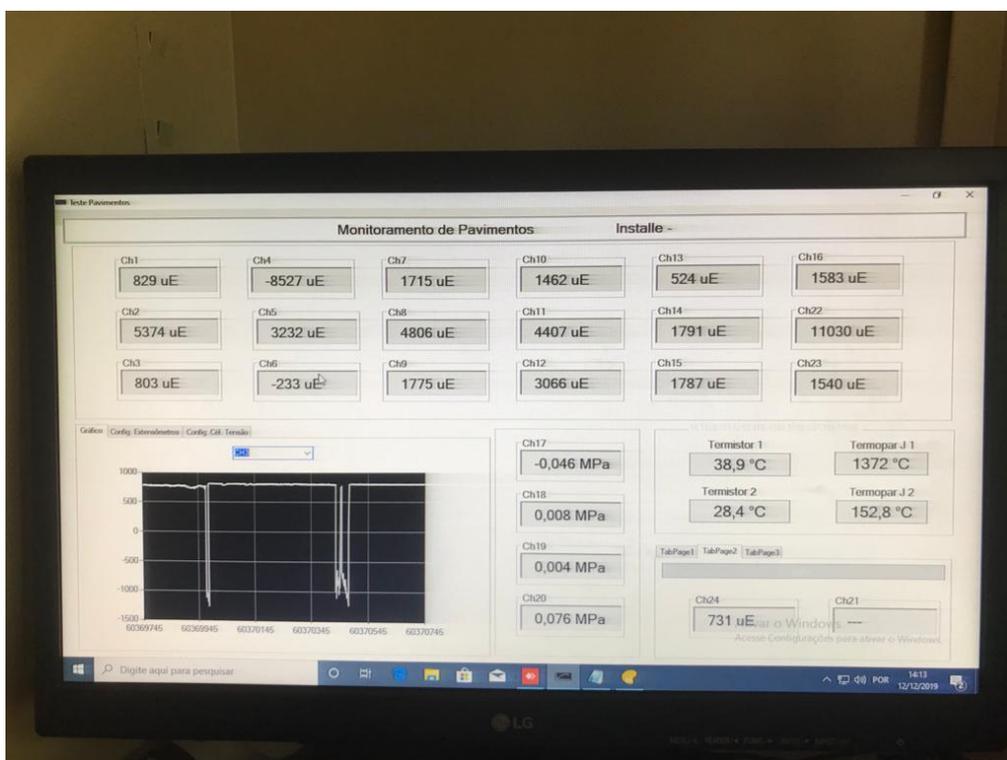
binder e de numeração de 1 a 8 para os sensores instalados entre o binder e a nova camada de revestimento. Foi observado que dos 30 *strain gages* instalados inicialmente, 17 estão em pleno funcionamento. O que corresponde a cerca de 57% dos sensores.

Já as células de tensão foram classificadas com a numeração de 1 a 8 e apresentaram uma taxa de falha de 50%, notadamente falharam as células com capacidade de 1MPa, o que provavelmente ocorreu devido às elevadas cargas do tráfego. Os termopares do tipo J apresentaram falha na fiação e, portanto, não apresentaram leitura. Enquanto os sensores do tipo LM funcionaram perfeitamente desde a sua instalação.

Estas falhas já eram previstas através da análise de várias pesquisas realizadas acerca da instrumentação de trechos pavimentados. Diversos fatores são responsáveis para a perda das leituras dos sensores. Onde se destacam, principalmente, a alta temperatura de compactação do revestimento devido a utilização de um ligante modificado por polímero (acima de 150°C) e a elevada taxa de tráfego incidente sobre o pavimento, acarretando no dano dos sensores.

A Figura 74 apresenta o layout da obtenção dos dados nos canais através do sistema de aquisição de dados.

Figura 74 - Leituras dos sensores dos canais no sistema de aquisição de dados



Fonte: Arquivo pessoal

Posteriormente iniciou-se a etapa de coleta e processamento dos dados com o auxílio do *software* criado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

3.2.7 Retroanálise das deflexões com o auxílio do FWD

O ensaio de campo do FWD, foi realizado seguindo os procedimentos do DNER PRO 273. Após a realização do ensaio, foram realizados levantamentos deflectométricos com o auxílio do programa BackMeDiNa. Este procedimento foi realizado com o intuito de se comparar as deflexões medidas nos sensores de instrumentação, com as medidas pelo aparelho FWD.

Esta etapa da pesquisa foi realizada em parceria entre o DNIT do estado de Pernambuco e a empresa JBR. O aparelho FWD e o trecho experimental analisado podem ser vistos na Figura 75.

Figura 75: Trecho experimental analisado com o FWD



Fonte: Arquivo pessoal

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados primários da instrumentação

Após a instalação dos sensores, foram plotados dados da deformação causada pela passagem de um veículo aleatório em *strain gages* nos sentidos longitudinal, a 45° e transversal. Isto foi realizado em canais localizados entre a camada do binder e do revestimento, para analisar-se a confiabilidade dos dados coletados, como pode ser observado das Figuras 76 a 78.

