

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

**COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS: ENSAIOS LABORATORIAIS E
INSTRUMENTAÇÃO *IN SITU***

Gracieli Bordin Colpo

Porto Alegre
2019

GRACIELI BORDIN COLPO

**COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS: ENSAIOS LABORATORIAIS E
INSTRUMENTAÇÃO *IN SITU***

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do
título de Doutora em Engenharia.

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Colpo, Gracieli Bordin

Comportamento à fadiga de misturas asfálticas:
ensaios laboratoriais e instrumentação in situ /
Gracieli Bordin Colpo. -- 2019.

263 f.

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Coorientador: Lélío Antonio Teixeira Brito.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Instrumentação. 2. Fadiga. 3. Dano. 4. SVECD. I.
Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. II. Brito,
Lélío Antonio Teixeira, coorient. III. Título.

GRACIELI BORDIN COLPO

**COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURA ASFÁLTICA:
ENSAIOS LABORATORIAIS E INSTRUMENTAÇÃO *IN SITU***

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:
Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito
para obtenção do título de Doutora em Engenharia.

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2019

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
Orientador

Prof. Lélío Antonio Teixeira Brito
PhD. pela University of Nottingham
Coorientador

Prof^ª. Angela Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Laura Maria Goretti da Motta (UFRJ)
DSc. pela COPPE/UFRJ

Prof. John Kennedy Guedes Rodrigues (UFCG)
Dr. pela Universidade de São Paulo (USP/São Carlos)

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, meus pais, Sérgio e Margarete, minha irmã Angélica, por todo amor, apoio, carinho, confiança e pela base sólida da nossa família, meu porto seguro. Muito obrigada! Amo vocês!

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Douglas, meu amor, por toda ajuda no desenvolvimento desse trabalho, pelas infinitas horas dedicadas a discutir o S-VECD e por sempre tentar amenizar da melhor forma possível os momentos de angústia. Muito obrigada por todo amor e dedicação! Te amo!

Agradeço ao Prof. Jorge Augusto P. Ceratti, meu orientador, pela oportunidade, ensinamentos e confiança ao longo desses anos de trabalho.

Ao meu coorientador e amigo Lélío Brito por todos os anos de amizade, pelo incentivo a buscar novas oportunidades, por sempre estar presente, ajudando nas escolhas e caminhos a seguir.

À Marlova Johnston pela amizade, os conselhos e bons momentos de descontração.

À Família Lapav, muito obrigada pelo auxílio na realização dos ensaios, pela amizade e por todos os anos de convivência. Um agradecimento especial ao Dionisio Doering e a Ana Hilgert pela ajuda nas etapas da instrumentação e coleta de dados, e a Débora Cardoso pelo auxílio nos ensaios de laboratório.

À toda a equipe da Concepa pelo apoio no desenvolvimento do trabalho em campo e a ANTT pelo incentivo ao desenvolvimento de pesquisas através dos projetos de RDT.

À Greca Asfaltos e a Pedreira Eldorado do Sul pelo fornecimento dos materiais necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao PPGCI e a CAPES pelo apoio e incentivo a pesquisa.

À *North Carolina State University*, especialmente ao Prof. Richard Kim, por ceder as licenças dos programas utilizados nesta pesquisa.

A Prof.^a Laura Motta, ao Prof. Kennedy e ao Prof. Washington Núñez pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pela colaboração neste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram de alguma forma com este trabalho ao longo desses anos de desenvolvimento. Obrigada!

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.

Leonardo da Vinci

RESUMO

COLPO, G.B. **Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação *in situ***. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos mecanístico-empíricos surgiram como evolução dos métodos empíricos, e consideram, além de questões empíricas, ensaios de caracterização mecânica dos materiais, como módulo dinâmico, determinação do comportamento à fadiga e à deformação permanente. O trincamento por fadiga, principal mecanismo de degradação de pavimentos asfálticos, é considerado nas análises por meio de modelos obtidos com dados de ensaios de laboratório, em função do nível de tensão/deformação impostos ao material, e relacionados com o comportamento de campo empregando fatores laboratório-campo ou funções de transferência. As tensões e deformações desenvolvidas ao longo da estrutura do pavimento são analisadas em simulações computacionais, utilizando teorias de sistemas com múltiplas camadas e considerando as características de comportamento de cada material que compõe a estrutura. Outra maneira de obter as tensões e deformações desenvolvidas na estrutura é por instrumentação *in situ*, com sensores de pressão e deformação que realizam a leitura dos esforços nos pavimentos em serviço, sob condições ambientais e de carregamento reais, podendo também ser utilizadas para validação dos modelos computacionais. A degradação dos pavimentos em campo, em relação ao trincamento à fadiga, é geralmente analisada sob a ótica da percentagem de área trincada desenvolvida na superfície. No momento que o revestimento atinge um certo nível de área trincada superficial, é considerado como o fim da sua vida útil, devendo então ser restaurado ou reforçado. Esta pesquisa visa contribuir em termos de análise da evolução do dano na estrutura de pavimentos asfálticos, considerando a fadiga. Para isto, um trecho do pavimento da rodovia BR-116/RS, localizado entre as cidades de Guaíba e Porto Alegre, foi instrumentado para o monitoramento dos esforços na parte inferior do revestimento asfáltico. Também foram realizados ensaios de fadiga em laboratório, com diferentes configurações, e simulações, utilizando o programa FlexPAVE™, para prever o comportamento à fadiga da mistura asfáltica empregada no trecho, composta por agregado granítico e ligante asfáltico modificado por polímero (AMP 60/85), produzida sob diferentes condições, totalizando a avaliação de cinco diferentes métodos de produção. Por meio do desenvolvimento deste trabalho foi possível coletar uma gama de dados de deformação e pressão vertical que contribuem nas análises mecanística-empíricas do pavimento, bem como no entendimento da resposta estrutural do pavimento sob ação das cargas rodantes. E em conjunto com os resultados dos ensaios para avaliar o comportamento mecânico das misturas e das simulações realizadas, foi possível avaliar a condição de evolução do dano quanto à fadiga na estrutura do pavimento do trecho estudado. Os diferentes ensaios em laboratório para análise do comportamento à fadiga podem gerar resultados variáveis, portanto, ensaios que envolvam teorias mais avançadas, como o *ViscoElastic Continuum Damage* (VECD), devem ser utilizados. Em relação aos métodos de produção das misturas asfálticas, percebe-se que podem afetar o comportamento do material devido às diferentes condições de envelhecimento e às pequenas diferenças nas proporções dos materiais, sendo recomendado a utilização de amostras extraídas de campo, sempre que possível, para previsão e gerenciamento de manutenções na estrutura de pavimentos existentes.

Palavras-chave: instrumentação *in situ*; fadiga; dano; desempenho; VECD.

ABSTRACT

COLPO, G.B. **Asphalt mixtures fatigue behavior: laboratory tests and in situ instrumentation**. 2019. Thesis (Doctor Degree in Civil Engineering) – Civil Engineering Post-Graduation Program, Federal University of Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brazil.

The mechanistic-empirical pavement design methods emerged to overcome the issues associated with the purely empirical methods, and consider, besides empirical assumptions, material's mechanical characteristics, such as dynamic modulus, and resistance to fatigue and rutting. Fatigue cracking, considered the dominant distress in most of the flexible pavements, is analyzed by models generated in laboratory tests, where the material's response is a function of the imposed stress/strain, and then related to field behavior by applying a so-called shift-factor or transfer function. The stresses and strains developed in the structure are usually determined by computational analysis, using multilayer systems theory and considering elastic properties of the materials. Another way to get the stresses and strains developed in the structure, for pavements already built, is by means of *in situ* instrumentation, with pressure cells and strain gages, that can take the measurements under real traffic and climate conditions, which can also be used to validate the computational methods. To analyze the fatigue damage in field, usually the percentage of superficial cracking is accounted. When the pavement reaches the superficial cracked area threshold, determined for that structure, it is considered to be the end of its service life, and then it should be reinforced or restored. The present research aims to contribute in terms of fatigue damage analysis in pavement's asphalt layers. For that, a pavement section in the highway BR-116/RS, between the cities of Guaíba and Porto Alegre, was instrumented for stress/strain monitoring on the bottom of the asphalt layer. Moreover, fatigue laboratory tests with different configurations and simulations, using the software FlexPAVE™, were performed to evaluate the behavior of the asphalt mixture used on the surface course, which is composed by granite aggregates and polymer-modified asphalt binder (AMP 60/85), and was tested with five different production methods. The diversity of strain/stress data collected in this research contribute for the mechanistic-empirical analysis of the structure, as well as for the understanding of the pavement response under real moving loads. Coupled with the laboratory tests results and the simulations, it was possible to evaluate the fatigue damage evolution for the instrumented segment. The different laboratory tests performed can generate controversial results, therefore, tests that involve more advanced and comprehensive theories, such as the Viscoelastic Continuum Damage (VECD), should be used. Regarding the asphalt mixture production methods, it can affect the material behavior due the different aging conditions and the small differences in material's proportions, being recommended the use of field cores, whenever possible, for prediction and management of maintenance actions in existing structures.

Key-words: *in situ* instrumentation; fatigue; damage; performance; VECD.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	27
1.2	OBJETIVO GERAL.....	28
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	SOLICITAÇÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	31
2.2	FADIGA – EVOLUÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM PAVIMENTOS	35
2.3	ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	42
2.3.1	Ensaio de tração indireta por compressão diametral	43
2.3.2	Ensaio de flexão em viga quatro pontos.....	45
2.3.3	Ensaio de tração direta.....	46
2.4	CRITÉRIOS DE RUPTURA EM ENSAIOS DE FADIGA	48
2.5	MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM RELAÇÃO À FADIGA.....	55
2.6	MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO E USINA	75
2.7	INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO PARA AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS DO PAVIMENTO.....	76
3	INSTRUMENTAÇÃO DE TRECHO DA RODOVIA BR-116.....	85
3.1	PLANEJAMENTO DAS ETAPAS DE CAMPO.....	85
3.2	APRESENTAÇÃO DO TRECHO MONITORADO.....	86
3.3	SELEÇÃO DOS SENSORES INSTALADOS NA PISTA	88
3.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO	92
3.5	INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO	97
3.5.1	Adequações do trecho selecionado.....	98
3.5.2	Instrumentação do revestimento asfáltico do trecho estudado	100
3.6	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO	105
3.7	MONITORAMENTO DE VEÍCULOS EM CAMPO	116
4	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DO PAVIMENTO DA BR-116.....	125
4.1	PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EM CAMPO.....	125

4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO	129
5	AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO	135
5.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO	135
5.2	MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDAS.....	136
5.3	EXECUÇÃO DE ACOSTAMENTO PARA EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS	140
5.4	PROCEDIMENTOS USADOS NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO	143
5.4.1	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	143
5.4.2	Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.....	145
5.4.3	Ensaio de módulo dinâmico	146
5.4.4	Ensaio de fadiga à tração indireta por compressão diametral	148
5.4.5	Ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos	150
5.4.6	Ensaio de fadiga a tração direta.....	152
5.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO.....	154
5.5.1	Resistência à tração por compressão diametral	154
5.5.2	Módulo de resiliência por compressão diametral	156
5.5.3	Módulo dinâmico.....	158
5.5.4	Ensaio de fadiga à tração indireta por compressão diametral	163
5.5.5	Fadiga à flexão em quatro pontos.....	168
5.5.6	Fadiga a tração direta.....	173
6	SIMULAÇÃO DO DANO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DO TRECHO DA BR-116 USANDO O FLEXPAVE™	190
7	CONCLUSÕES.....	212
7.1	INSTRUMENTAÇÃO DO TRECHO DA BR-116/RS.....	212
7.2	DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À FADIGA.....	214
7.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	216
	REFERÊNCIAS	218
	APÊNDICE A	234
	APÊNDICE B.....	237
	APÊNDICE C	240
	APÊNDICE D	243

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Deformações no pavimento pela passagem de uma carga em movimento (PERRET, 2003; OTTO, 2009).	32
Figura 2 – Deformações na base do revestimento no sentido longitudinal (a) e transversal (b) (PERRET, 2003).	32
Figura 3 – Deformações medidas na parte inferior do revestimento (GONÇALVES, 2002)..	33
Figura 4 – Sinais de deformação coletados usando simulador (a) e tráfego variável nas pistas da NCAT (b) (TIMM, 2016).	34
Figura 5 – Estágios do fenômeno de fadiga (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008).	36
Figura 6 – Defasagem entre tensão (σ) e deformação (ϵ) no carregamento (MELLO, 2008)..	40
Figura 7 – Evolução típica de SR durante ensaios de fadiga sob deformação controlada (Adaptado de MATEOS <i>et. al.</i> , 2017).	41
Figura 8 – Diferentes configurações de ensaios de fadiga (ZEIADA, 2012).	43
Figura 9 – Configuração (a) e distribuição de tensões (b) no ensaio de fadiga a tração indireta por compressão diametral (BRITO, 2006).	44
Figura 10 – Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em vigas quatro pontos (MELO, 2014).	46
Figura 11 – Configuração do ensaio de tração direta: (a) amostras de 100 mm x 130 mm e (b) amostras de 38 mm x 110 mm.	47
Figura 12 – Queda do ângulo de fase durante o ensaio de fadiga por tração direta (a) (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2014) e verificação da localização da macrotrinca (b).	48
Figura 13 – Evolução da taxa de variação da energia dissipada (CARPENTER <i>et al.</i> , 2003)	50
Figura 14 – Resultados de G^R versus N_f para diferentes modos de carregamento e temperaturas (SABOURI e KIM, 2014).	53
Figura 15 – Envoltória de ruptura considerando diferentes modos de carregamento e temperaturas (a); ruptura de amostras ao encontrarem a envoltória de ruptura (b) (adaptado de WANG e KIM, 2017).	54
Figura 16 – Exemplo de curvas características de dano (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2014).	63
Figura 17 – Detalhes da instrumentação utilizada no projeto do NCAT (TIMM <i>et al.</i> , 2004).	79
Figura 18 – Sistemas de instrumentação do projeto de pesquisa Leopoldo (LEANDRI <i>et al.</i> , 2013).	80

Figura 19 – Pista instrumentada, com a distribuição e posicionamento dos sensores utilizados (GONÇALVES, 2002).....	81
Figura 20 – Vista superior do posicionamento dos sensores (a) e posição dos sensores nas camadas - seção longitudinal (b) (BASTOS, 2016).	84
Figura 21 – Fluxograma das etapas de campo desta pesquisa.....	85
Figura 22 – Localização do trecho selecionado.....	86
Figura 23 – Estrutura do pavimento asfáltico da BR-116/RS no km 298+560 – Sentido Guaíba-Porto Alegre (adaptado de SPECHT, 2012).	87
Figura 24 – Sensores de deformação do tipo KM-120-120-H2-11-W1M.	89
Figura 25 – Extensômetros instalados no topo da camada de base: conjunto de extensômetros em forma de roseta (a) e conjunto com um extensômetro no sentido longitudinal e outro no sentido transversal (b).	90
Figura 26 – Célula de pressão total modelo 3500 (adaptado de Geokon, 2013).....	91
Figura 27 – Sensor de temperatura LM35.	92
Figura 28 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados proposto.....	94
Figura 29 – Placa de circuito impresso para o sistema de aquisição de dados (superior) e componentes colados na placa (inferior).	95
Figura 30 – Processo de aquisição dos dados com processamento embarcado – memória de transferência de coleta	96
Figura 31 – Caixa de proteção com o sistema de aquisição de dados instalado.....	97
Figura 32 – Seções instrumentadas do pavimento asfáltico desta pesquisa.	98
Figura 33 – Seção transversal do pavimento asfáltico.	98
Figura 34 – Etapas de adequação do trecho desta pesquisa.	99
Figura 35 - Detalhamento da posição dos conjuntos de <i>strain gages</i> e células de pressão instalados na primeira fase (Julho/2016) desta pesquisa.	100
Figura 36 – Detalhamento da posição dos sensores instalados na segunda fase (Fevereiro/2017) desta pesquisa.	101
Figura 37 – Demarcação dos pontos para instalação dos sensores nesta pesquisa.	102
Figura 38 – Posicionamento dos sensores na parte superior da camada de base nesta pesquisa.	103
Figura 39 – Etapas da execução da camada de revestimento asfáltico desta pesquisa.	104