Figura 76 - Deformação Longitudinal

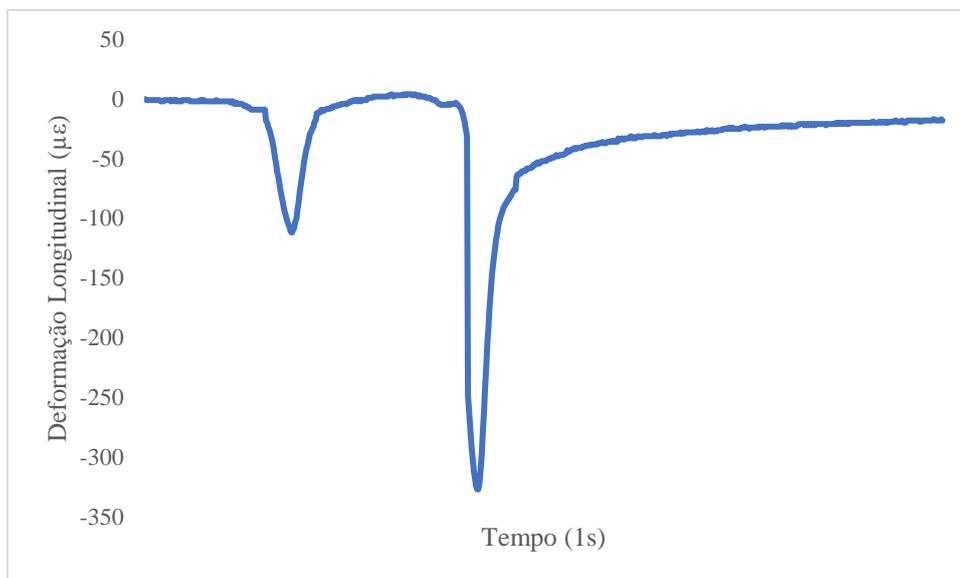


Figura 77 - Deformação a 45°

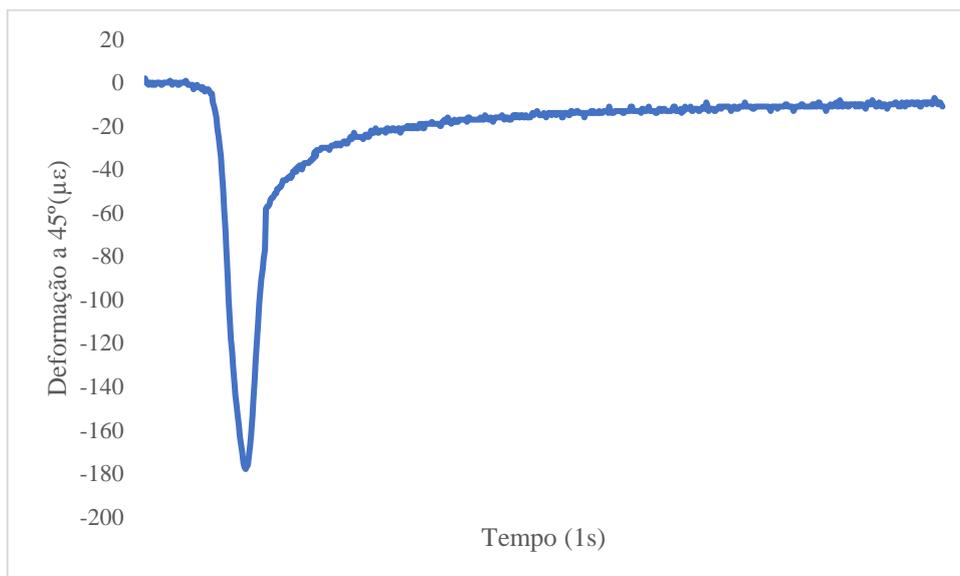
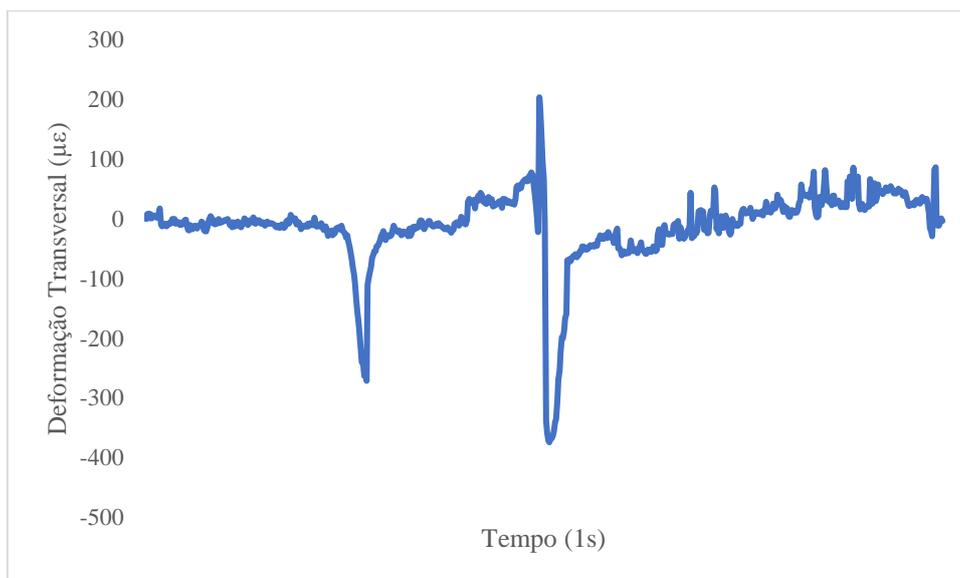


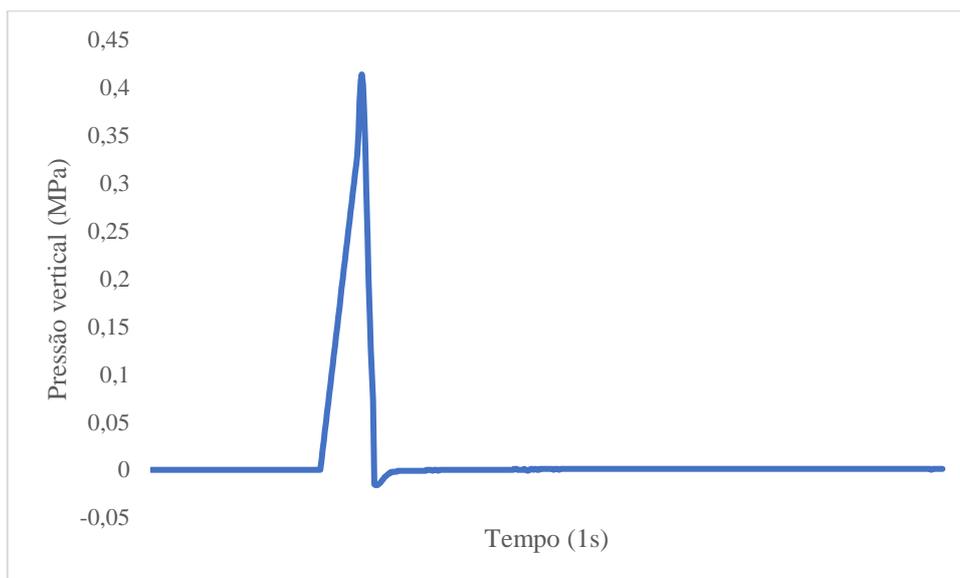
Figura 78 - Deformação Transversal



Pode-se notar claramente nos gráficos de deformação longitudinal e transversal, a passagem dos eixos do veículo, exceto por uma leve influência de ruídos no canal de deformação transversal. Além disso, é possível verificar altos valores máximos de deformação, na ordem de 330 a 380 µε, valores similares aos encontrados por Gonçalves (2002) e outros autores, denotando que se trata de um trecho com tráfego bastante pesado.

Posteriormente, foi observada a pressão vertical causada por este veículo em uma célula de pressão, como pode ser visto na Figura 79.