Figura 40 – Dados da célula de pressão (a) e do conjunto de sensores (b) quando solicitados pela passagem do rolo compactador no sentido do tráfego nesta pesquisa.	105
Figura 41 – Representação da estrutura simulada.	106
Figura 42 – Pulsos de deformação longitudinal (b), deformação transversal (b) e tensão vertical (c) obtidos no AEMC para a estrutura do trecho.	107
Figura 43 – Pulsos de dados coletados em campo com a instrumentação para um ESRD: (a) deformação longitudinal, (b) deformação transversal e (c) pressão vertical.	107
Figura 44 – Pulso de sinais coletados em campo, obtidos em simulações no FlexPAVE™ e valor máximo determinado pelo AEMC para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).	109
Figura 45 – Coleta de dados de temperatura realizada em 08/09/2016 no trecho instrumentado desta pesquisa.	111
Figura 46 – Coleta de dados de temperatura realizada em campo no período de 30/09/2016 a 02/10/2016 e calculados a partir do MERRA.	112
Figura 47 – Dados de temperatura para profundidade de 10 cm calculados a partir do banco de dados climatológico MERRA.	112
Figura 48 – Pulso de sinais obtidos em simulações no FlexPAVE™ considerando uma velocidade de 80 km/h para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).	114
Figura 49 – Pulso de sinais obtidos em simulações no FlexPAVE™ considerando a temperatura de 26,5°C para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).	115
Figura 50 – Acompanhamento em campo da coleta de dados das células de pressão para veículos específicos.	116
Figura 51 – Acompanhamento em campo da coleta de dados dos sensores de deformação para veículos específicos.	117
Figura 52 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação longitudinal.	118
Figura 53 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação transversal.	119
Figura 54 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação a 45°.	119
Figura 55 – Pulso de sinais coletados em campo para pressão vertical.	120
Figura 56 – Distribuição das deformações longitudinais (a) e deformações transversais (b) para uma série de 3000 eventos.	120
Figura 57 – Distribuição das pressões verticais para uma série de 3000 eventos.	121
Figura 58 – Sinais lidos pelo sistema, incluindo a segunda célula de pressão nesta pesquisa.	122

Figura 59 – Sinal alinhado no tempo, com o uso da medida de velocidade estimada pela leitura da segunda célula de pressão nesta pesquisa.	122
Figura 60 – Laço de histerese obtido com os dados coletados em campo.	123
Figura 61 – Treliça de alumínio utilizada na medição dos afundamentos nas trilhas de roda.	125
Figura 62 – Pendulo Britânico utilizado para determinar a resistência à derrapagem.	127
Figura 63 – Ensaio de macha de areia.	128
Figura 64 – Levantamento de campo com a viga Benkelman.	129
Figura 65 – Fator de ajuste da deflexão em função da temperatura na superfície e espessura do revestimento asfáltico (adaptado de AASHTO, 1993).	129
Figura 66 – Afundamento de trilha de roda interno (TRI) e externo (TRE) coletados na primeira (a) e segunda (b) fase de construção.	130
Figura 67 – Resultados de pêndulo britânico no trecho.	131
Figura 68 – Resultados de mancha de areia no trecho.	132
Figura 69 – Evolução das deflexões médias para os segmentos em estudo.	133
Figura 70 – Bacias deflectométricas do segmento da segunda fase.	134
Figura 71 – Fluxograma das etapas de laboratório.	136
Figura 72 – Percentagem do teor de ligante obtido para as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.	139
Figura 73 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas.	140
Figura 74 – Etapa de construção do acostamento.	141
Figura 75 – Extração de placas do acostamento.	142
Figura 76 – Extração de corpos de prova cilíndricos do acostamento.	143
Figura 77 – Forma de carregamento e plano de ruptura gerados durante o ensaio de resistência à tração (BRITO, 2006).	144
Figura 78 – Prensa usada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	144
Figura 79 – Equipamento usado no ensaio de módulo de resiliência.	146
Figura 80 – Exemplos de laços de histerese dos ciclos 153, 253, 553 e 653.	149
Figura 81 – Equipamento para ensaio de flexão em quatro pontos.	150

Figura 82 – Critério de ruptura adotado para o ensaio de flexão em quatro pontos (adaptado de AASHTO T-321, 2017).	151
Figura 83 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas estudadas.	155
Figura 84 – Módulo de resiliência por compressão diametral das misturas asfálticas estudadas.	157
Figura 85 – Relação MR/RT das misturas asfálticas estudadas.	157
Figura 86 – Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala semi-log.	159
Figura 87 – Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log.	160
Figura 88 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas estudadas.	160
Figura 89 – Curvas log (aT) para as misturas estudadas (20°C temperatura de referência).	161
Figura 90 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio por compressão diametral considerando a tensão de tração.	164
Figura 91 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio de compressão diametral considerando a deformação específica inicial.	165
Figura 92 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio de compressão diametral considerando a energia dissipada inicial.	165
Figura 93 – Evolução da energia dissipada ao longo do ensaio de compressão diametral, para a percentagem de 30% de resistência à tração por compressão diametral.	166
Figura 94 – Vida de fadiga calculada para a estrutura analisada usando os modelos gerados no ensaio de compressão diametral.	167
Figura 95 – Curvas de fadiga obtidas para os ensaios de flexão em quatro pontos em função da deformação de tração.	169
Figura 96 – Vida de fadiga calculada para a estrutura analisada usando os modelos gerados no ensaio de flexão em quatro pontos.	170
Figura 97 – Curvas de fadiga obtidas para os ensaios de flexão em quatro pontos em função da energia dissipada inicial.	171
Figura 98 – Evolução da energia dissipada ao longo do ensaio de flexão em quatro pontos, para o nível de deformação de 500µε.	172
Figura 99 – Rigidez inicial na flexão das misturas para temperatura de 20°C.	172
Figura 100 – Curvas de fadiga das misturas estudadas determinadas com os dados experimentais obtidos no ensaio FTD (20°C).	175

Figura 101 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura projetada na temperatura de 20°C.	176
Figura 102 – Curvas características de dano de todas as misturas estudadas para a temperatura de 20°C.	177
Figura 103 – Envoltórias de ruptura baseadas no G^R para as misturas estudadas.....	178
Figura 104 – Envoltórias de ruptura baseadas no D^R para as misturas estudadas.....	179
Figura 105 – Comparação dos dados experimentais com os dados simulados utilizando o critério de ruptura do G^R	181
Figura 106 – Comparação dos dados experimentais com os dados simulados utilizando o critério de ruptura do D^R	181
Figura 107 – Relação entre o N_f experimental e o N_f previsto usando o critério de ruptura do G^R (a) e do D^R (b).	182
Figura 108 – Curvas de fadiga para temperatura de 7°C considerando o critério de ruptura do G^R	183
Figura 109 – Curvas de fadiga para temperatura de 10°C considerando o critério de ruptura do G^R	183
Figura 110 – Curvas de fadiga para temperatura de 15°C considerando o critério de ruptura do G^R	184
Figura 111 – Curvas de fadiga para temperatura de 20°C considerando o critério de ruptura do G^R	184
Figura 112 – Curvas de fadiga para temperatura de 25°C considerando o critério de ruptura do G^R	185
Figura 113 – Curvas de fadiga para temperatura de 30°C considerando o critério de ruptura do G^R	185
Figura 114 – Curvas de fadiga para temperatura de 7°C considerando o critério de ruptura do D^R	186
Figura 115 – Curvas de fadiga para temperatura de 10°C considerando o critério de ruptura do D^R	186
Figura 116 – Curvas de fadiga para temperatura de 15°C considerando o critério de ruptura do D^R	187
Figura 117 – Curvas de fadiga para temperatura de 20°C considerando o critério de ruptura do D^R	187
Figura 118 – Curvas de fadiga para temperatura de 25°C considerando o critério de ruptura do D^R	188

Figura 119 – Curvas de fadiga para temperatura de 30°C considerando o critério de ruptura do D^R	188
Figura 120 – Estrutura do pavimento utilizada no FlexPAVE TM na presente pesquisa.	191
Figura 121 – Tela do FlexPAVE TM com dados da estrutura do pavimento e características da mistura asfáltica.	192
Figura 122 – Tela do FlexPAVE TM com os dados de tráfego.	193
Figura 123 – Tela do FlexPAVE TM com as configurações do eixo-padrão	194
Figura 124 – Tela do FlexPAVE TM com os dados climáticos.	194
Figura 125 – Representação da malha de pontos utilizada para determinação do dano médio acumulado na camada do revestimento (MOCELIN, 2018).	195
Figura 126 – Dano médio acumulado ao longo do tempo considerando CML+0%, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do G^R	196
Figura 127 – Dano médio acumulado ao longo do tempo considerando CML+0%, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do D^R	196
Figura 128 – Dano médio acumulado ao longo do tempo, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do G^R	197
Figura 129 – Dano médio acumulado ao longo do tempo, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do D^R	198
Figura 130 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	199
Figura 131 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	200
Figura 132 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	200
Figura 133 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	201
Figura 134 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	201
Figura 135 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	202

Figura 136 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	202
Figura 137 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	203
Figura 138 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	203
Figura 139 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	204
Figura 140 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	204
Figura 141 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	205
Figura 142 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	205
Figura 143 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	206
Figura 144 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	206
Figura 145 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	207
Figura 146 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	207
Figura 147 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	208
Figura 148 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	208

Figura 149 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.	209
Figura 150 – Comparação visual entre o observado em campo e o simulado pelo FlexPAVE TM	211

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limites recomendados para o parâmetro S_{app} à diferentes níveis de tráfego (adaptado de WANG, 2019).	71
Tabela 2 – Coeficientes de ajustes obtidos por Nascimento (2015).	73
Tabela 3 – Coeficientes de ajustes obtidos por Fritzen (2016).	74
Tabela 4 – Características técnicas dos extensômetros.	89
Tabela 5 – Dados de deformação longitudinal, deformação transversal e pressão vertical máximos obtidos pelos sensores e nas simulações para condições semelhantes.	110
Tabela 6 – Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico (DNIT IPR-720, 2006).	127
Tabela 7 – Classes de macrotextura pelo método da mancha de areia (DNIT IPR-720, 2006).	128
Tabela 8 – Média dos valores de ATR (mm) obtidos ao longo do monitoramento do trecho.	131
Tabela 9 – Propriedades dos agregados.	136
Tabela 10 – Propriedades do ligante asfáltico AMP 60/85.	137
Tabela 11 – Características das misturas estudadas.	138
Tabela 12 – Propriedades da mistura de projeto.	139
Tabela 13 – Quantitativo de amostras ensaiadas em laboratório.	154
Tabela 14 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral.	155
Tabela 15 – Resultados de módulo de resiliência por compressão diametral.	156
Tabela 16 – Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal usado para determinação do módulo dinâmico.	159
Tabela 17 – Coeficientes obtidos do ajuste sigmoidal do módulo de armazenamento.	162
Tabela 18 – Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony.	163
Tabela 19 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para tensão de tração.	164
Tabela 20 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para deformação específica inicial.	164
Tabela 21 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para energia dissipada inicial.	164

Tabela 22 – Valores de tensão, deformação e número de ciclos (N_f) para fadiga calculados.	167
Tabela 23 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio F4P para deformação.	168
Tabela 24 – Valores de deformação e número de ciclos (N_f) para fadiga calculados.	170
Tabela 25 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio F4P considerando a energia dissipada inicial.....	171
Tabela 26 – Resumo dos principais parâmetros avaliados a partir dos dados do ensaio de fadiga por tração direta.	173
Tabela 27 – Parâmetros volumétricos das amostras ensaiadas à fadiga por tração direta.....	174
Tabela 28 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FTD considerando a deformação.	174
Tabela 29 – Classificação das misturas asfálticas pelo FAF.	175
Tabela 30 – Parâmetros de ajuste da função potência para as curvas C vs S , coeficientes de regressão do critério de ruptura G^R e valores de D^R e S_{app}	178
Tabela 31 – Resumo dos principais parâmetros obtidos com o ensaio de fadiga por tração direta.	180
Tabela 32 – Condições de tráfego analisadas nas simulações no FlexPAVE™.	193
Tabela 33 – Ranqueamento quanto ao comportamento à fadiga das misturas asfálticas estudadas.	199

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABPV: Associação Brasileira de Pavimentação
- ADC: *Analog to Digital Converter*
- ALDOT: Alabama Department of Transportation
- AMP: Asfalto Modificado por Polímero
- ANP: Agência Nacional do Petróleo
- ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres
- ASTM: *American Society of Testing and Materials*
- CA: Concreto Asfáltico
- CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBR: *California Bearing Ratio*
- CDAS: Sistema de Controle e Aquisição de Dados
- CENPES: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
- CGS: Compactador Giratório Superpave
- CML: Carga Máxima Legal
- CP: Corpo de prova
- CV: Coeficiente de variação
- DMM: Densidade Máxima Medida
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- EN: *European Standard*
- EUA: Estados Unidos da América
- FAF: Fator de Área de Fadiga
- FEL: *Fatigue Endurance Limit*

FLC: Fator Laboratório-Campo

IMACS: Sistema Integrado de Controle Multi-Eixos

LAPAV: Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MTS: *Material Test Systems*

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*

NCSU: *North Carolina State University*

PBT: Peso Bruto Total

RDT: Recursos de Desenvolvimento Tecnológico

S_{aap} : Indicativo de Capacidade de Dano

SR: Relação de Rigidez

S-VECD: *Simplified Viscoelastic Continuum Damage*

TL: Teor de Ligante

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

USACE: *United States Army Corps of Engineers*

VV: Volume de Vazios

1 INTRODUÇÃO

O método vigente de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil data de 1966, passando por poucas alterações ao longo do tempo, sendo considerado um método empírico onde é dimensionada uma estrutura de pavimento capaz de proteger a camada do subleito e camadas granulares de deformações excessivas. Este método foi desenvolvido pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza baseado no método que utiliza o ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) para dimensionar pavimentos aeroportuários durante a II Guerra Mundial.

Este método de dimensionamento considerando o ensaio CBR apresenta bom funcionamento para o fim ao qual ele se propõe, proteger o subleito. Porém, o cenário do transporte de cargas atual é completamente diferente de quando o método foi estabelecido, e assim, diversos problemas encontrados hoje não são levados em conta neste dimensionamento. A espessura da camada de revestimento asfáltico, camada mais nobre da estrutura, é proposta somente considerando o tráfego previsto para a rodovia, independente das características da mistura asfáltica empregada, sem proteção à sua degradação.

Como evolução aos métodos empíricos, foram desenvolvidos métodos mecanístico-empíricos (ME), que consideram, além de questões empíricas, ensaios fundamentais de caracterização mecânica dos materiais empregados, como módulo de resiliência, determinação do comportamento à fadiga e à deformação permanente. Também são consideradas as tensões e deformações desenvolvidas ao longo da estrutura (HUANG, 2004).

As tensões e deformações desenvolvidas ao longo das camadas da estrutura, devido à solicitação do tráfego, são analisadas por meio de simulações computacionais que consideram as características dos materiais empregados. Os resultados das análises são relacionados com modelos de desempenho determinados por ensaios laboratoriais, e estes modelos devem apresentar uma relação com o comportamento em campo, estabelecido por observações empíricas, usando fatores laboratório-campo (FLC – *shift-factor*) ou funções de transferência. Os modelos de desempenho utilizados como critérios de dimensionamento são relacionados à fadiga, que gera trincamento devido à evolução do dano na camada de revestimento, ou demais

camadas cimentadas, e à deformação permanente de todas as camadas que compõem a estrutura (NCHRP, 2004; ULLIDTZ *et al.*, 2006; MEDINA e MOTTA, 2015).

Outra maneira de obter as tensões e deformações desenvolvidas na estrutura é usando instrumentação *in situ*, onde é possível obter estes parâmetros pela resposta de extensômetros (*strain gages*) e células de pressão às solicitações reais do tráfego atuante (AL-QADI e NASSAR, 2003; LEANDRI *et al.*, 2013). Pode-se, também, implementar o espectro de cargas real do tráfego da rodovia a ser dimensionada, diferentemente da consideração de eixos-padrão, que muitas vezes pode não ser representativo.

A instrumentação de pavimentos foi uma alternativa implantada com sucesso em pistas experimentais como, por exemplo, as construídas e monitoradas pela *AASHO Road Test* em Ottawa, no estado de Illinois (Estados Unidos); o projeto desenvolvido e implantado pelo Departamento de Transportes do Estado de Minnesota (Mn/DOT), denominado *Minnesota Road Research Project* (Mn/Road); a implantação de uma rodovia de testes pelo Departamento de Transportes da Virgínia - *Virginia Smart Road*; o projeto *NCAT Test Track* desenvolvido pelo Centro Nacional para Tecnologia de Asfalto (*National Center for Asphalt Technology* - NCAT) na Universidade de Auburn em Alabama nos Estados Unidos e o projeto “Leopoldo” desenvolvido em Toscana na Itália. Nestes estudos foram obtidos muitos conhecimentos sobre projeto, desempenho e construção de pavimentos (TIMM *et al.*, 2004).

No Brasil, também foram realizados trabalhos utilizando instrumentação de pavimentos, afim de entender melhor o comportamento das camadas quando submetidas ao tráfego, como a pesquisa desenvolvida por Silva e Motta (1999), o trabalho de Gonçalves (2002), o projeto desenvolvido pela Autopista Fernão Dias – Arteris em conjunto com Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (CHAVES *et al.*, 2016), a pesquisa de Bastos (2016), entre outros.

Nos últimos anos vem sendo desenvolvido no Brasil um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, baseado em diversos estudos elaborados por pesquisadores brasileiros (FRANCO, 2007; GUIMARÃES, 2009; NASCIMENTO, 2015; FRITZEN, 2016), tornando possível dimensionar pavimentos considerando uma análise mecanístico-empírica, a qual engloba fenômenos importantes como fadiga e deformação permanente. O método foi implantado em um programa computacional, o MeDiNa (Método de Dimensionamento

Nacional), desenvolvido inicialmente por Franco (2007), passando por alterações nos últimos anos, principalmente no que diz respeito à determinação de funções de transferência.

Tal método considera propriedades fundamentais dos materiais que compõem as camadas dos pavimentos, obtidas por meio de ensaios laboratoriais e dados coletados em campo de trechos experimentais implantados em diversas regiões do País pelo projeto Rede Temática de Asfalto. Este projeto é desenvolvido pela Petrobras em parceria com diversas Universidades, abrangendo assim, uma gama de materiais e estruturas consideradas representativas das rodovias brasileiras.

No trabalho de Fritzen (2016), uma função de transferência foi determinada e calibrada para 45 pistas experimentais monitoradas desde a implantação na Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no “Projeto Fundação” - parceria entre CENPES-Petrobrás e UFRJ, considerando módulo de resiliência (MR) e fadiga por compressão diametral. Já no trabalho de Nascimento (2015), foi calibrado uma função de transferência para 27 pistas experimentais do “Projeto Fundação” utilizando a teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD - *ViscoElastic Continuum Damage*), considerando módulo dinâmico e ensaios de fadiga por tração direta. Ambas as funções foram também validadas para segmentos experimentais da Rede Temática do Asfalto, em diferentes regiões do País.

Estas duas funções de transferência devem ser utilizadas em níveis diferentes no dimensionamento, sendo o nível A uma abordagem considerando o revestimento como material elástico, utilizando os ensaios de MR e fadiga por compressão diametral, enquanto no nível B será considerada uma abordagem viscoelástica, utilizando dados como a velocidade dos veículos, variações climáticas e caracterização viscoelástica, por meio do módulo dinâmico e fadiga por tração direta (FRANCO e MOTTA, 2018).

Os modelos de fadiga inseridos no novo método brasileiro relacionam o dano médio acumulado com o surgimento de trincas superficiais, avaliadas por porcentagem de área trincada. No guia para utilização do MeDiNa (FRANCO e MOTTA, 2018), a porcentagem de área trincada admissível aparece como um ponto em discussão, sendo sugerido inicialmente uma porcentagem de 30% de área trincada admissível em função da categoria da rodovia.

No entanto, o parâmetro de área trincada, utilizada como critério de ruptura nas funções de transferência, muitas vezes não chega a se manifestar em campo devido às intervenções realizadas, especialmente em rodovias concessionadas.

Avaliar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas e estruturas de pavimento com intervenções frequentes se torna um importante parâmetro a ser considerado em um método de dimensionamento racional, devido a manutenções superficiais no pavimento, a exemplo do microrrevestimento asfáltico. Sendo assim, a presente pesquisa visou contribuir em termos da análise mecanística-empírica em relação ao desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos.

Utilizando ensaios laboratoriais e simulações computacionais, procurou-se investigar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas, produzidas em diferentes condições, em relação à evolução do dano na camada de revestimento com o tempo. Com o auxílio da instrumentação do revestimento, buscou-se o melhor entendimento da evolução do dano em situações onde o trincamento à fadiga não é visível na superfície, porém o pavimento já se encontra em processo de deterioração.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A degradação dos pavimentos asfálticos em relação ao trincamento à fadiga que ocorre em campo é geralmente analisada sob a ótica da porcentagem de área trincada desenvolvida na superfície do pavimento. Porém, em rodovias que passam por manutenções frequentes, o pavimento pode não chegar a apresentar área trincada superficialmente. Isto não significa que o revestimento se encontra em perfeitas condições, muitas vezes o pavimento pode estar em processo avançado de degradação sem apresentar defeitos superficiais.

Como exemplo, as rodovias sob regime de concessão, tanto federal quanto estadual, possuem um Programa de Exploração da Rodovia (PER) no qual é caracterizado todos os serviços e obras previstos para realização pela Concessionária que administra a rodovia, ao longo do prazo da concessão, bem como parâmetros de desempenho que devem atender limites especificados. Este tipo de regime tende a aumentar, visto que o governo federal lançou em 2015 uma nova etapa do Programa de Investimentos em Logística (PIL), com o objetivo de concessionar um pacote de rodovias nos próximos anos. Além disso, o governo também busca investir na restauração e manutenção de rodovias estaduais através do Programa CREMA – Contrato de recuperação e manutenção.

Os princípios básicos desses programas consideram a implementação de ações de natureza preventiva, voltadas para a preservação da rodovia e adequações de tráfego, bem como agilidade em ações corretivas, que eventualmente se fizerem necessárias para a reconstituição

da rodovia e das condições de tráfego. Em relação às condições de trincamento do pavimento, consta no PER, por exemplo, que o pavimento não deve apresentar uma percentagem de área trincada com trincas classe 2 (FC-2, trincas interligadas sem erosão) e classe 3 (FC-3, trincas interligadas com erosão nas bordas) superior a 10%, sob pena de multa à Concessionária (SUINF, 2016).

Para manter um nível de serviço adequado, as rodovias precisam passar por intervenções periodicamente, podendo estas apresentar um caráter significativo em termos do desenvolvimento do trincamento, devendo seus efeitos serem melhor investigados.

A coleta de dados de tensões e deformações reais de campo, usando instrumentação *in situ*, pode auxiliar na análise do efeito destas intervenções nas tensões desenvolvidas na estrutura. Também pode auxiliar na representatividade dos ensaios a serem realizados no laboratório para estimativa e previsão de defeitos da estrutura, bem como na inserção do espectro de carga real atuante na rodovia para simulação do comportamento de misturas asfálticas, sob diferentes condições, usina, projeto e campo, em programas mecanístico-empíricos.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar o comportamento à fadiga da estrutura do pavimento de um trecho da BR-116/RS, através da coleta de dados de deformação e pressão vertical por um sistema de instrumentação, em serviço, contribuindo assim, nas análises mecanística-empíricas de avaliação de pavimentos asfálticos. O sistema de instrumentação também buscou validar as análises numéricas realizadas por softwares como FlexPAVETM e AEMC. Adicionalmente, objetivou-se fazer uma avaliação quanto ao comportamento mecânico da mistura asfáltica, aplicada no revestimento do trecho da BR-116/RS, através de diferentes configurações de ensaios de fadiga em laboratório, e para diferentes condições de produção da mistura.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Implantar e validar um sistema de instrumentação e coleta de dados, desenvolvido para esta pesquisa, em uma seção de pavimento asfáltico em campo;
- b) Investigar o efeito da produção (usina e laboratório) de misturas asfálticas no desempenho à fadiga;
- c) Obter parâmetros de degradação do trecho instrumentado em serviço ao longo do período da pesquisa;
- d) Avaliar a relação dos dados experimentais de fadiga de laboratório com aqueles encontrados em campo;
- e) Avaliar a evolução do dano das misturas estudadas, produzida sob diferentes condições, usando os dados do modelo S-VECD no programa FlexPAVE™.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentada a introdução do trabalho, justificava e relevância para o meio técnico e científico, bem como os principais objetivos que se propôs alcançar.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica de temas considerados relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, como as solicitações em pavimentos asfálticos, a evolução da degradação dos pavimentos quanto à fadiga, ensaios laboratoriais utilizados para determinar a fadiga de misturas asfálticas, modelos de previsão de desempenho, comportamento de misturas produzidas em laboratório e usina e considerações sobre pesquisas desenvolvidas utilizando sistemas de instrumentação em pavimentos.

O terceiro capítulo trata sobre a instrumentação realizada em um trecho do pavimento da BR-116/RS, em serviço, executado em 2014. Por se tratar de um pavimento já existente, somente a camada de revestimento asfáltico foi reconstruída para instalação dos sensores. É apresentado o planejamento das etapas realizadas em campo, caracterizando o trecho estudado, bem como o detalhamento dos sensores escolhidos para instalação e o desenvolvimento do sistema de aquisição e tratamento dos dados coletados. Neste capítulo, também, é realizada a apresentação e discussão dos dados coletados, com validação por meio de simulações usando o programa FlexPAVE™ e o AEMC.

O quarto capítulo trata sobre a avaliação da condição funcional e estrutural do pavimento do trecho da BR-116/RS, apresentando a metodologia empregada nos monitoramentos, bem como os resultados dos levantamentos realizados, buscando identificar e monitorar a evolução de possíveis defeitos ao longo do tempo.

O quinto capítulo está dividido em procedimentos empregados e apresentação/análise dos resultados dos ensaios realizados no laboratório. É apresentado o programa experimental das etapas desenvolvidas no laboratório, detalhando as metodologias de ensaios mecânicos realizados para cinco tipos de misturas asfálticas, as quais se diferenciam pelo método de produção. Na sequência, são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais e análises quanto ao desempenho à fadiga, usando o modelo S-VECD e dados da instrumentação de campo.

No sexto capítulo é apresentada a evolução do dano na estrutura do pavimento do trecho estudado da BR-116/RS, obtida por simulações realizadas com o auxílio do programa FlexPAVETM, cedido pelo Professor Richard Kim da *North Carolina State University* (NCSU), considerando diferentes condições de carga e comportamento à fadiga da mistura aplicada no trecho, determinado pelo modelo S-VECD.

No sétimo capítulo, conclusões, são apresentadas as conclusões mais relevantes observadas quanto à instrumentação em campo e à avaliação da evolução do dano na estrutura do pavimento, levando em conta diferentes misturas asfálticas e ensaios de fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata de informações sobre fadiga consideradas relevantes para o embasamento da pesquisa. Na revisão bibliográfica são apresentados aspectos sobre o comportamento à fadiga em misturas asfálticas, ensaios utilizados para caracterização desse fenômeno, modelos de previsão de desempenho em relação a esse defeito e o comportamento de misturas produzidas em laboratório e em usina.

Buscou-se, nesse contexto, realizar um levantamento sobre o histórico e estado da arte da fadiga em materiais asfálticos, procurando entender o comportamento desses materiais perante essa falha, a importância dos ensaios realizados em laboratório e em campo e modelos de previsão de desempenho.

Na elaboração do capítulo também foram abordados assuntos relacionados a análise de pavimentos asfálticos utilizando instrumentação de campo com sensores eletrônicos, apresentando práticas adotadas para aquisição, análise e tratamento de dados, cujo principal objetivo é a melhor compreensão do fenômeno.

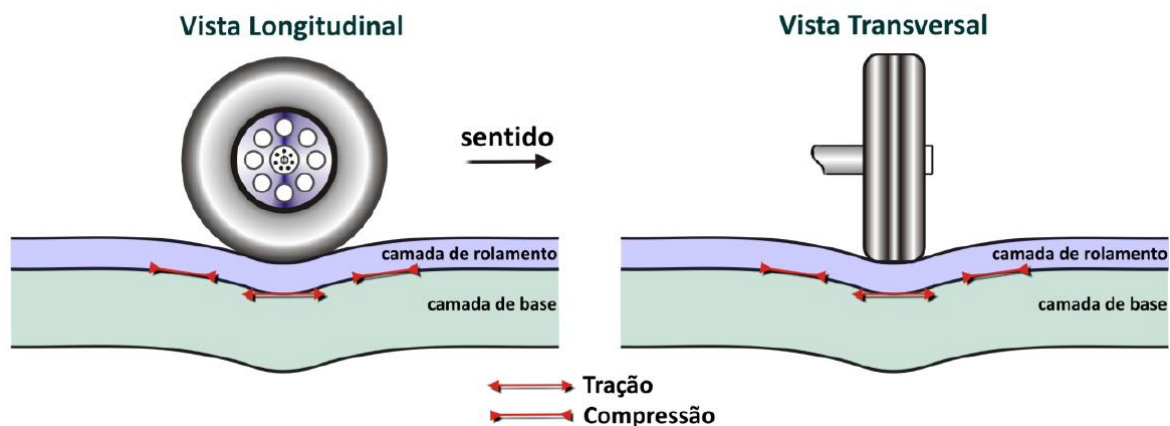
2.1 SOLICITAÇÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Diferentemente de estruturas convencionais de engenharia civil, onde as cargas permanentes correspondem à carga de maior relevância que a estrutura deve resistir, nos pavimentos asfálticos a carga permanente é de menor importância, sendo a estrutura dimensionada para atender, além dos critérios funcionais, as cargas eventuais de cisalhamento, tração e compressão impostas pela passagem dos veículos.

Na estrutura de um pavimento asfáltico, cuja única camada coesiva é o concreto asfáltico, todos os esforços de tração se concentram no revestimento, e no momento da aplicação da carga surge uma linha neutra que separa a parte inferior da camada com esforços de tração e o topo com esforços de compressão, estes esforços são mobilizados de forma a resistir ao deslocamento vertical imposto (BALBO, 2007). Porém, dada a natureza dinâmica destas cargas, um determinado ponto do revestimento, sobre o qual tráfegará um veículo, experimentará todos os tipos possíveis de solicitações, em maior ou menor grau de intensidade, dependendo da posição em que o pneu do veículo se encontra em relação a um determinado ponto.

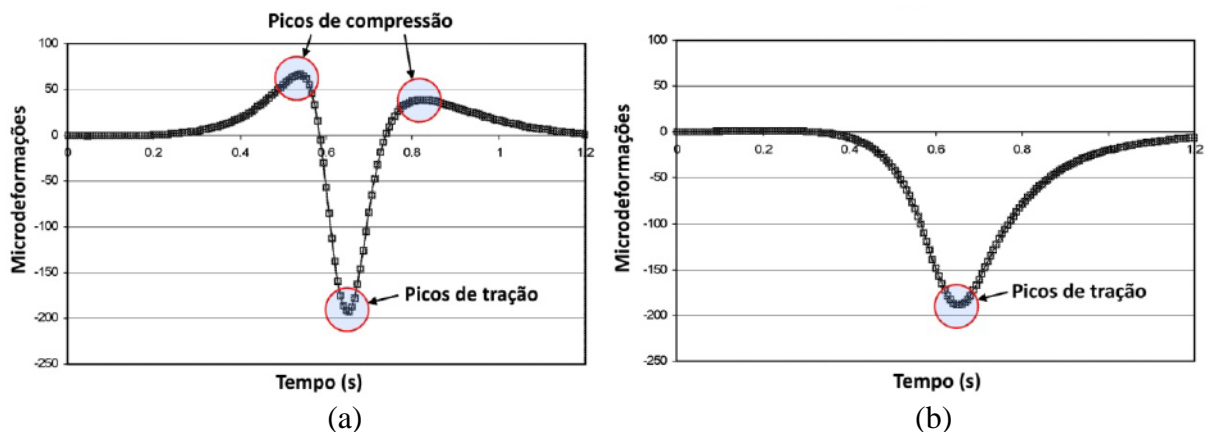
A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do desenvolvimento de esforços na parte inferior das camadas de revestimento de pavimentos flexíveis, com a passagem de um veículo em uma vista longitudinal e transversal. Nesta figura é possível observar que, nos pontos localizados na linha de aplicação da carga rodante, na longitudinal o material irá flexionar alternadamente entre compressão e tração, e na transversal não haverá esta alternância, havendo apenas esforços de tração (LOULIZI *et al.*, 2001; PERRET, 2003; OTTO, 2009).

Figura 1 – Deformações no pavimento pela passagem de uma carga em movimento (PERRET, 2003; OTTO, 2009).