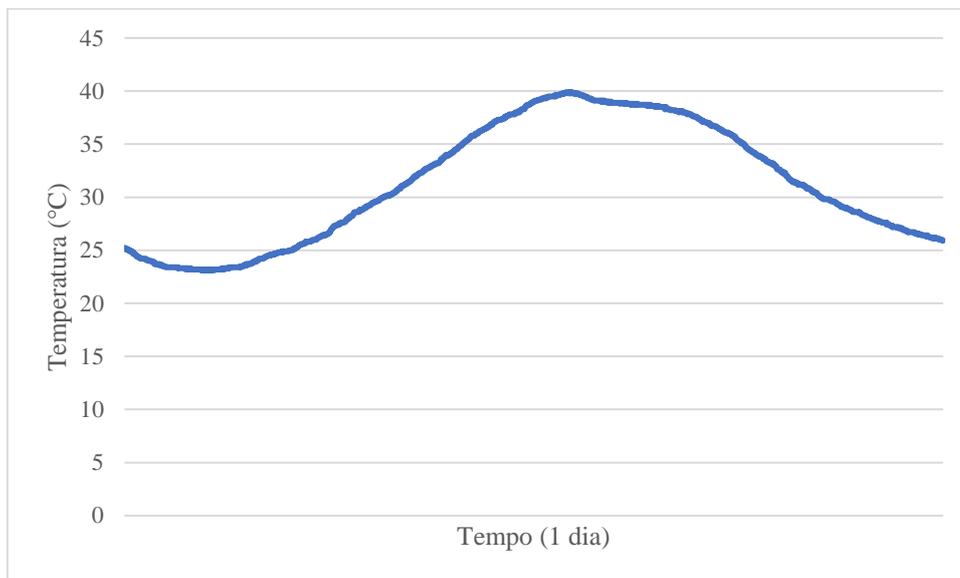
Figura 79 - Pressão vertical



De acordo com o gráfico, a pressão vertical imposta pelo veículo ao pavimento é de cerca de 420 kPa, valor bastante elevado, porém esperado, como foi observado anteriormente nas deformações longitudinal e transversal.

Por fim, foram plotados gráficos da variação de temperatura durante 24 horas, a 40 e a 160 mm de profundidade. Visto que a sazonalidade e as temperaturas possuem uma influência intrínseca sobre a resistência da mistura asfáltica, devido a sua natureza viscoelástica. Os gráficos podem ser observados nas figuras 80 e 81.

Figura 80 - Variação diária da temperatura a 40 mm de profundidade



Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia, as temperaturas da cidade de Recife raramente ficam inferiores a 20°C ou superiores a 35°C. Esta baixa amplitude de variação se dá principalmente ao clima tropical da região. Desta maneira, nota-se na Figura 80 temperaturas da ordem de 23 a 40°C e na Figura 81, temperaturas variando entre 17 a 32°C.

Estas temperaturas mais elevadas são causadas pela irradiação sofrida pelo ligante asfáltico, aumentando ainda mais a temperatura do pavimento. Em contrapartida, temperaturas mais amenas como a de 17°C são causadas devido a profundidade da instalação do sensor.

4.2 Retroanálise dos levantamentos do FWD

O levantamento não-destrutivo com auxílio do equipamento FWD foi realizado de acordo com os parâmetros adotados pela DNER – PRO 273/96. Primeiramente foram realizados levantamentos deflectométricos em 3 pontos, utilizando uma carga de 41 Kn. As leituras foram realizadas com distâncias de 0, 200, 300, 450, 650, 900, 1200, 1400 e 1600 mm do local de impacto.

Posteriormente, com o auxílio do software BackMeDiNa, foi realizada a retroanálise das bacias deflectométricas para encontrar-se os módulos de resiliência estimados a partir do procedimento FWD. As bacias deflectométricas medidas em campo e calculadas pelo software podem ser observadas nas Figuras 82 a 84.

Figura 82 - Bacia deflectométrica I (41 KN)

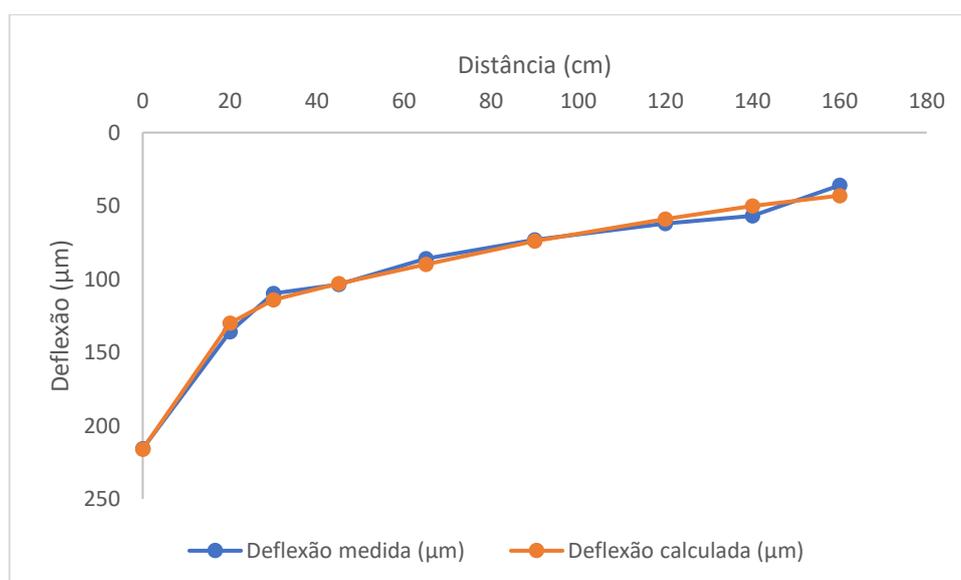


Figura 83 - Bacia deflectométrica II (41 KN)