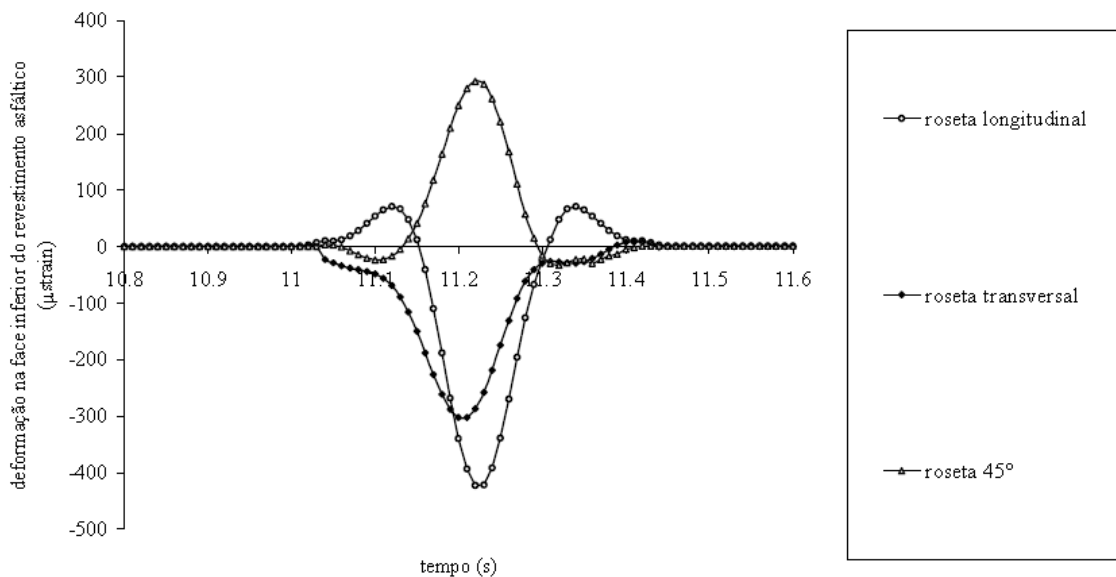
Perret (2003) instrumentou uma seção de pavimento asfáltico na Suíça, com *strain gages* instalados na base da camada de revestimento, obtendo dados onde ficam demonstradas as solicitações longitudinais e transversais comentadas anteriormente, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Deformações na base do revestimento no sentido longitudinal (a) e transversal (b) (PERRET, 2003).



Gonçalves (2002) também utilizou instrumentação em pavimentos asfálticos, solicitados por um eixo padrão em simulador de tráfego, para estudar o seu desempenho. Os sensores de deformação foram instalados no formato de roseta, composto por três *strain gages* nas direções transversal, longitudinal e a 45°C do sentido da passagem do eixo. As leituras de deformações medidas na face inferior da camada de revestimento asfáltico, nas três direções, são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Deformações medidas na parte inferior do revestimento (GONÇALVES, 2002).

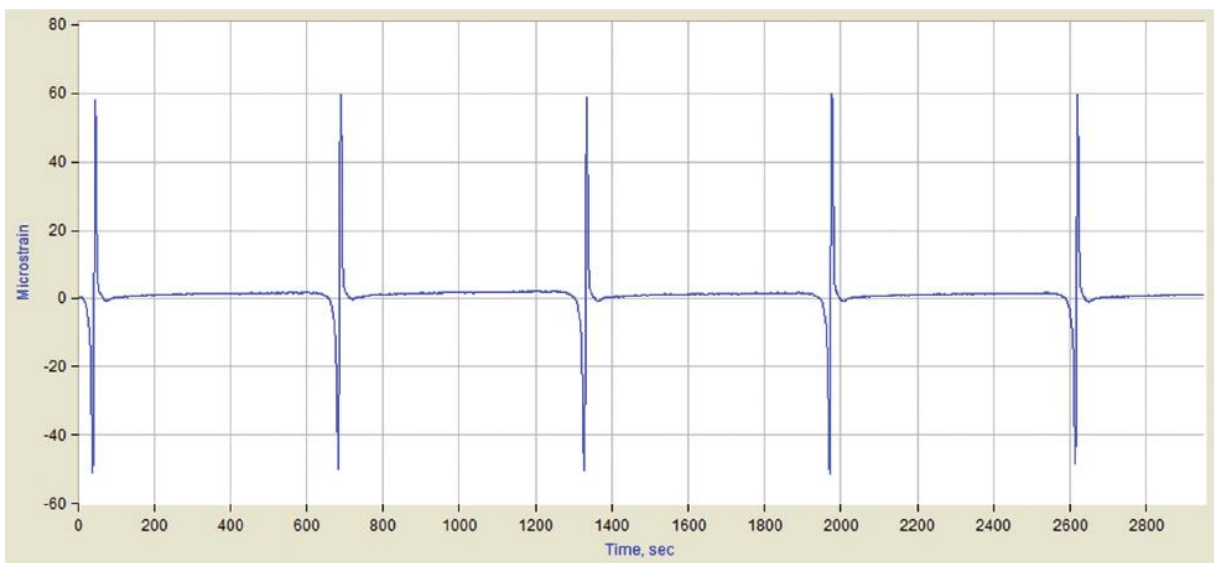


Sabe-se, que as tensões e deformações de tração na flexão são as mais prejudiciais aos concretos asfálticos, e que são estas solicitações que causam o dano por fadiga (PELL *et al.*, 1961; TAYEBALI *et al.*, 1994; HARVEY *et al.*, 1995). A maneira e magnitude com a qual estes esforços irão ocorrer depende de muitos fatores locais, como clima, materiais, técnicas construtivas e políticas de cargas (BALBO, 2007).

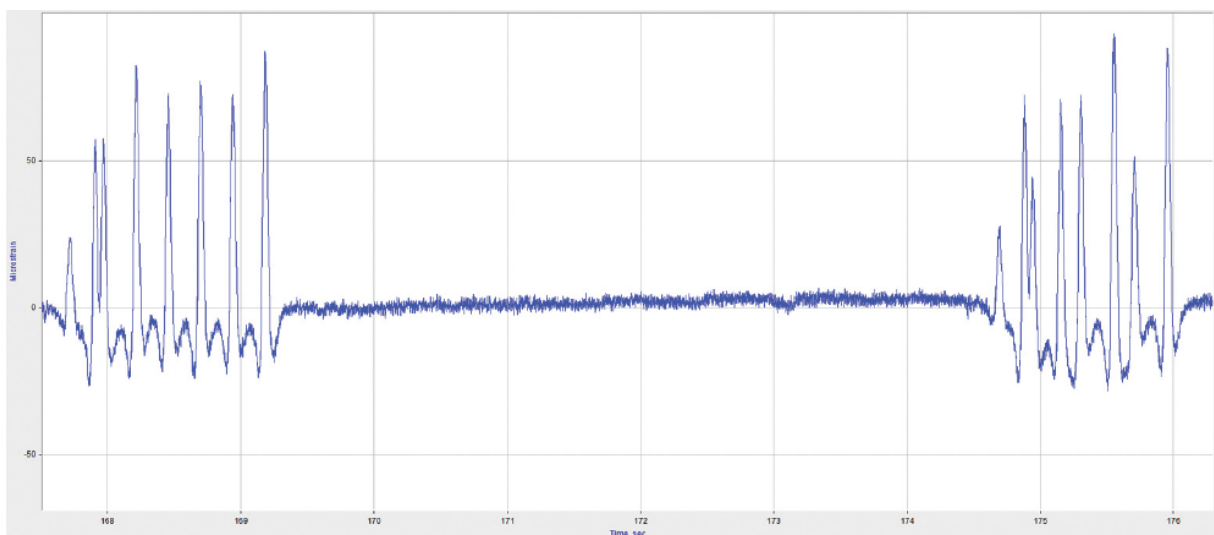
A verificação da magnitude das deformações que ocorrem na estrutura por instrumentação pode ser uma ferramenta importante para determinação da resposta estrutural de um pavimento em serviço, com condições ambientais e de carregamento reais (LEIVA-VILLACORTA e TIMM, 2012). No entanto, Timm (2016) relata as dificuldades existentes com instrumentação, principalmente, em relação a coleta e processamento dos dados, onde são necessários sistemas com alta frequência de aquisição e processamento com tratamento de ruídos, extração e seleção das informações necessárias e armazenamento dos sinais brutos. Ainda neste trabalho, o autor mostra dados coletados em uma pista com uso de simulador de tráfego (Figura 4a), com tipo de

eixo, posição e carga conhecidos, e também em situações onde o tráfego é variável (Figura 4b), com o uso de dois tipos de caminhões, ficando evidente os efeitos do desvio da carga em relação a posição dos sensores. Assim, para situações de tráfego real, onde todas as variáveis de carga são desconhecidas *a priori*, o sistema de aquisição e processamento de dados requer complexidade para garantir confiabilidade nas análises de resposta da estrutura.

Figura 4 – Sinais de deformação coletados usando simulador (a) e tráfego variável nas pistas da NCAT (b) (TIMM, 2016).



(a)



(b)

O conhecimento das tensões e deformações geradas pelo tráfego podem auxiliar na condução dos ensaios de laboratório, submetendo o material a níveis de carregamento mais próximos aos

reais. Uma vez que os modelos de fadiga geralmente são calibrados para condições restritas, é importante que estas condições sejam realistas, e desta forma a instrumentação de pavimentos pode melhorar a capacidade de previsão destes modelos.

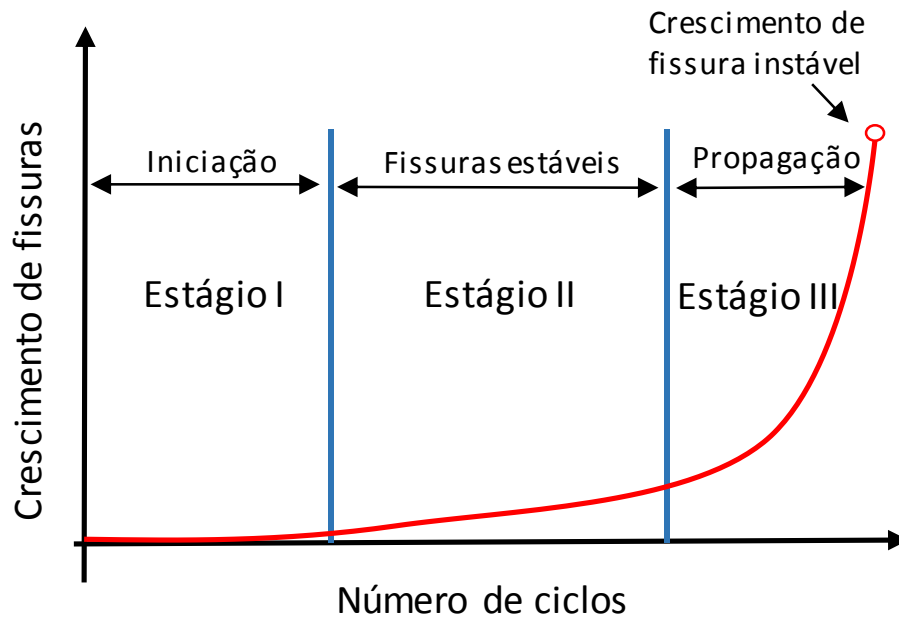
2.2 FADIGA – EVOLUÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM PAVIMENTOS

O fenômeno de fadiga é reconhecido como o principal mecanismo de degradação de pavimentos flexíveis (PELL *et al.*, 1961; PREUSSLER *et al.*, 1981; TANGELLA *et al.*, 1990; MATTHEWS *et al.*, 1993; HARVEY *et al.*, 1995; KIM *et al.*, 1997; DI BENEDETTO *et al.*, 2004; TAPSOBA *et al.*, 2013; MATEOS *et al.*, 2017). Este fenômeno depende de inúmeras características dos materiais, de clima e de tráfego, fazendo com que sua correta interpretação e modelagem seja complexa.

A fadiga ocorre devido às cargas de tráfego, que solicitam a estrutura intermitentemente, desenvolvendo trincas ao longo do tempo. O trincamento inicia em geral na base da camada de revestimento, região onde se desenvolvem deformações de tração, e se propaga até atingir a superfície. O pavimento não apresenta uma ruptura frágil, mas devido à propagação das trincas, o material vai perdendo sua capacidade estrutural, e isto é caracterizado como o final de sua vida útil, tipicamente representado pela coalescência de microtrincas que culminam na perda de rigidez e competência do material.

A ruptura por fadiga nos revestimentos asfálticos é entendida como um processo que ocorre em três estágios (Figura 5), sendo o primeiro considerado o início do fissuramento, onde as fissuras têm tamanho microscópico. Esta etapa consome apenas uma pequena parcela do total da vida de fadiga. O segundo ocorre com o crescimento das microfissuras até um comprimento crítico de cerca de 7,5 mm (LYTTON *et al.*, 1993), onde se forma uma trinca estável, consumindo a maior parte da vida de fadiga do material. O terceiro corresponde à propagação instável de uma ou mais trincas, até atingir a superfície do pavimento, culminando na ruptura (BERNUCCI *et al.*, 2008; MAJIDZADEH e RAMSAMOOJ, 1973 *apud* BASTOS, 2010).

Figura 5 – Estágios do fenômeno de fadiga (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2008).



O comportamento à fadiga dos concretos asfálticos é altamente dependente do contexto da estrutura em que estão inseridos. A maior parte dos pavimentos brasileiros são compostos por uma estrutura flexível, onde a única camada coesiva, que apresenta resistência à tração, é o revestimento asfáltico. Assim, todas as tensões de tração são absorvidas por esta camada.

Os primeiros ensaios documentados de fadiga foram realizados em 1837, quando Wilhelm Albert propôs uma correlação entre cargas aplicadas e durabilidade no contexto de correntes transportadoras utilizadas em minas (SCHUTZ, 1996). O conceito de vida de fadiga finita para materiais foi sugerido nos trabalhos de Wöhler, que remetem a 1860. Wöhler desenvolveu um mecanismo para medir as deformações de eixos de trens durante viagens, e submeteu os eixos a carregamentos estáticos em laboratório para simular as mesmas deformações obtidas em campo. Também estimou a carga máxima que uma composição de trem poderia ter para que os eixos tivessem uma durabilidade de 200000 ciclos (SCHUTZ, 1996). Este conceito é semelhante ao que hoje é conhecido como limite de resistência à fadiga (FEL – *Fatigue Endurance Limit*) para a vida de projeto.

A partir de 1860 Wöhler desenvolveu equipamentos de fadiga para flexão e torsão com frequências e solicitações diversas, e em 1870 apresentou as “Leis de Wöhler”, utilizadas até hoje, onde dizia que o material pode ser levado à ruptura quando submetido à muitas repetições de cargas, mesmo que estas sejam sempre menores que sua resistência ao carregamento estático.

Também declara que as amplitudes de tensão são o parâmetro mais importante para a perda de coesão dos materiais (SCHUTZ, 1996).

Hveem em 1955 foi um dos primeiros pesquisadores que relataram falha de fadiga causada por carga repetida em pavimentos asfálticos, sobre solos altamente resilientes, concluindo que havia uma correlação entre as observações de fissuras, falhas por fadiga e as deflexões medidas nas passagens dos veículos. Hveem sugeriu que um pavimento deve ser projetado para suportar deflexões ou ter rigidez suficiente para reduzir as deflexões a níveis permitidos e, também, deve resistir à fadiga ao longo de sua vida útil (KAREEM e CHANDRA, 2012).

Pell *et al.* (1961) sugeriram um modelo de fadiga para misturas asfálticas, obtido por regressão, relacionando o número de ciclos até a ruptura com a amplitude de deformação imposta ao material, a partir de ensaios laboratoriais, propondo uma relação única da fadiga com a deformação de tração. No Brasil, Preussler *et al.* (1981) apresentaram os primeiros modelos para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas utilizando ensaios de tração indireta por compressão diametral, considerando a tensão de tração.

Diversos estudos vêm demonstrando que o tráfego, as condições ambientais, a combinação estrutural do pavimento e as propriedades dos materiais que compõem a mistura asfáltica são os principais fatores que influenciam o comportamento à fadiga do pavimento (TANGELLA *et al.*, 1990; TAYEBALI *et al.*, 1994; ZHOU *et al.*, 2016). A seguir, estes são detalhados:

a) **Tráfego:** O trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos ocorre devido as tensões e deformações geradas, no revestimento, pela ação do tráfego. A velocidade e a carga dos veículos são determinantes na maneira como as tensões se desenvolvem na camada. Em ensaios de laboratório busca-se carregar a amostra da forma mais fiel possível às condições impostas pelo tráfego, assim, os ensaios podem ser conduzidos sob tensão ou deformação controlada, a forma da onda de carregamento pode variar (senoidal, *haversine*, cíclico ou retangular), e a duração do pulso de carga também. Baburamani (1999) considera que os ensaios sob deformação controlada (taxa menor de propagação de fissuras) são mais adequados para simular as condições de pavimentos com revestimento asfáltico delgado (menores de 8 cm), enquanto ensaios à tensão controlada (taxa mais elevada de propagação de fissuras) simulam mais adequadamente o comportamento de pavimentos com revestimentos espessos (maiores de 8 cm). Os resultados podem ser bastante diferentes dependendo das condições empregadas, devido a diferença na taxa de propagação do trincamento. Nos ensaios sob tensão controlada a

vida de fadiga obtida é menor em relação aos ensaios sob deformação controlada (TANGELLA *et al.*, 1990; BABURAMANI, 1999; MEDINA e MOTTA, 2015). A velocidade dos veículos, o tipo de rodado e a espessura da camada de concreto asfáltico (CA) também influenciam na relação da duração do carregamento: quanto mais espessa a camada, maior deve ser a duração da carga para que as tensões alcancem a parte inferior da camada (TANGELLA, *et al.*, 1990).

b) **Condição ambiental:** a condição ambiental influencia as propriedades da mistura asfáltica, tais como rigidez e, conseqüentemente, influencia a tensão ou deformação no pavimento. Os materiais asfálticos herdam do ligante a dependência da temperatura, sendo mais rígidos em temperaturas mais baixas e menos rígido em temperaturas altas. O envelhecimento do ligante asfáltico também leva a um aumento de rigidez da mistura, o que poderá reduzir sua capacidade de resistir à fissuração uma vez que a fragilidade aumenta (TONIAL *et al.*, 2001).

c) **Combinação estrutural do pavimento:** a estrutura do pavimento, em relação às espessuras e o módulo das camadas, tem influência significativa na magnitude das tensões e deformações, e na potencial localização do início da fissura no revestimento. Hu *et al.* (2008) comparam as deformações de tração em diferentes locais da estrutura do pavimento, e mostram que quando o módulo da mistura asfáltica é alto, a localização potencial do início do trincamento por fadiga é dependente da espessura da camada de revestimento. No entanto, quando o módulo da mistura é baixo, o início das trincas, tanto de baixo para cima quanto de cima para baixo, provavelmente ocorrerá simultaneamente, independente da espessura da camada. Outro fator relevante é a relação entre o módulo do revestimento e o da camada subjacente em pavimentos flexíveis: quanto maior for a razão entre os dois módulos mais próxima à superfície estará a linha neutra e mais alta será a deformação de tração na base do revestimento, diminuindo assim sua vida de fadiga.

d) **Propriedades dos materiais da mistura:** as propriedades da mistura têm influências fundamentais na propagação da fissuração por fadiga. O tipo de mistura, o teor e o tipo de ligante asfáltico e o volume de vazios (VV) influenciam diretamente no comportamento da mistura em termos de rigidez, propriedades viscoelásticas e propriedades de fratura (TANGELLA *et al.*, 1990). Quanto maior o teor de ligante, até um determinado limite que possa não comprometer a estabilidade da mistura, maior será a vida de fadiga (HARVEY *et al.*, 1995). Os ligantes asfálticos mais viscosos tendem a apresentar maior vida de fadiga em ensaios de tensão controlada e menor em ensaios de deformação controlada. Já o volume de vazios está relacionado ao processo de compactação, assim, quanto menor o volume de vazios maior a vida de fadiga, em ambos os modos de carregamento (TANGELLA *et al.*, 1990).

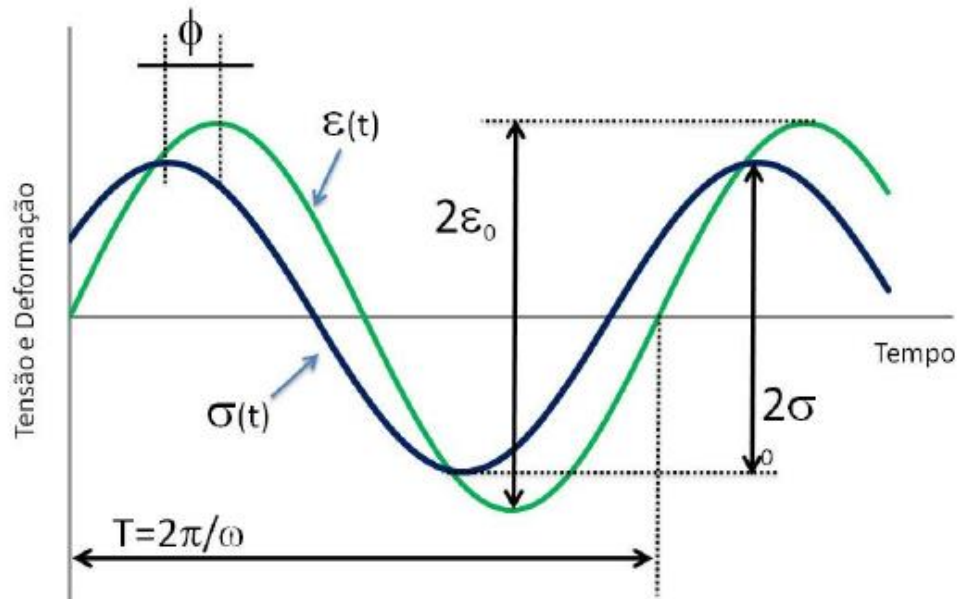
Em ensaios laboratoriais, outro quesito que pode influenciar o resultado de fadiga é o método de produção das amostras. Existem diferentes métodos de compactação em laboratório, e o principal objetivo é escolher um método capaz de produzir amostras com características que correspondam ao comportamento do concreto asfáltico em campo, atendendo a critérios de homogeneidade e densidade. Os métodos de compactação utilizados podem ser a compactação estática, compactação por impacto, compactação por amassamento, compactação giratória e compactação por rolamento. Tangella *et al.* (1990) apontam que os métodos de rolamento, amassamento e giratório produzem amostras mais próximas da condição de compactação aplicada em campo, com rolos compactadores.

O comportamento de misturas asfálticas à fadiga é estudado intensamente há muitos anos, usando diferentes abordagens e considerações. Inicialmente a abordagem era puramente fenomenológica, onde são relacionados os níveis de tensão/deformação impostos com o número de ciclos até a ruptura, sem uma análise teórica do comportamento mecânico do material. Posteriormente, a abordagem passou a incluir elementos mecanísticos, onde o comportamento à fadiga é relacionado com critérios como a energia dissipada durante as solicitações, a mecânica da fratura e a mecânica do dano contínuo.

Diversos autores consideram que a abordagem da energia dissipada explica de maneira mais racional o fenômeno de fadiga em materiais asfálticos, uma vez que a energia dissipada em cada ciclo de carregamento é função das condições físicas do material, ou seja, da evolução da degradação (SHEN e CARPENTER, 2005, 2007; SHEN *et al.*, 2006; DONDI *et al.*, 2013; SUBHY *et al.*, 2017). Ao se aplicar um carregamento ao concreto asfáltico, existirá uma tensão que irá induzir deformações; ao remover esta carga, o material tenderá a recuperar a deformação sofrida, porém, em materiais viscoelásticos as curvas de carga e descarga não coincidem, e formam um laço de histerese. A área compreendida por este laço corresponde à energia dissipada no ciclo de carga (GHUZLAN e CARPENTER, 2000).

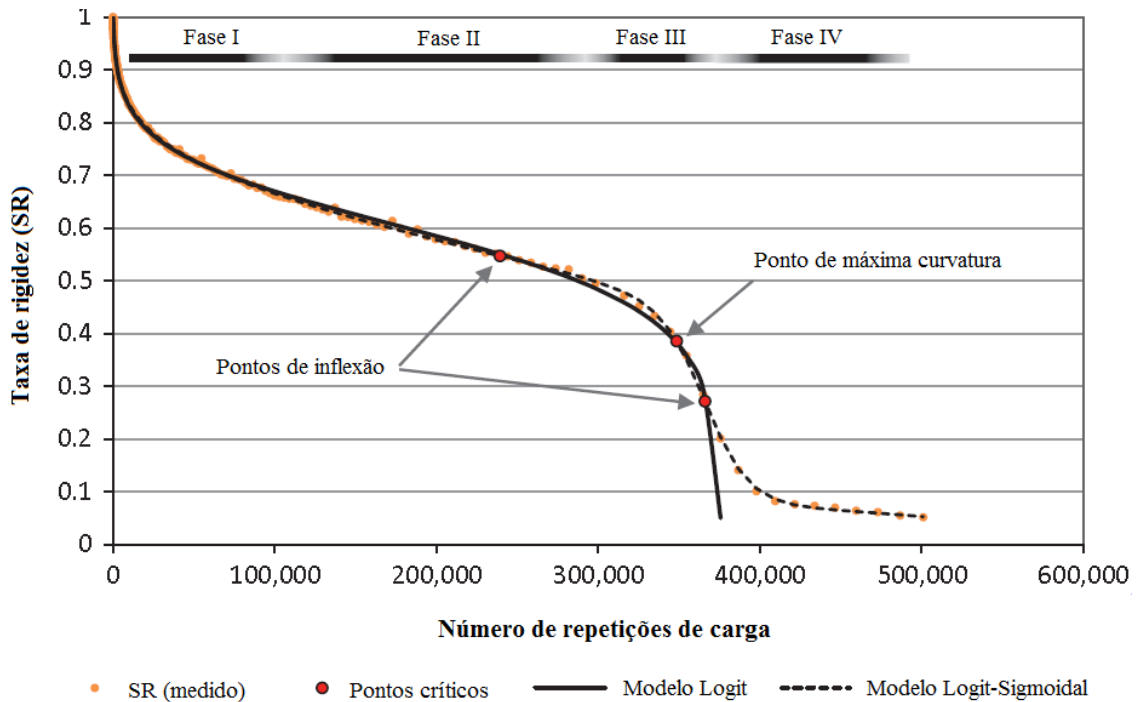
O ângulo de fase, utilizado no cálculo da energia dissipada, é uma característica dos materiais viscoelásticos submetidos à carregamentos harmônicos, onde se observa uma defasagem entre a onda de tensão e deformação. A relação entre esta defasagem de tempo e o período de aplicação de carga resulta no ângulo de fase (ϕ) (Figura 6), que também serve como medida do grau de viscoelasticidade do material; quanto maior a defasagem mais viscoso e menos elástico é o material (ROWE, 1996).

Figura 6 – Defasagem entre tensão (σ) e deformação (ϵ) no carregamento (MELLO, 2008).



Outra forma de avaliar a degradação do pavimento asfáltico é pela queda da rigidez ao longo do tempo em ensaios de fadiga. Um exemplo de queda da rigidez de uma amostra de CA ensaiado a flexão em quatro pontos, com modo de deformação controlada, é apresentado na Figura 7, mostrando as três fases normalmente consideradas durante o ensaio, bem como uma quarta fase, como está a seguir detalhado. A relação de rigidez (SR= rigidez no ciclo N dividido pelo valor de rigidez inicial) muda a uma taxa decrescente durante a Fase I, devido ao dano e a um aumento de temperatura, que pode ser atribuído à dissipação de energia viscosa e outros fenômenos reversíveis, como a tixotropia e o *healing*, também conhecido como regeneração. A taxa de diminuição da rigidez permanece relativamente constante durante a Fase II. A diminuição da rigidez durante esta fase tem sido tradicionalmente atribuída às microfissuras, embora os fenômenos reversíveis também estejam presentes. A diminuição da rigidez acelera durante a Fase III, e isto tem sido atribuído, tradicionalmente, a uma coalescência de microfissuras que geram uma macrotrinca. Finalmente, na Fase IV, que ocorre no final dos ensaios de fadiga sob deformação controlada, a taxa de rigidez diminui lentamente, provavelmente devido a uma redução da concentração das tensões nas trincas à medida que a carga aplicada reduz (MATEOS *et al.*, 2017).

Figura 7 – Evolução típica de SR durante ensaios de fadiga sob deformação controlada (Adaptado de MATEOS *et. al*, 2017).



Os fenômenos reversíveis manifestados pelas misturas asfálticas se mostram como aspectos com grande influência no comportamento à fadiga, uma vez que têm efeito contrário ao acúmulo do dano. O *healing* é uma propriedade que os materiais viscoelásticos possuem de recuperar possíveis microtrincas surgidas com o acúmulo de dano e quando submetidos a períodos de repouso entre aplicações de cargas (SHEN e CARPENTER, 2007; ASHOURI, 2014; KARKI *et al.*, 2014; AYAR *et al.*, 2016). A tixotropia é a tendência do material diminuir a viscosidade quando carregado, e recuperar quando a carga é removida, devido ao rearranjo de moléculas do ligante asfáltico, isto afeta tanto o comportamento à fadiga quanto o próprio *healing* (SHAN *et al.*, 2011; ASHOURI, 2014).

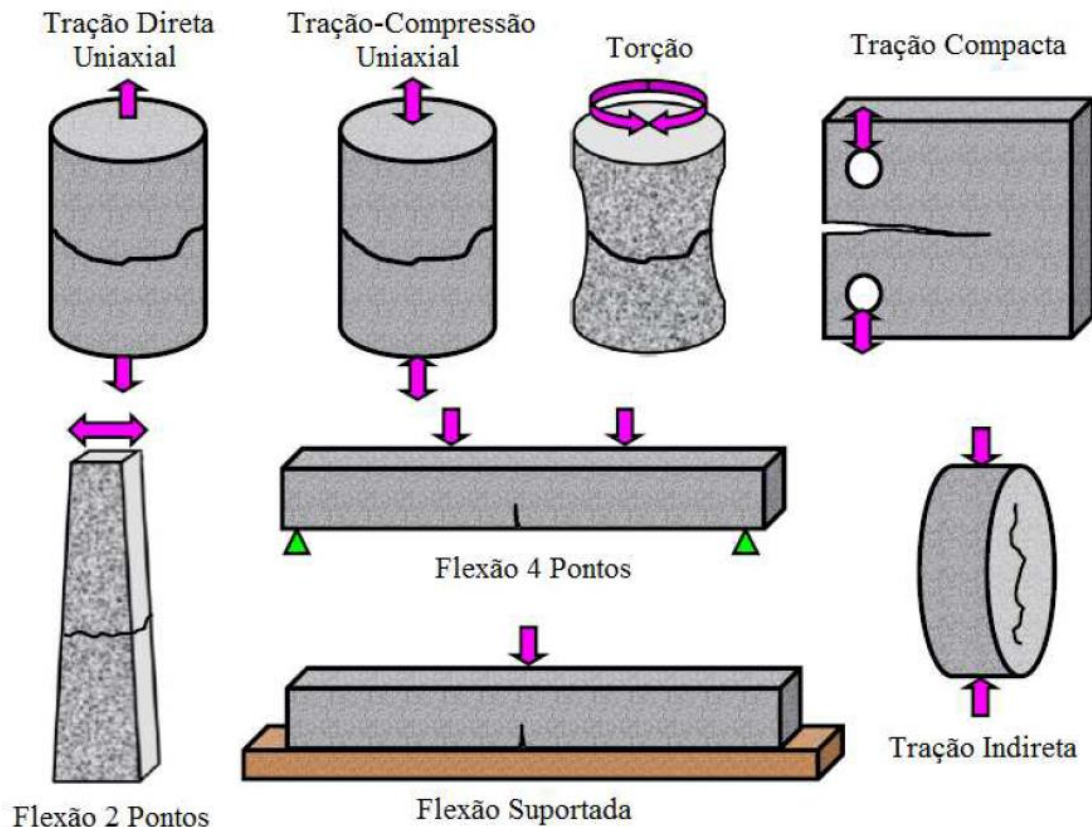
Uma consideração mais recente em relação ao dano de fadiga causado ao pavimento é a validação de um mecanismo, proposto pela primeira vez por Monismith e Deacon em 1969, onde um limite de resistência à fadiga (*Fatigue Endurance Limit – FEL*) é apresentado, ou seja, existe um limite de deformação abaixo do qual um pavimento asfáltico não sofrerá ruptura por fadiga devido às cargas de tráfego. A partir de análises de dados existentes na época sugeriu-se que parecia haver um limite, de cerca de 70 microdeformações. A confirmação laboratorial para isto é complexa e pode ser bastante imprecisa (KAREEM e CHANDRA, 2012). Zeiada *et al.* (2016) avaliaram diferentes metodologias de obtenção do FEL para uma gama de misturas

asfálticas e, verificaram que os valores de deformação podem variar de 30 $\mu\epsilon$ a 170 $\mu\epsilon$, dependendo da metodologia utilizada, e isto acabará influenciando diretamente no projeto e na vida de fadiga do pavimento. Alguns autores afirmam que os fenômenos reversíveis são a chave para a existência de um limite de resistência à fadiga (CARPENTER e SHEN, 2006).