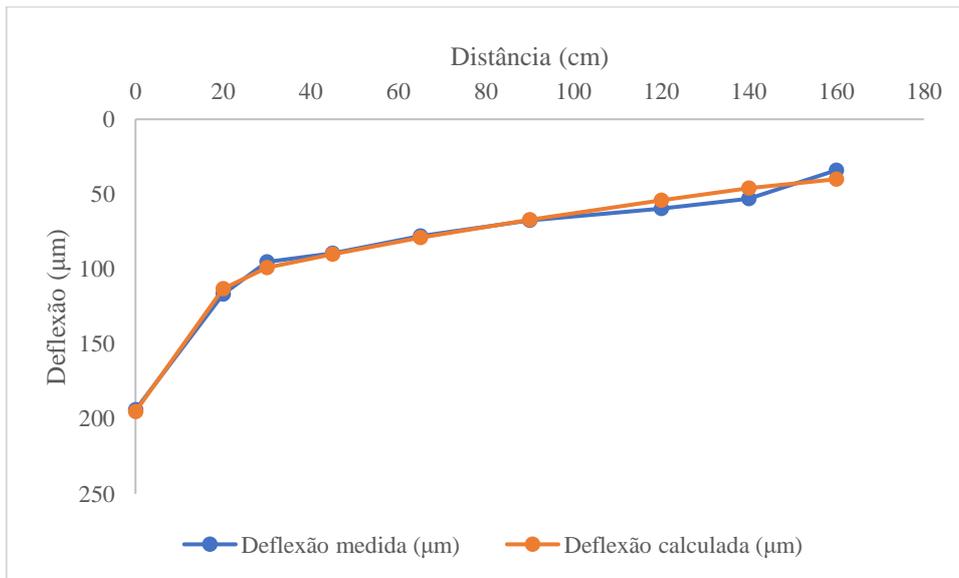
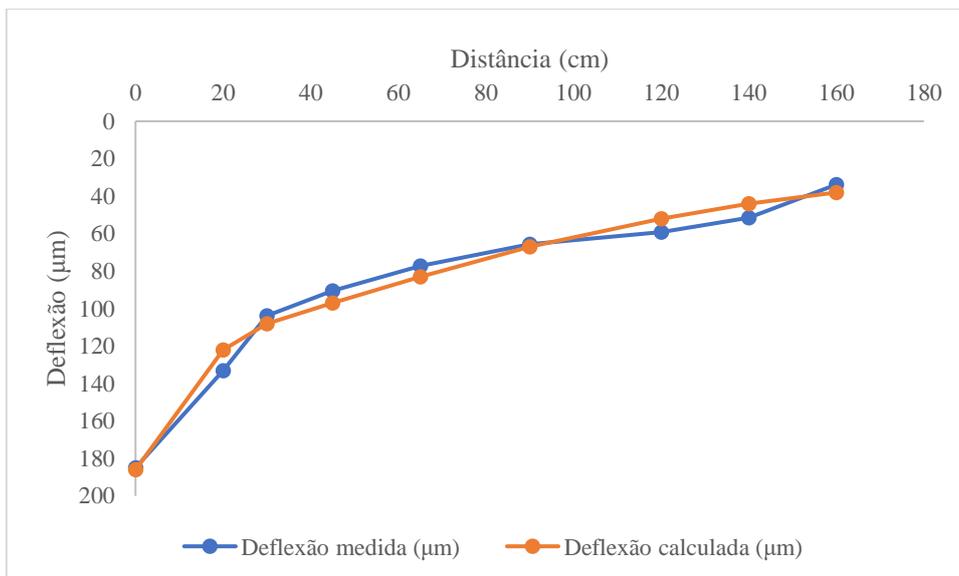


Figura 84 - Bacia deflectométrica III (41 KN)



Nota-se a partir dos gráficos, as baixas deflexões encontradas, chegando ao máximo a valores de 200 micrometros no local de impacto. Isto ocorre devido à alta rigidez fornecida pela base do pavimento ser uma placa de concreto, conferindo uma alta rigidez a estrutura. Os valores estimados dos módulos de resiliência de cada camada podem ser conferidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Módulos de resiliência das camadas (41 KN)

Bacia	MR Revestimento (MPa)	MR Placas de Concreto (MPa)	MR CCR (Mpa)	MR Subleito (Mpa)
41 KN I	923	26987	15063	186
41 KN II	964	36388	17819	203
41 KN III	1284	24810	6158	209
Média	1057	29395	13013	199

Os módulos de resiliência do revestimento asfáltico possuem valores muito reduzidos em relação aos módulos encontrados em laboratório, que foram de 8445 MPa para a faixa B e 7037 Mpa para a faixa C. Isto pode ter ocorrido devido a espessura maciça do revestimento, além de uma interferência gerada pela alta resistência das subcamadas de concreto de cimento Portland do pavimento.

Já as camadas de concreto de cimento Portland e de concreto compactado a rolo possuíram módulos médios de 29395 MPa e 13013 MPa, valores considerados plausíveis devido a rigidez e ao envelhecimento do material cimentício.

Em seguida, foram realizados os levantamentos deflectométricos diretamente sobre os pontos em que foram instalados os sensores da instrumentação, porém utilizando uma carga de impacto de 81 KN, para a obtenção de maiores deflexões. Sendo o levantamento I correspondente ao local sem geogrelha e o levantamento II correspondente ao com geogrelha. As Figuras 85, 86 e a Tabela 12 trazem os resultados obtidos.

Figura 85 - Bacia deflectométrica I (81 KN)

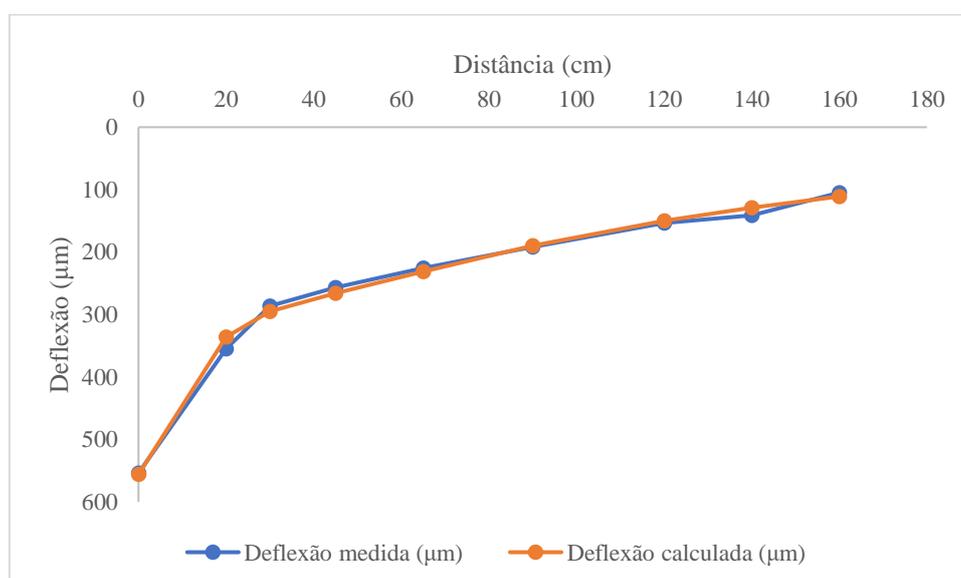


Figura 86 - Bacia deflectométrica II (81 KN)

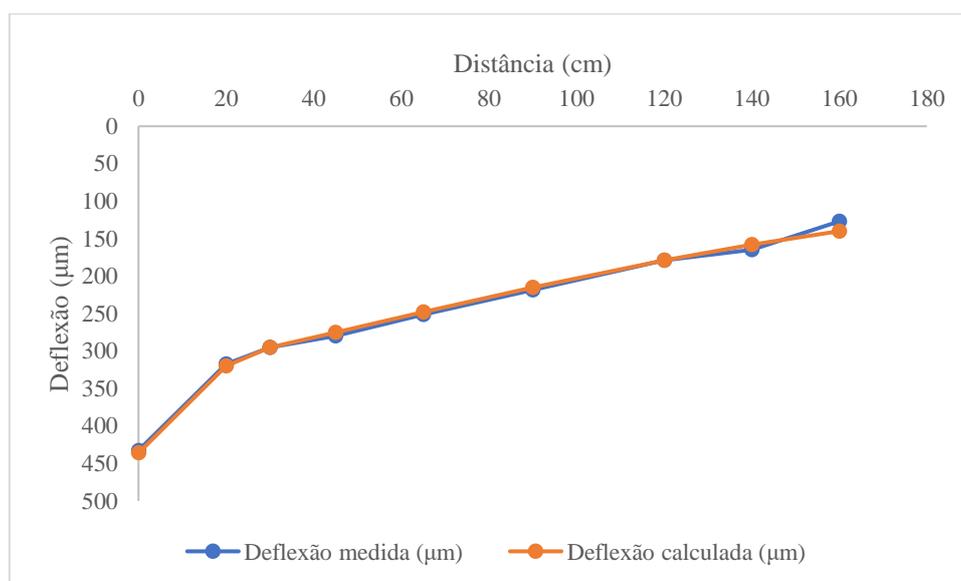


Tabela 12 - Módulos de resiliência das camadas (81 KN)

Bacia	MR Revestimento (MPa)	MR Placas de Concreto (MPa)	MR CCR (MPa)	MR Subleito (MPa)
81 KN I	719	20041	11084	144
81 KN II	1389	33835	17279	116

Pode-se observar menores deflexões e maiores módulos de resiliência obtidos na estaca com a utilização da geogrelha. Isto ocorre pela geogrelha conferir uma maior amarração entre as camadas, fazendo com que as mesmas trabalhem de forma conjunta, e, possuindo assim uma maior resistência mecânica.

4.3 Tensões e deformações estimadas

Para a análise das deformações desenvolvidas no pavimento, utilizou-se o *software* AEMC (análise elástica de múltiplas camadas), desenvolvido junto ao programa MeDiNa. Foram utilizados os valores de módulo de resiliência encontrados com o auxílio do FWD.

As Tabelas 13 e 14 trazem um resumo dos valores de deformação e pressão vertical encontrados a uma profundidade de 4 e de 16 centímetros.

Tabela 13 - Valores de deformação e pressão vertical estimados pelo AEMC a 4 cm de profundidade

BACIA	Deformação Longitudinal (μm)	Deformação Transversal (μm)	Pressão Vertical (kPa)
41 KN	435	22	546
81 KN I	640	33	546
81 KN II	330	16	546

Tabela 14 - Valores de deformação e pressão vertical estimados pelo AEMC a 16 cm de profundidade

BACIA	Deformação Longitudinal (μm)	Deformação Transversal (μm)	Pressão Vertical (kPa)
41 KN	379	171	376
81 KN I	556	251	376
81 KN II	289	132	376

Como previsto inicialmente, os valores de deformação longitudinal estão situados aproximadamente entre 0,3 e 0,6 μm . A deformação longitudinal apresenta uma diminuição com o aumento de profundidade devido a dissipação da tensão aplicada pelos veículos, como ocorre de forma similar com a pressão vertical. Já a deformação transversal possui um comportamento inverso, com o aumento da deformação conforme profundidades maiores são alcançadas.

4.4 Tensões e deformações medidas através da instrumentação

A partir dos dados obtidos com o auxílio da instrumentação no período de 6 de janeiro até 12 de janeiro de 2020, utilizou-se o *software* para compilar valores diários médios de deformações e de pressão vertical. Isto foi feito para validar a eficácia da instrumentação, através da análise dos valores médios encontrados. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 15 e nas Figuras 87 a 88.

Tabela 15 - Deformações e pressão vertical entre 06 e 12 de Janeiro

Data	Deformação Longitudinal (μm)	Deformação Transversal (μm)	Pressão Vertical (kPa)
06/Janeiro	332,3	238	361
07/Janeiro	319,1	272,9	474
08/Janeiro	297,9	249,1	371
09/Janeiro	273,1	238,5	384
10/Janeiro	353,2	259,4	369
11/Janeiro	453,1	285,6	380
12/Janeiro	323,5	279,7	374

Figura 87 - Deformações no período entre 06 e 12 de Janeiro

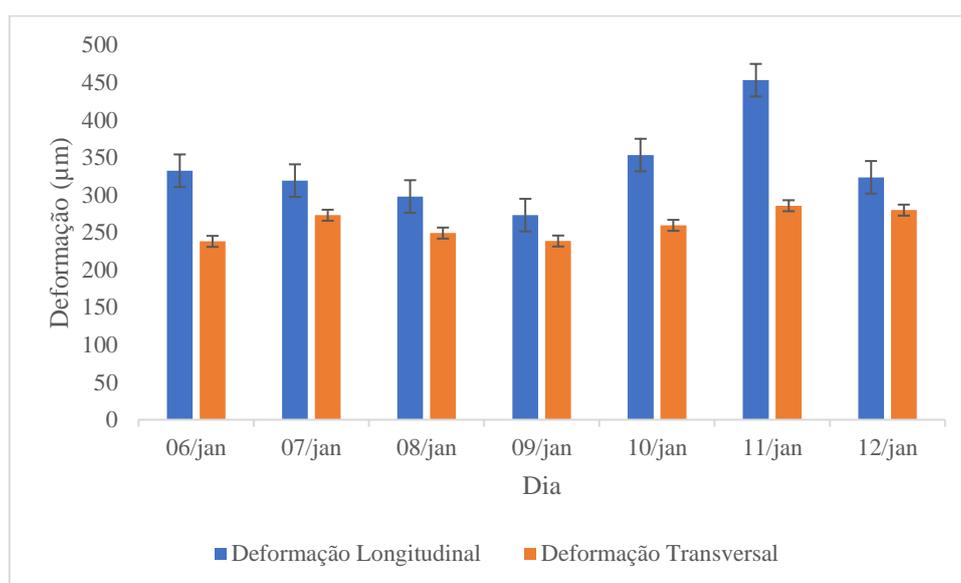
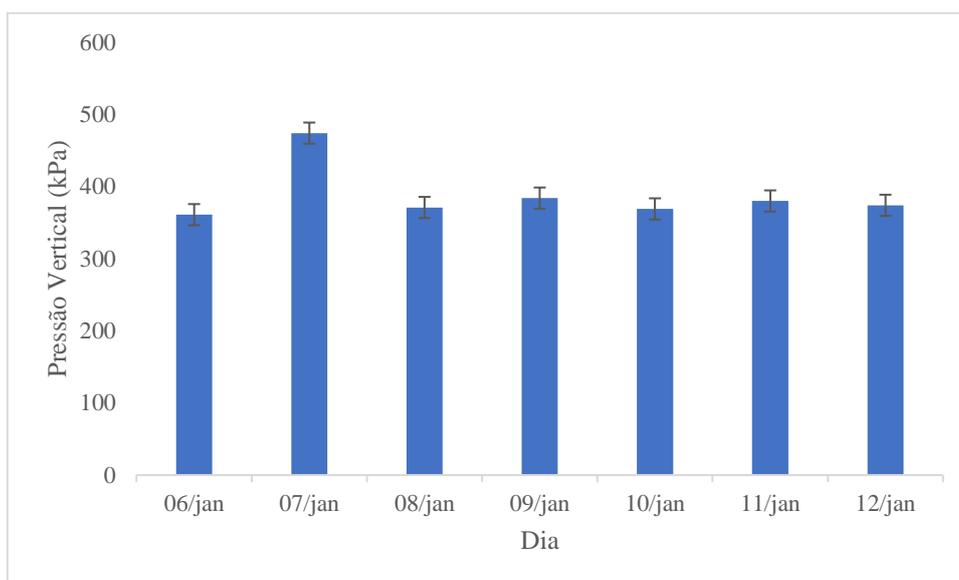