2.3 ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Muitas metodologias e configurações de ensaios foram desenvolvidas para estudar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas (Figura 8). Tangella *et al.* (1990) realizaram uma revisão sobre o processo de trincamento por fadiga em laboratório. Tayebali *et al.* (1994), avaliaram os ensaios de fadiga em flexão quatro pontos, tração indireta por compressão diametral e flexão em amostras trapezoidais. Mais recentemente, foram desenvolvidos ensaios de fadiga como o de flexão em amostra semicircular com fenda - SCB (*Semi-circular bending*) (ARABANI e FERDOWSKI, 2009; GAO *et al.*, 2016; STEWART *et al.*, 2017; GODOI, 2017) e o de tração direta, usado no modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) (DANIEL e KIM, 2002; BABADOPULOS *et al.*, 2015; NASCIMENTO, 2015), para avaliar o comportamento à fadiga de concretos asfálticos. A escolha por um determinado método deve considerar critérios importantes como: a descrição do ensaio; disponibilidade de normatização; propriedades medidas do material; variabilidade; simplicidade ou complexidade em termos de execução, preparação e instrumentação de amostras, realização do ensaio, análise de dados e interpretação dos resultados; sensibilidade do ensaio aos componentes da mistura como, por exemplo, o volume de vazios; disponibilidade do equipamento e os custos associados; correlação de laboratório-campo e critérios relacionados (ZHOU *et al.*, 2016).

Figura 8 – Diferentes configurações de ensaios de fadiga (ZEIADA, 2012).



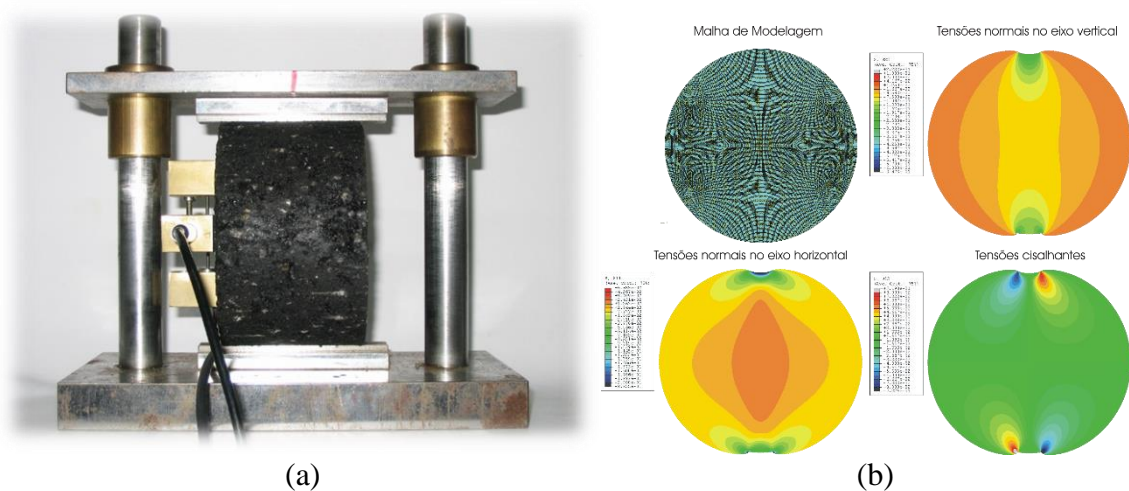
No Brasil, o desempenho à fadiga em laboratório geralmente é abordado por ensaios de compressão diametral e modelados pelas curvas de Wöhler como um comportamento do número de ciclos até a ruptura da amostra em função do nível de tensão imposto. A partir dos anos 1990, diversos pesquisadores têm utilizado abordagens mecânicas para a modelagem da fadiga, como o parâmetro da energia dissipada, a cada ciclo de carregamento, como forma de iniciação e propagação das fissuras que levam à fadiga do material (RODRIGUES, 1991; GHUZLAN e CARPENTER, 2000; SHEN e CARPENTER, 2007; SHEN e LU, 2011; ABOJARADEH, 2013) e, também, pela teoria do dano contínuo (KIM *et al.*, 2002; UNDERWOOD *et al.*, 2012; NASCIMENTO, 2015).

2.3.1 Ensaio de tração indireta por compressão diametral

A metodologia de ensaio de fadiga em misturas asfálticas mais empregada no Brasil ainda hoje é o de tração indireta por compressão diametral. A configuração do ensaio é baseada no ensaio de resistência à tração por compressão em corpos de prova de concreto de cimento Portland, desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro em 1943.

Os corpos de prova utilizados neste ensaio são cilíndricos e o carregamento é realizado por compressão, atuando paralelamente ao plano diametral vertical desenvolvendo, assim, tensões de tração uniformes no corpo de prova, perpendiculares à direção de aplicação da carga, gerando um plano de ruptura ao longo do diâmetro carregado, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Configuração (a) e distribuição de tensões (b) no ensaio de fadiga a tração indireta por compressão diametral (BRITO, 2006).



O ensaio é realizado com controle de tensão, o que acaba sendo uma limitação desta configuração, e pode ser executado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência (MR) por compressão diametral, à temperatura controlada de 25°C. A carga aplicada conduz a níveis de tensões de tração horizontais de 5% a 40% da resistência à tração estática (RT), ocasionando o trincamento total e posterior ruptura do corpo de prova (DNIT 183, 2018). O carregamento aplicado é com pulso de carga de duração igual a 0,10 segundos para 0,90 segundos de intervalo de repouso, representando o tempo de intervalo entre a passagem de uma roda e outra. O corpo de prova empregado é submetido a um estado biaxial de tensões e a frequência utilizada é igual a 1Hz (PINTO, 1991; CERATTI, 1991; MEDINA e MOTTA, 2015). As leituras de deformação podem ser realizadas por meio de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*), posicionados no corpo de prova, e o ensaio é conduzido até ruptura total da amostra.

As principais vantagens do ensaio de compressão diametral para obter a vida de fadiga de misturas asfálticas são a facilidade de execução do ensaio e produção das amostras. O ensaio pode ser realizado com corpos de prova moldados em laboratório ou extraídos de pista, e é de boa repetibilidade e reprodutibilidade, além de ser economicamente e comercialmente viável.

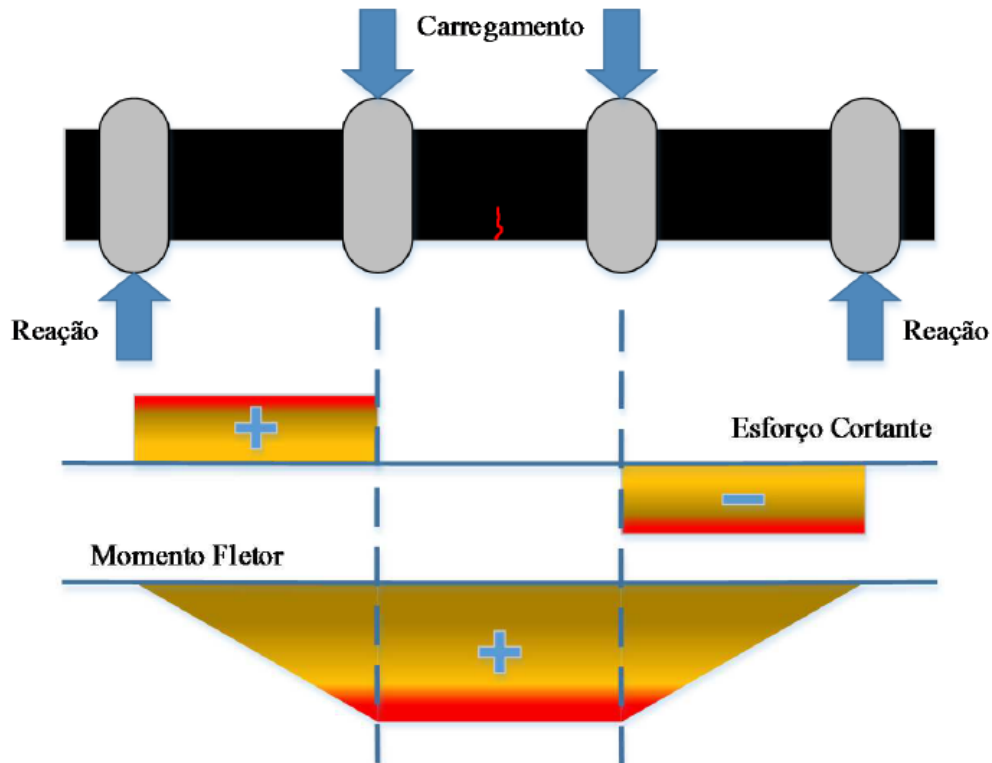
Em relação as desvantagens, ocorre durante o ensaio o surgimento de deformações permanentes junto aos frisos de carregamento, o que é indesejável para a avaliação do potencial de fissuração das misturas asfálticas e faz com que a vida de fadiga do material seja subestimada, e para tensões de tração elevadas (acima de 30% da RT) começa a predominar a parcela viscosa do material, comprometendo o mecanismo de fadiga (TANGELLA *et al.*, 1990; TAYEBALI *et al.*, 1994). Kim *et al.* (2002) afirmam que a simplicidade e facilidade do ensaio não justificam o seu uso em detrimento dos demais disponíveis.

2.3.2 Ensaio de flexão em viga quatro pontos

O ensaio de flexão em viga quatro pontos foi desenvolvido na Universidade de Berkeley, na Califórnia, em meados dos anos 1980 (HARVEY, *et al.*, 1993) e, desde então vem sendo bastante utilizado nos Estados Unidos, Europa e Austrália. No Brasil, os primeiros ensaios de fadiga sob flexão em vigas foram desenvolvidos por Ceratti (1991), para analisar o comportamento de vigas de solo-cimento, e por Pinto (1991), para avaliar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas.

Esta configuração é reconhecida por muitos pesquisadores como a que melhor representa a solicitação de campo em pavimentos, sob flexo-tração (TAYEBALI *et al.*, 1994; HARVEY, *et al.*, 1995; TSAI *et al.*, 2003; ABOJARADEH, 2013). A amostra prismática é bi-apoiada e submetida a carregamento vertical nos terços médios, fazendo com que se desenvolvam momentos fletores constantes na zona central da amostra, sem a influência de esforços cortantes o que reduz a variabilidade dos resultados (TANGELLA *et al.*, 1990; FONTES, 2009; MELO, 2014). Na Figura 10 é apresentado um exemplo da configuração e distribuição de esforços no ensaio de flexão em quatro pontos.

Figura 10 – Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em vigas quatro pontos (MELO, 2014).



O ensaio é normatizado por normas americanas (AASHTO T-321, 2017 e ASTM D7460, 2010) e norma europeia (EN 12697:24, 2010), e ambas recomendam a realização do ensaio a 10Hz, o que proporciona um ensaio relativamente rápido e com boa representação dos pulsos de carga gerados pelo tráfego de veículos. O controle de ensaio pode ser por tensão ou deformação, dependendo das condições de campo em que se quer representar. O ensaio de tensão controlada é conduzido até a ruptura da amostra e o de deformação controlada até que se atinja uma queda de 50% da rigidez inicial da amostra. A trinca gerada na amostra deve estar na zona central, onde o momento fletor é constante.

Além da diferença na maneira como as tensões de tração se desenvolvem, a vida de fadiga obtida por este método tende a ser consideravelmente maior que a obtida nos ensaios de compressão diametral, devido principalmente as deformações permanentes que surgem no ensaio diametral, que não são permitidas na flexão (MOMM, 1998).

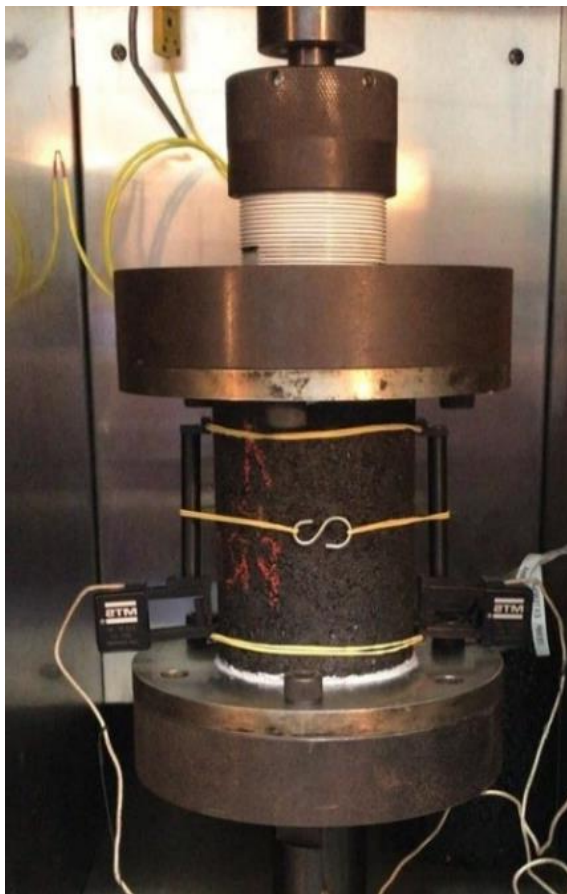
2.3.3 Ensaio de tração direta

Os ensaios cíclicos de tração direta vêm ganhando destaque nos últimos anos por fazerem parte do protocolo de obtenção de curvas características de dano usando a modelagem pelo dano

contínuo viscoelástico, desenvolvido por pesquisadores da *North Carolina State University* (NCSU) nos Estados Unidos (UNDERWOOD *et al.*, 2010; UNDERWOOD *et al.*, 2012; AASHTO TP-107, 2014; SABOURI e KIM, 2014; ZEIADA *et al.*, 2014a; ZEIADA *et al.*, 2014b; NASCIMENTO, 2015; XIE e SHEN, 2015; ZEIADA *et al.*, 2016; KESHAVARZI e KIM, 2016; RAHBAR-RASTEGAR *et al.*, 2017; MOCELIN, 2018; BABADOPULOS *et al.*, 2018).

Neste ensaio, corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm × 130 mm (Figura 11a) ou 38 mm x 110 mm (Figura 11b) são submetidos à carregamentos cíclicos senoidais sob deformação controlada e frequência de 10 Hz (AASHTO TP-107, 2014). A deformação axial é medida por extensômetros localizados na seção intermediária do corpo de prova, evitando efeitos de borda.

Figura 11 – Configuração do ensaio de tração direta: (a) amostras de 100 mm x 130 mm e (b) amostras de 38 mm x 110 mm.



(a)

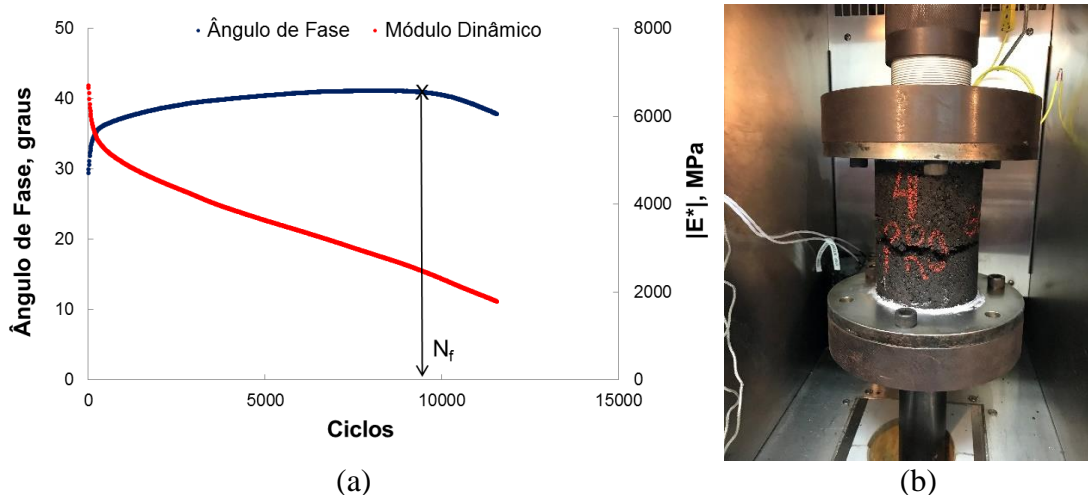


(b)

O critério de ruptura geralmente utilizado neste tipo de ensaio é a queda do ângulo de fase (SABOURI e KIM (2014); NASCIMENTO *et al.*, 2014; BABADOPULOS, 2014), conforme

apresentado na Figura 12a. O ensaio é validado se a localização da macrotrinca ocorreu em uma seção dentro do intervalo de medição dos extensômetros (Figura 12b), normalmente afastados 100 mm na região central. Caso ocorra fora desta área, o ensaio deve ser descartado, pois as deformações não podem ser corretamente capturadas pelos sensores. De acordo com a AASHTO TP-107 (2014), para obter uma curva de fadiga por dano, devem ser ensaiadas pelo menos três corpos de prova, em diferentes níveis de deformação. Durante a realização do ensaio são monitorados e coletados dados de deformação, carga, ângulo de fase e módulo dinâmico.