Figura 88 - Pressão vertical no período entre 06 e 12 de Janeiro



Pode-se notar a partir das Figuras 87 e 88 que as deformações e pressões verticais no período estudado possuem valores bastante próximos. Esta variação pode ocorrer por conta de diversos fatores diferentes, tais como, variação de temperatura, quantidade e horário de tráfego e intempéries.

Após a obtenção dos dados calculados através do AEMC a 16 centímetros de profundidade e da instrumentação fez-se uma comparação entre os mesmos, utilizando as bacias deflectométricas médias de 41 Kn, como pode ser observado nas Figuras 89 a 91.

Figura 89 - Comparação entre a Deformação Longitudinal

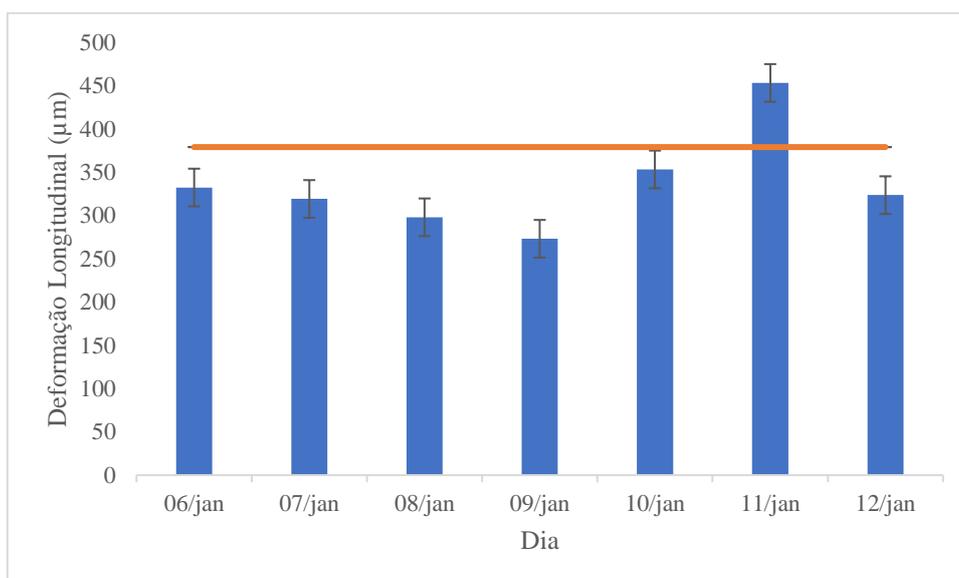


Figura 90 - Comparação entre a Deformação Transversal

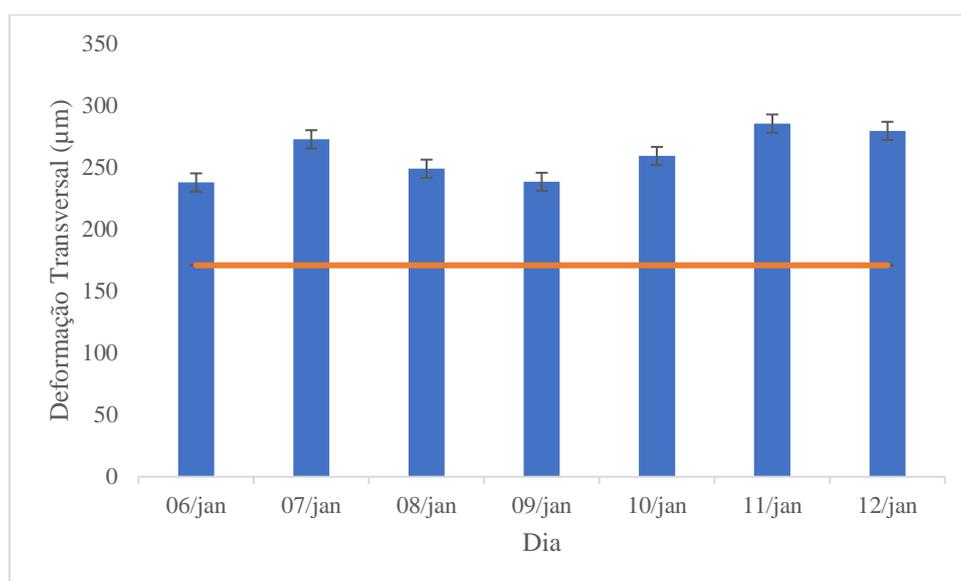
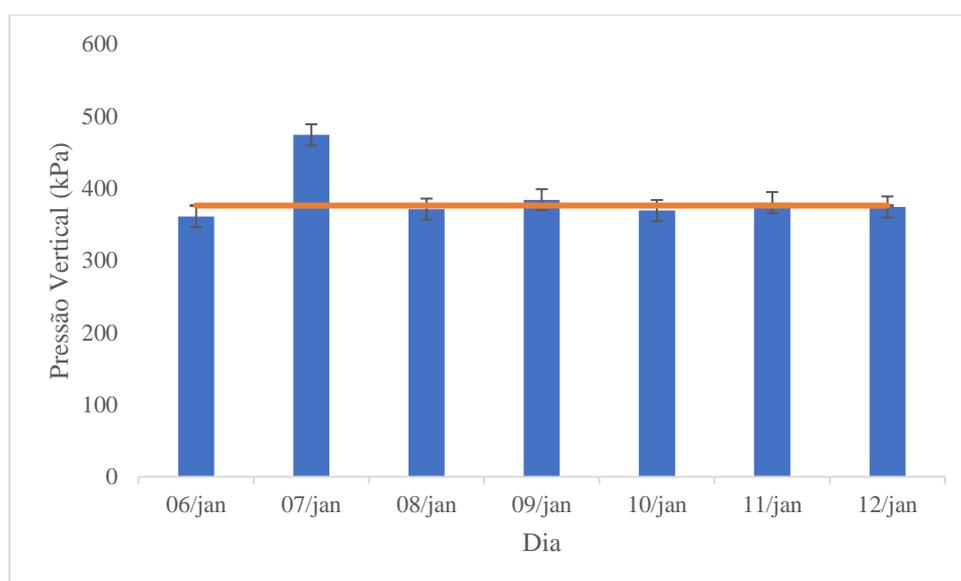