Figura 12 – Queda do ângulo de fase durante o ensaio de fadiga por tração direta (a) (NASCIMENTO *et al.*, 2014) e verificação da localização da macrotrinca (b).



Nesta metodologia, as amostras são submetidas a um estado uniforme e homogêneo de tensões e deformações, sendo assim, mais fácil a compreensão do fenômeno (DI BENEDETTO *et al.*, 2004; ZEIADA *et al.*, 2016). Outra grande vantagem deste método em relação aos demais é a rapidez do ensaio, sendo possível determinar curvas de dano com cerca de cinco dias de ensaio, incluindo a caracterização linear viscoelástica com os resultados de módulo dinâmico, enquanto outros métodos podem levar semanas para obtenção das curvas de fadiga. Além disso, a matriz experimental exigida é bastante enxuta, com a necessidade de poucos corpos de prova a serem ensaiados para a caracterização do dano (NASCIMENTO, 2015; MOCELIN, 2018).

2.4 CRITÉRIOS DE RUPTURA EM ENSAIOS DE FADIGA

Diferentes critérios de ruptura, para ensaios de fadiga em misturas asfálticas, foram postostos ao longo do tempo empregando distintos parâmetros, não havendo ainda um consenso de qual representa de forma mais apropriada o término da vida de fadiga do concreto asfáltico (PELL

e COOPER, 1975; PRONK e HOPMAN, 1990; ROWE, 1993; GHUZLAN e CARPENTER, 2000; ROWE e BOULDIN, 2000; ABOJARADEH, 2013; SABOURI e KIM, 2014; WANG e KIM, 2017; WANG *et al.*, 2018).

Os critérios de ruptura clássicos em ensaios de fadiga consistem na redução, geralmente em 50%, do módulo inicial da amostra (ou da rigidez) (TAYEBALI *et al.*, 1992; HARVEY *et al.*, 1995; EN 12697-24, 2004; SHEN e LU, 2011), ou na ruptura total da amostra, registrando o número de ciclos quando o corpo de prova rompe (PELL *et al.*, 1961; TAYEBALI *et al.*, 1994; EN 12697-24, 2004, DNIT 183, 2018). De acordo com o critério de redução do módulo inicial a ruptura da amostra ocorre quando o módulo ou a rigidez reduz à metade do valor inicial. Apesar deste critério ser ainda bastante empregado em misturas asfálticas, diversos autores não o consideram adequado para definição da ruptura, pois as misturas podem apresentar capacidades diferentes de sofrerem dano e, por consequência, ter reduções diferentes de módulo na ruptura (ZHANG *et al.*, 2013; SABOURI e KIM, 2014; BABADOPULOS *et al.*, 2016). Wang *et al.* (2015) comentam que estes critérios são baseados em uma definição arbitrária, sem justificativa teórica ou fenomenológica.

Rowe e Bouldin (2000) desenvolveram um critério de ruptura baseado em uma taxa de energia reduzida, determinada a partir da relação entre o número do ciclo (N_i) e a rigidez da amostra neste ciclo (S_i). A ruptura é definida como o ponto de pico do gráfico onde é plotado esta taxa de energia ($N_i \times S_i$) versus o número de ciclos, podendo ser usado para ensaios sob deformação ou tensão controlada. A norma AASHTO T-321 (2017) adota este critério de ruptura para ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, sob deformação controlada.

Alguns autores (GHUZLAN e CARPENTER, 2000; SHEN e CARPENTER, 2005, 2006, 2007; SHEN *et al.*, 2010; ABOJARADEH, 2013) desenvolveram critérios de ruptura baseados na energia dissipada pela amostra durante o ensaio de fadiga, considerando a ruptura quando a maior parte da energia fornecida ao material é usada para propagar as trincas.

Os materiais viscoelásticos, quando submetidos a carga cíclica, apresentam um ciclo de histerese, uma vez que o caminho de carga e descarga não é coincidente devido à viscoelasticidade. A área dentro desse loop corresponde à energia dissipada nesse ciclo de carga (ROWE, 1996; GHUZLAN e CARPENTER, 2000) e pode ser calculada pela equação (1).

$$DE_i = \pi * \varepsilon_i * \sigma_i * \text{sen}(\varphi_i) \quad (1)$$

Onde:

DE_i – energia dissipada no ciclo de carregamento i ;

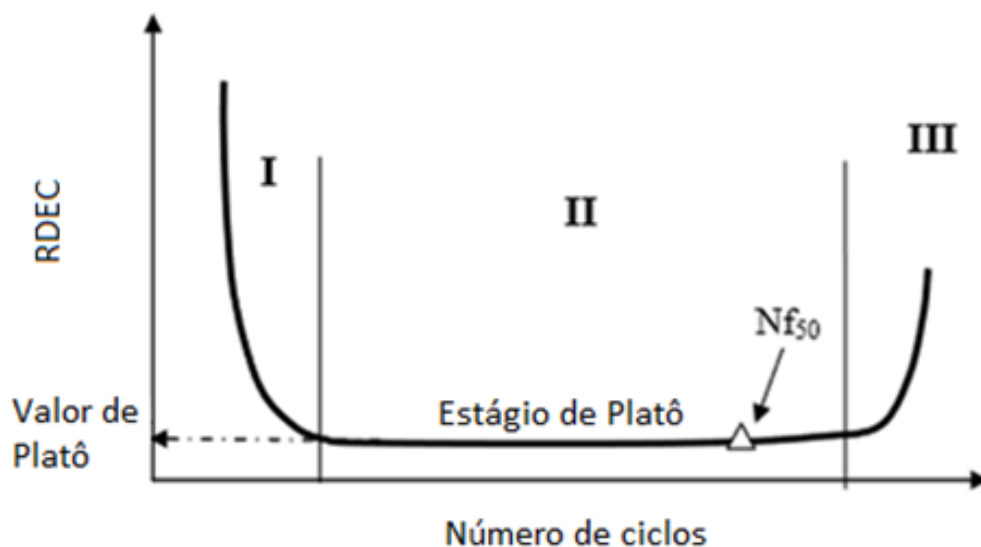
ε_i – amplitude de deformação no ciclo de carregamento i ;

σ_i - amplitude de tensão no ciclo de carregamento i ;

ϕ_i – ângulo de defasagem entre a tensão e a deformação no ciclo de carregamento i .

Ghuzlan e Carpenter (2000) propuseram o conceito de taxa de variação da energia dissipada (RDEC - *ratio of dissipated energy change*) para definir a ruptura por fadiga em misturas asfálticas. Esta taxa foi determinada a partir da razão entre a mudança na energia dissipada entre dois ciclos consecutivos ($N, N + 1$) e a energia total dissipada no ciclo de carga avaliado. A curva de RDEC *versus* número de ciclos (Figura 13) pode ser dividida em três partes. No estágio I ocorre um decréscimo acentuado da RDEC, provavelmente devido a acomodação do material a aplicação do carregamento cíclico, no estágio II, chamado de fase de platô, a porcentagem de energia transformada em dano é constante, até atingir um ponto em que o valor da RDEC aumenta rapidamente, proporcionando a ruptura da amostra, representado pelo estágio III. Os autores usaram o parâmetro chamado de valor de platô (PV) e descobriram que o número de ciclos necessários para produzir uma perda de 50% no módulo inicial do material se correlacionava bem (R^2 entre 0,9 e 1) com o PV, incluindo na análise resultados de ensaio sob deformação e tensão controlada (CARPENTER *et al.*, 2003).

Figura 13 – Evolução da taxa de variação da energia dissipada (CARPENTER *et al.*, 2003)



A taxa de variação da energia dissipada pode ser determinada para ensaios à deformação controlada pela equação (2) e para ensaios à tensão controlada pela equação (3) (SHEN *et al.*, 2010).

$$RDEC_{N+1} = \frac{(DE_N - DE_{N+1})}{DE_{N+1} \times (N + 1 - N)} \quad (2)$$

$$RDEC_{N+1} = \frac{(DE_{N+1} - DE_N)}{DE_{N+1} \times (N + 1 - N)} \quad (3)$$

Onde:

$RDEC_{N+1}$ – taxa de variação da energia dissipada no ciclo N+1;

DE_N, DE_{N+1} - energia dissipada no ciclo N e N+1.

O critério de ruptura baseado na energia dissipada é considerado por alguns autores (ROWE, 1996; ABOJARADEH, 2013; SUBHY *et al.*, 2017) como um bom método para definir a ruptura da amostra em ensaios de fadiga. No entanto, outros autores (BHASIN *et al.*, 2009; SABOURI e KIM, 2014; NASCIMENTO, 2015) relatam que como a dissipação de energia não ocorre somente em função do dano na amostra, mas também devido a viscoelasticidade e a deformação plástica, para utilizar a energia dissipada como um critério de ruptura seria necessário separar estes efeitos que contribuem na dissipação.

Reese (1997) sugeriu uma abordagem para determinação do critério de ruptura em função da queda do ângulo de fase, que vem sendo utilizado em ensaios com modelagem de dano contínuo viscoelástico. Durante o carregamento cíclico, o ângulo de fase geralmente apresenta um aumento estável, pois conforme a amostra vai sofrendo dano e microtrincas vão surgindo a elasticidade do material deve diminuir, seguido por uma queda acentuada, provavelmente porque a amostra para de acumular dano devido ao surgimento de uma macrotrinca. Assim, a ruptura é definida como o ciclo em que ocorre essa queda acentuada do ângulo de fase. Zhang *et al.* (2013) acreditam que essa abordagem tenha mais apoio teórico do que a abordagem tradicional, devido a definição de ruptura ser baseada no comportamento viscoelástico do material. Porém, de acordo com alguns estudos (SABOURI e KIM, 2014; NASCIMENTO 2015; GUDIPUDI e UNDERWOOD, 2016; WANG e KIM, 2017) a queda no ângulo de fase deve ser empregada como um indicador de ruptura ou um critério de ruptura experimental, não

podendo ser utilizado para previsão de vida de fadiga, em função de experimentalmente este critério se mostrar dependente do modo de carregamento dos ensaios.

Como experimentalmente, esses critérios de ruptura se mostram dependentes do modo de carregamento, Sabouri e Kim (2014) propuseram um critério de ruptura para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas independente do modo de carregamento, combinando a queda do ângulo de fase com a pseudo-energia liberada no ensaio.

No carregamento cíclico, a quantidade máxima de energia de pseudo-deformação (W_{\max}^R) ocorre no ponto de máxima tensão e representa a capacidade que o material possui de acumular energia, sendo calculada para cada ciclo conforme a equação (4).

$$W_{\max}^R = \frac{1}{2} C (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \quad (4)$$

Onde:

C - integridade do material ou pseudo-rigidez;

$\varepsilon_{0,ta}^R$ - pseudo-deformação na condição de tração (detalhado no item 2.5 deste trabalho).

A capacidade do material de armazenar energia diminui à medida que ocorre o dano, devido à redução da pseudo-rigidez (C). Assim, ao comparar a pseudo-energia do estado sem dano com a energia de pseudo-deformação acumulada, a cada ciclo, determina-se a perda de energia acumulada devido à propagação do dano, chamada de energia de pseudo-deformação total liberada (W_C^R) (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Considerando um plano de tensão (σ) *versus* pseudo-deformação (ε^R), a energia de pseudo-deformação total liberada (W_C^R) é definida como uma área triangular formada por três retas: (i) a reta inicial sem dano – $\sigma = \varepsilon^R$; (ii) a reta atual de dano – $\sigma = C\varepsilon^R$; (iii) linha da pseudo-deformação máxima – $\varepsilon^R = \varepsilon_{\max}^R$ (ZHANG *et al.*, 2013; NASCIMENTO *et al.*, 2014; BABADOPULOS *et al.*, 2016). A equação (5) é empregada para o cálculo de W_C^R para um determinado ciclo.

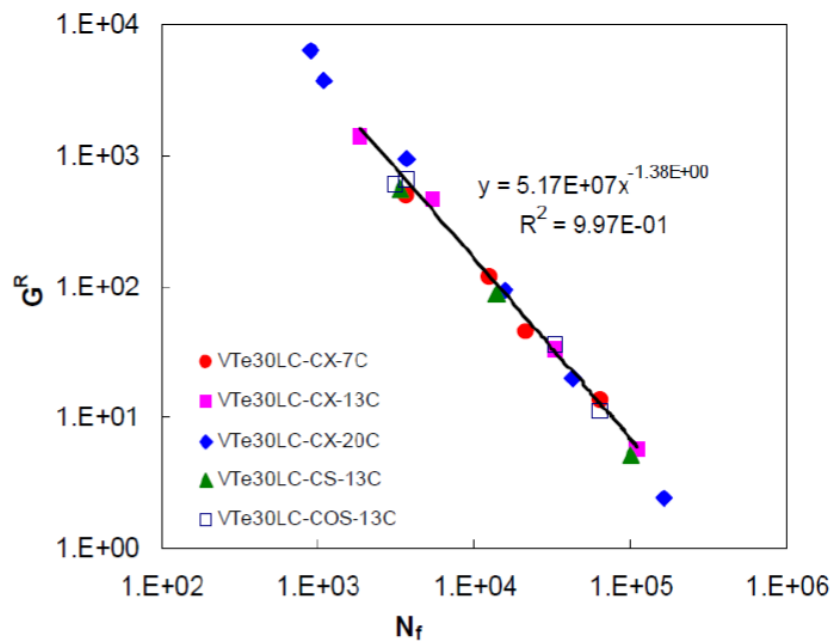
$$W_C^R = \frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 (1-C) \quad (5)$$

Sabouri e Kim (2014) propuseram uma nova variável relacionada com a energia, o G^R (equação (6)), definido como a taxa de mudança média de pseudo-energia acumulada liberada. Os autores demonstram que a relação desta variável com o número de ciclos até a ruptura (N_f) de uma determinada mistura asfáltica é linear na escala log-log, independentemente do modo de

carregamento e da temperatura de ensaio, conforme mostra a Figura 14 (SABOURI e KIM, 2014; NASCIMENTO, 2015).

$$G^R = \frac{W_C^R}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{(N_f)^2} \quad (6)$$

Figura 14 – Resultados de G^R versus N_f para diferentes modos de carregamento e temperaturas (SABOURI e KIM, 2014).



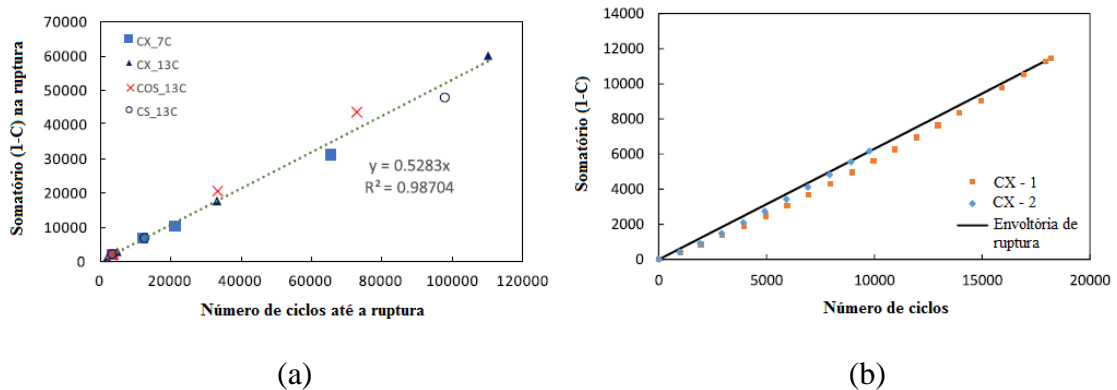
Para utilizar o critério de ruptura do G^R é necessária a determinação de uma regressão linear, em escala log-log, utilizando no mínimo três corpos de prova. Wang e Kim (2017) comentam que devido ao uso da escala log-log, a variabilidade dos resultados pode influenciar consideravelmente os coeficientes da regressão. Assim, a utilização deste critério em análises em estruturas de pavimentos, onde é necessária a extrapolação devido aos diferentes níveis de deformação que ocorrem em campo, pode levar a incertezas relevantes.