Figura 91 - Comparação entre a Pressão Vertical



Nota-se nos gráficos a baixa variação entre as tensões e deformações previstas comparando-se o AEMC e a instrumentação. As deformações longitudinais possuíram variações de cerca de 27%, e as transversais de até 66%, possuindo assim uma variação maior. As pressões verticais possuíram o resultado mais similar, na ordem de 26%.

Como já citado anteriormente, vários fatores podem ser considerados para estas variações. Com ênfase nas cargas dos veículos. Estes, podem possuir pesos variados, devido ao tamanho do veículo, ou também a carga transportada. Existem veículos que transitam pelas rodovias com cerca de 200% da carga permitida, o que é um dos principais fatores responsáveis pela deterioração dos pavimentos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados dos métodos de caracterização funcional demonstraram que o trecho estudado da BR-101 possui uma microtextura muito rugosa, de acordo com a classificação do ensaio do pêndulo britânico. Já a macrotextura foi classificada como fina, o que é representado por um valor menor do que o recomendado pelo DNIT-IPR-720 (2006).

A instalação dos sensores de instrumentação ocorreu de forma planejada, com o funcionamento de 57% dos *strain gages*, além de 50% das células de pressão, tendo a falha ocorrido nas 4 células de pressão com capacidade máxima de 1 MPa. Em relação aos termopares, os sensores do tipo LM funcionaram perfeitamente e os do tipo J apresentaram falha devido a complicações com a fiação.

As análises primárias dos sistemas de instrumentação se provaram bastante promissoras, demonstrando valores de deformação entre 330 e 380 $\mu\epsilon$ e de pressão vertical de cerca de 420 kPa, como era esperado com base na literatura. As variações de temperatura diária se mostraram bastante similares às leituras fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

Os resultados da retroanálise a partir do método do FWD e com o auxílio do software BackMeDiNa possuíram uma alta confiabilidade, detendo valores de RMS inferiores a 5%. Além disso, os valores dos módulos de resiliência se mostraram bastante análogos a valores comuns aos materiais empregados. Exceto pelo revestimento asfáltico, que obteve valores de módulo inferiores aos encontrados em laboratório, o que foi ocasionado pela alta rigidez apresentada pela nova base e sub-base da placa de concreto e do CCR, respectivamente.

A utilização do *software* AEMC, mostrou-se como uma ferramenta bastante eficaz para estimar valores de tensão e deformação. Encontrando-se valores próximos aos estimados através dos sensores utilizados durante a instrumentação. Comparando-se valores encontrados com o AEMC e a instrumentação, foram observadas variações de até 27% nas deformações longitudinais, 66% nas deformações transversais e até 26% nas pressões verticais.

Portanto, a utilização da instrumentação *in situ* se provou como um artifício de grande valor para a análise do desempenho estrutural do pavimento estudado no trecho

experimental da BR-101 na cidade de Recife. Demonstrando valores de tensão e deformação similares aos encontrados na utilização de outros métodos de análise. Salientando-se a grande influência da temperatura no comportamento das misturas asfálticas.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Levando-se em consideração os resultados encontrados na presente pesquisa e visando um conhecimento mais aprofundado acerca do tema estudado, são feitas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Criar um banco de dados para o armazenamento e processamento das informações coletadas e assim buscar-se uma melhor padronização da instrumentação;
- Correlacionar as variações das deformações com as variações sazonais e diárias de temperatura;
- Analisar a correspondência entre pressão vertical e deformações longitudinal e transversal, para assim estimar módulos de resiliência com base nos diversos veículos transeuntes;
- Estudar a influência das direções de instalação dos *strain gages* sobre a deformação encontrada em campo;
- Relacionar valores de pressão vertical e deformação com os encontrados em outros *softwares* de análise elástica, tais como o Elmod e o Elsyn;
- Instalar uma balança dinâmica para os veículos pesados e assim relacionar valores de peso, tensão e deformação encontrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **AASHTO T-321**. Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. Washington, DC, 2017.

_____. **AASHTO TP-107**. Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. Washington, D.C., 2014.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR NF P-98-216-7: Determination de la Macrotexture - partie 7: Determination de Hauteur au Sable. Paris, 1999.

ALBERT, W. A. J. **Über Treibseile am Harz**. Deutschland, 1838.

_____. **ASTM D4695**. Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. Philadelphia, 2015.

_____. **ASTM D7460**. Standard Test Method for Determining Fatigue of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending. Philadelphia, 2010.

_____. **ASTM E303**. Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. Philadelphia, 2018.

BARCA, M. A.; NOGUEIRA, S. P. **Análise de Técnicas de Conservação de Pavimentos Rodoviários**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

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

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2016.

BOEIRA, F. D. **Estudo da Rigidez, da Deformação Permanente e da Fadiga de Misturas Asfálticas com Ligantes Convencionais e Modificados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BROWN, S. F. & BRODRICK, B. V. **25 years experience with the pilot-scale Nottingham Pavement Test Facility**. International Conference on Accelerated Pavement testing Reno, Nevada, 1999.

COLPO, G. B. **Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas: Ensaios Laboratoriais e Instrumentação *in situ***. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CONCEPPA/ANTT. **Instrumentação *in situ* de um Segmento da BR-116 – Estudo Comparativo do Efeito Laboratório – Campo da Fadiga**. Laboratório de Pavimentação, LAPAV. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

COSTA, D. B. **Análise da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas a Parir dos Critérios de Mohr Coulomb**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

_____. **DNER – ME 24/1994**. Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER – PRO 273/1996**. Determinação de Deflexões Utilizando Deflectômetro de Impacto Tipo "Falling Weight Deflectometer(FWD)". Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 005/2003 - TER: **Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 006/2003 - PRO: **Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT IPR – 720/2006: **Manual da Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT – ME 135/2010**. Pavimentação asfáltica – Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT – ME 183/2018**. Pavimentação asfáltica – Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT – ME 184/2018**. Pavimentação asfáltica – Ensaio Uniaxial de Carga Repetida para Determinação da Resistência à Deformação Permanente. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT – ME 416/2019**. Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo Dinâmico. Rio de Janeiro, 2019.

DNIT/UFSC. **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.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-24**: Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue. Brussels, 2004.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2016.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Heavy Vehicle Simulator Gains Additional Testing Capability. **Engineer Research and Development Center Website, 2017**. Disponível em: <<https://www.erd.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2001792970/>>. Acesso em: 26 de maio de 2020.

HORAK, E.; KLEYN, E. G.; JOSEPH. DU PLESSIS ETTIENNE, M. DE VILLIERS, ALAN J. THOMSON. **The impact and management of the heavy vehicle simulator (HVS) fleet in South Africa**. 7^o International Conference on Asphalt Pavement, South Africa, 1999.

JOHNSON, A.; CLYNE, T. R.; WOREL, B. J. **MnROAD Phase II Construction Report**. Minnesota Department of Transportation, 2009.

KHCS Encapsulated Strain Gages. **Move Into the Future with Reliable Measurements, KYOWA, 2017**. Disponível em: <https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/khcs/index.html>. Acesso em: 13 de junho de 2020.

Laboratory Wheel Tracking Devices. **Pavement Interactive, 2018**. Disponível em: <<https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/laboratory-wheel-tracking-devices/>>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

LOULIZI, A. AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S.; FREEMAN, T. E. Data Collection and Management of the Instrumented Smart Road Flexible Pavement Sections. **Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board**, nº. 1769, p. 142-151, 2001.

MACHADO, D. M. C. **Avaliação de Normas de Identificação de Defeitos para Fins de Gerência de Pavimentos Flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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.

MOCELIN, D. M. **Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Através do Modelo de Dano Contínuo Viscoelástico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, L.A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H. DO; KIM Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da Mecânica do Dano Contínuo na Caracterização de Misturas Asfálticas Brasileiras**. 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**.

Dissertation (Doctor of Philosophy). Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2015.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SANCHEZ, A. S. V.; CANCIAN, V. A. **Características do Whitetopping e seu Emprego nas Rodovias Brasileiras: Um estudo de Revisão.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Paranaense, Toledo, 2012.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Aplicadas em Campo por Meio da Teoria Viscoelástico de Dano Contínuo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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, J. E. G. **Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – Medina, Avaliação da Duplicação da AL-145.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.

TAYEBALI A.A., DEACON J.A., COPLANZ J.S., HARVEY J.T., Monismith C.L., **Fatigue response of asphalt aggregate mixtures.** Strategic Highway Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1994.

TIMM, D. H.; PRIEST, A. L; MCEWEN, T. V. **Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track.** National Center for Asphalt Technology, NCAT, Auburn University, NCAT Report 04-01, 2004.

TONIAL, I. A.; MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S. **Alteração da Vida de Fadiga de Pavimentos Asfálticos Devido ao Envelhecimento.** Reunião Anual de Pavimentação, nº 33, Florianópolis, ABPV, p. 175-190, 2001.

WÖHLER, A. **Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl.** Deutschland, 1870.

YODER, E. J. & WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 1975.

ZEIADA, W. A. **Endurance Limit for HMA Based on Healing Phenomenon Using Viscoelastic Continuum Damage Analysis.** Dissertation (Doctor of Philosophy). Arizona State University, 2012.

ANEXOS

Código do programa em linguagem *python script* desenvolvido para a análise dos dados desta pesquisa

```
import csv
```

```
import os
```

```
import configparser
```

```
import ntpath
```

```
def tonum(string):
```

```
    str = string.replace(',','.')

```

```
    try:
```

```
        return int(str)

```

```
    except ValueError:
```

```
        return float(str)

```

```
def writeHeader(config,writer):
```

```
    headers = config['config']['headers'].split(';')

```

```
    minheaders = config['config']['min'].split(';')

```

```
    maxheaders = config['config']['max'].split(';')

```

```
    difheaders = config['config']['dif'].split(';')

```

```
    resultrow = []

```

```
    for header in headers:
```

```
        if header in maxheaders:
```

```
            resultrow.append('MAX '+header)

```

```
        if header in minheaders:
```

```
            resultrow.append('MIN '+header)

```

```
        if header in difheaders:
```

```
            resultrow.append('DIF '+header)

```

```
        if header not in maxheaders and header not in minheaders and header not
in difheaders:
```

```

        resultrow.append(header)

writer.writerow(resultrow)

def writeLine(config,writer,dic):
    headers = config['config']['headers'].split(';')
    minheaders = config['config']['min'].split(';')
    maxheaders = config['config']['max'].split(';')
    difheaders = config['config']['dif'].split(';')
    resultrow = []
    for header in headers:
        if header in maxheaders:
            resultrow.append(str(max(dic[header])).replace('.',','))
        if header in minheaders:
            resultrow.append(str(min(dic[header])).replace('.',','))
        if header in difheaders:
            resultrow.append(str(round(abs(max(dic[header])-
min(dic[header])),4)).replace('.',','))
        if header not in maxheaders and header not in minheaders and header not
in difheaders:
            resultrow.append(dic[header][len(dic[header])-1])

writer.writerow(resultrow)

config = configparser.ConfigParser()
config.sections()
config.read('config.ini',encoding='utf-8-sig')
input = config['config']['input']
output = config['config']['output']

```

```

if os.path.exists(output):
    os.remove(output)

files = []
for r, d, f in os.walk(input):
    for file in f:
        if '.csv' in file and not ntpath.basename(output) in file:
            files.append(os.path.join(r, file))

with open(output, 'w', newline="", encoding='utf-8-sig') as outputfile:
    writer = csv.writer(outputfile, delimiter=';', quotechar='|',
quoting=csv.QUOTE_MINIMAL, dialect='excel')
    writeHeader(config, writer)
    for f in files:
        with open(f, newline="", encoding='utf-8-sig') as csvfile:
            reader = csv.DictReader(csvfile, delimiter=';',
quotechar='|', dialect='excel')

            dic = {}
            for field in reader.fieldnames:
                dic[field] = []

            for row in reader:
                for field in reader.fieldnames:
                    dic[field].append(tonum(row[field]))
            writeLine(config, writer, dic)

```