Com o intuito de sanar as incertezas do critério de ruptura do G^R , geradas devido a escala log-log, Wang e Kim (2017) determinaram, a partir de observações experimentais, um critério também baseado na energia de pseudo-deformação liberada, mas avaliada pela redução da pseudo-rigidez (C), chamado de D^R . Conforme prescreve o modelo de dano contínuo viscoelástico, a energia de pseudo-deformação apresenta uma relação com o estado de dano do material (S), e o dano do material também possui relação única com a pseudo-rigidez. Assim,

os autores propuseram, para um determinado material, uma relação única entre o somatório de (1-C) com o número de ciclos até a ruptura, independente da temperatura, modo de carregamento e amplitude de carga de ensaio.

A Figura 15 (a) mostra esta relação para ensaios realizados sob diferentes formas de carregamento, sendo os pontos plotados correspondentes apenas ao somatório de (1-C) no momento da ruptura, apesar de o somatório ser calculado durante todo o ensaio. Dessa forma, a ruptura é definida quando o ciclo no qual o somatório de (1-C) intercepta esta envoltória. A Figura 15 (b) apresenta um exemplo da evolução do somatório de (1-C) de duas amostras até encontrarem a envoltória.

Figura 15 – Envoltória de ruptura considerando diferentes modos de carregamento e temperaturas (a); ruptura de amostras ao encontrarem a envoltória de ruptura (b) (adaptado de WANG e KIM, 2017).



De acordo com Wang e Kim (2017), a principal vantagem do critério de ruptura do D^R está na escala aritmética da envoltória de ruptura, reduzindo o efeito de variabilidade nos resultados dos ensaios. Além disso, como a envoltória passa pela origem, reduz os coeficientes da regressão, necessitando apenas da inclinação da envoltória. Isto faz com que menos corpos de prova sejam necessários para caracterizar o critério de ruptura, conforme mostram as correlações obtidas por Wang e Kim (2017) e Wang *et al.* (2018). A inclinação da envoltória (D^R) é calculada usando a equação (7).

$$D^R = \frac{\int_0^{N_f} (1-C) dN}{N_f} \quad (7)$$

A avaliação da ruptura de um pavimento em serviço geralmente é realizada pela porcentagem de área trincada ou densidade de trincas superficiais (NÚÑEZ, 1997; VICTORINO, 2008; MATTOS, 2014; NASCIMENTO, 2015; FRITZEN, 2016; LOPES, 2019). Pinto (1991) utilizou o critério de 20% da área trincada em campo para calibrar modelos de laboratório, enquanto Nascimento (2015) e Fritzen (2016) usaram uma porcentagem de 10% de área trincada para calibrar funções de transferência. No guia para utilização do novo programa de dimensionamento brasileiro – MeDiNa é sugerida uma área trincada admissível de até 30% (FRANCO E MOTTA, 2018).

2.5 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM RELAÇÃO À FADIGA

Os modelos de previsão de vida de fadiga, determinados em laboratório, geralmente seguem dois tipos de abordagem, fenomenológica ou mecânica. Na abordagem fenomenológica os modelos são baseados em fenômenos observáveis, como o número de ciclos até a ruptura e a deformação/tensão imposta no ensaio (curvas de Wöhler), alguns modelos ainda incorporam mais variáveis que influenciam no comportamento, com o objetivo de aumentar a abrangência e confiabilidade. Já a abordagem mecânica leva em consideração parâmetros mecânicos fundamentais do material e um embasamento teórico mais consistente, empregando teorias como a da dissipação de energia ao longo do ensaio, modelagem pela mecânica do dano contínuo viscoelástico e mecânica da fratura.

O critério para originar microtrincas e macrotrincas por fadiga é a magnitude da deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento. Em laboratório, ensaios de fadiga são conduzidos a vários níveis pré-estabelecidos de deformação ou tensão de tração, sendo a relação entre estes parâmetros e o número de ciclos para ruptura (equação (8) para ensaios à deformação controlada e equação (9) para ensaios à tensão controlada) o critério mais tradicional para modelar o comportamento à fadiga. Como o ligante asfáltico tem papel importante na fadiga, e também na rigidez das misturas, a incorporação da rigidez no modelo (equação (10)) tende a torná-lo mais representativo, sendo implantado em métodos de projeto de pavimentos como o do *Pavement-ME Design* da AASHTO. Outro parâmetro que também vem sendo utilizado nos modelos para avaliar o comportamento à fadiga é a energia dissipada (equação (11)), determinada no início do ensaio.

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^b \quad (8)$$

$$N_f = c \times \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^d \quad (9)$$

$$N_f = e \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^f \times \left(\frac{1}{E} \right)^g \quad (10)$$

$$N_f = h \times \left(\frac{1}{DE_t} \right)^i \quad (11)$$

Onde:

N_f - número de ciclos para ruptura à fadiga em laboratório;

ε_t - deformação de tração;

σ_t - tensão de tração;

E - rigidez da mistura asfáltica;

DE – energia dissipada inicial;

$a, b, c, d, e, f, g, h, i$ - constantes de regressão.

As constantes de regressão são calibradas em função do tipo de ensaio e dos resultados obtidos para uma determinada gama de misturas, assim, um modelo calibrado para misturas em uma certa condição não pode ser utilizado indiscriminadamente em qualquer outra condição, necessitando a calibração das constantes para misturas diferentes e também para ensaios diferentes.

Um dos primeiros modelos para previsão do trincamento por fadiga foi desenvolvido pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) e a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) nos Estados Unidos (EUA). O modelo (equação (12)) foi proposto por Finn et al. (1977, apud BABURAMANI, 1999), sendo determinado para ensaios à tensão controlada e calibrado em campo considerando 10% e 45% da área trincada. Este modelo apresentou fator laboratório-campo, conhecido como *shift-factor* (SF), entre 3 a 10 dependendo da espessura da camada de revestimento, tráfego, clima e qualidade construtiva.

$$\log N_f = 14,82 - 3,291 \times \log(\varepsilon_t / 10^{-6}) - 0,854 \times \log(E / 10^3) \quad (12)$$

Já o modelo da Shell Oil foi desenvolvido a partir de ensaios de flexão em vigotas à deformação controlada e, inicialmente considerava a deformação de tração, o módulo de rigidez e teor de asfalto. Na versão mais recente, o teor de asfalto foi eliminado e o módulo de rigidez foi substituído pelo módulo dinâmico da mistura asfáltica, conforme apresentado na equação (13). Este modelo é utilizado no programa de dimensionamento de pavimentos da Shell (*Shell Pavement Design Method – SPDM*).

$$N_f = 0,0685 \times (\varepsilon_t)^{-5,671} \times (E)^{-2,363} \quad (13)$$

Onde:

E – módulo dinâmico da mistura asfáltica (psi).

No Brasil, Preussler *et al.* (1981) foram os pioneiros no desenvolvimento de um modelo para prever o desempenho à fadiga de misturas asfálticas em laboratório. Os ensaios de tração indireta por compressão diametral foram realizados à tensão controlada, determinando-se o número de repetições necessárias para ruptura completa da amostra, utilizando níveis de carregamento de 10% a 40% da resistência à tração estática e temperaturas de 10°C, 25°C, 40°C e 60°C. O modelo proposto pelos autores é apresentado na equação (14).

$$N_f = 2,99 \cdot 10^{-6} \times (1 / \varepsilon_t)^{2,153} \quad (14)$$

Pinto (1991) sugeriu um modelo de previsão de vida de fadiga utilizando ensaios de tração indireta por compressão diametral, à tensão controlada e temperatura de 25°C, baseado na deformação de tração e módulo de resiliência, para seis diferentes misturas asfálticas, conforme equação (15). O autor calibrou seu modelo com observações e análises do comportamento no campo de trechos da rodovia BR-101, conseguindo determinar um fator laboratório-campo de 10^4 , que corresponde a cerca de 20% da área trincada do pavimento a uma temperatura de 54°C. Este fator é empregado até hoje, ficando evidenciado a dificuldade que se tem em determinar essas correlações quando se trata de problemas relacionados à fadiga do pavimento asfáltico.

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \times (1 / \varepsilon_t)^{2,65} \times (1 / M_R)^{-0,033} \quad (15)$$

Onde:

N_{lab} – vida de fadiga em laboratório;

ε_t - deformação de tração;

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

Franco (2007) também desenvolveu modelos de fadiga, considerando deformação de tração e módulo de resiliência, para misturas asfálticas com ligante convencional (equação (16)), misturas com ligantes modificados por polímero (equação (17)) e misturas com asfalto borracha (equação (18)). As misturas foram submetidas a ensaios de tração indireta por compressão diametral, sob tensão controlada. A calibração do modelo em campo não foi possível de ser realizada, sendo utilizado o valor de 10^4 sugerido por Pinto (1991).

$$N_{lab} = 1,904 \cdot 10^{-6} \times (1/\varepsilon_t)^{2,821} \times (1/M_R)^{0,74} \quad (16)$$

$$N_{lab} = 4,455 \cdot 10^{-7} \times (1/\varepsilon_t)^{3,798} \times (1/M_R)^{1,493} \quad (17)$$

$$N_{lab} = 7,265 \cdot 10^{-3} \times (1/\varepsilon_t)^{3,103} \times (1/M_R)^{1,918} \quad (18)$$

Onde:

M_R – módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa).

O Instituto do Asfalto (1981, apud BABURAMANI, 1999) apresenta um modelo de previsão de fadiga para condições de carregamento à tensão controlada de flexão repetida, utilizando fatores como deformação de tração, volume de vazios, teor de asfalto em volume e módulo dinâmico (equação (19)). O modelo foi calibrado com dados obtidos de seções experimentais da AASHO Road Test, obtendo um SF de 18,4 para uma área trincada por fadiga de pelo menos 20% em relação à área total.

$$N_f = 18,4 \times C \times \left(0,00432 \times (\varepsilon_t)^{-3,291} \times |E^*|^{-0,854} \right) \quad (19)$$

Onde:

$C = 10M$;

$$M = 4,84 \times \left[\frac{V_{asf}}{V_{ar} + V_{asf}} - 0,69 \right];$$

N_f – número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

$|E^*|$ - módulo dinâmico da mistura asfáltica (psi);

Vasf – teor de asfalto em volume na mistura asfáltica (%);

Var – volume de vazios da mistura asfáltica (%).

O Guia de Projeto mecanístico-empírico da AASHTO (NCHRP, 2004) utiliza um modelo de previsão de fadiga baseado nos modelos de calibração de Shell Oil e do Instituto do Asfalto (equação (20)). O parâmetro k_1' foi adicionado no modelo, buscando uma correção no dano por fadiga devido ao efeito da espessura da camada de revestimento asfáltico (equação (21)).

$$N_f = 0,00432 \times k_1' \times C \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,9492} \times \left(\frac{1}{|E^*|} \right)^{1,281} \quad (20)$$

$$k_1' = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \times h_{rev})}}} \quad (21)$$

Onde:

h_{rev} – espessura total da camada de revestimento asfáltico.

O Guia de Projeto mecanístico-empírico da AASHTO (NCHRP, 2004) considera, também, funções de transferência para estimar a área trincada em função do dano acumulado, usando a equação (22).

$$AT = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 + C_2 \times \log_{10}(D \times 100))}} \right) \times \left(\frac{1}{60} \right) \quad (22)$$

Onde:

AT– área trincada (%);

D – dano médio (%);

$C_1 = -2 \times C_2$;

$C_2 = -2,40874 - 39,748 \times (1 + h_{rev})^{-2,856}$.

No SHRP A-003 (*Strategic Highway Research Program*) (TAYEBALI *et al.*, 1994) foi desenvolvido um modelo para verificar a fadiga utilizando deformação controlada (equação (23)), considerando os efeitos da rigidez inicial e a relação betume-vazios. O SF aplicado neste

modelo, considerado 10% de área trincada na superfície do pavimento, foi de 10 a 13, conforme espessura da camada de revestimento.

$$N_f = 2,738 \cdot 10^5 \times e^{0,077 \cdot RBV} \times (\varepsilon_0)^{-3,624} \times (S_0)^{-2,72} \quad (23)$$

Onde:

RBV – relação betume-vazios (%);

ε_0 – deformação inicial;

S_0 - rigidez inicial (psi).

A abordagem de energia dissipada (DE) pode ser relacionada com o número de ciclos para falha e o dano inicial e acumulado durante o carregamento repetitivo. Um exemplo de modelo de fadiga empregando esta propriedade foi determinado pelo SHRP A-003 (TAYEBALI et al., 1994), apresentado na equação (24). Diversos autores (SHEN e CARPENTER, 2005; CARPENTER e SHEN, 2006; SHEN *et al.*, 2006; SHEN *et al.*, 2010; SUBHY *et al.* 2017) também mostram que o valor de platô (PV), derivado da taxa de variação da energia dissipada (RDEC), tem uma relação única com o número de ciclos para ruptura e pode ser usado em modelos para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas, conforme o modelo usado no programa FAARFIELD, para dimensionamento de pavimentos de aeroportos, e apresentado na equação (25), considerando ensaios de flexão em quatro pontos sob deformação controlada (GARG *et al.*, 2018).

$$N_f = 2,365 \times e^{0,069 \cdot RBV} \times (DE_i)^{-1,882} \quad (24)$$

$$N_f = 0,4801 \times (PV)^{-0,9007} \quad (25)$$

Onde:

DE_i - energia dissipada inicial;

RBV – relação betume-vazios.

No método de dimensionamento mecânico-empírico utilizado pelo Departamento de Transporte da Califórnia (Caltrans), implantado no programa CalME, o modelo (equação (26)) para prever a vida de fadiga em laboratório foi determinado a partir de ensaios de flexão em viga 4 pontos, com temperatura de 20° C e frequência de 10 Hz. Para avaliar o dano (equação (27)) causado pela fadiga foi utilizada uma abordagem de incremento-recursivo, onde dano é simulado em cada etapa da vida do pavimento e calibrado usando dados de todo o processo de

dano, sendo o material caracterizado em termos do dano para diferentes níveis de tensão/deformação (ULLIDTZ *et al.*, 2010). A densidade de trincamento em campo foi prevista utilizando uma função de transferência, apresentada na equação (28), calibrada para diversas seções experimentais com uso de simuladores de tráfego e seções de rodovias em serviço.

$$MN_p = A \times \left(\frac{\mu\varepsilon}{\mu\varepsilon_{ref}} \right)^\beta \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^{\beta/2} \quad (26)$$

Onde:

MN_p – vida de fadiga (milhões);

$\mu\varepsilon$ – deformação na base da camada de revestimento (microdeformações);

$\mu\varepsilon_{ref}$ – deformação de tração normalizada (200 $\mu\varepsilon$);

E – rigidez da mistura (MPa);

E_{ref} – rigidez normalizada (3000 MPa);

A e β – constantes do material.

$$\omega = \left(\frac{MN}{MN_p} \right)^\alpha \quad (27)$$

Onde:

ω – dano por fadiga;

MN – número de aplicações de carga (milhões);

MN_p - vida de fadiga (milhões);

α – parâmetro do modelo dependente do material.

$$CR = \frac{10m/m^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^\alpha} \quad (28)$$

Onde:

CR – densidade de área trincada (m/m^2);

ω – dano por fadiga;

ω_0 – dano no início do trincamento: $\omega_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_{rev}}{h_{ref}} \right)^\alpha}$;

α e a – parâmetros de calibração;

h_{rev} – espessura do revestimento (mm);

h_{ref} – constante (adotado 250 mm).

Priest (2005) desenvolveu dois modelos para análise do desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos, sendo um para pavimentos com camada delgada de revestimento asfáltico (menor que 12,7 cm) (equação (29)) e o outro para camadas espessas (cerca de 18 a 23 cm) (equação(30)). Para calibração dos modelos foram utilizados dados coletados de trechos experimentais instrumentados com células de pressão, *strain gages*, sensores de temperatura e umidade. A coleta de dados foi realizada em oito seções de pavimento do NCAT, variando as estruturas, por um longo período de tempo.

$$N_f = 0,4875 \times (1/\varepsilon_t)^{3,0312} \times (1/E)^{0,6529} \quad (29)$$

$$N_f = 0,4801 \times (1/\varepsilon_t)^{3,143} \times (1/E)^{0,4834} \quad (30)$$

Wen e Li (2013) analisaram misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante asfáltico em laboratório, usando ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo dinâmico, e em campo por meio de instrumentação, com sensores de deformação e células de pressão, e ensaios acelerados. A partir destas análises os autores propuseram um modelo de previsão de fadiga (equação (31)) utilizando uma combinação entre a energia dissipada durante o ensaio de resistência à tração e o módulo dinâmico das misturas, verificando uma boa relação dos resultados deste modelo com os resultados de campo.

$$N_f = 5,43 \times 10^{13} \times (1/\varepsilon_t)^{3,963} \times (1/E)^{2,149} \times (CSED)^{1,705} \times h_{rev}^{0,30} \quad (31)$$

Onde:

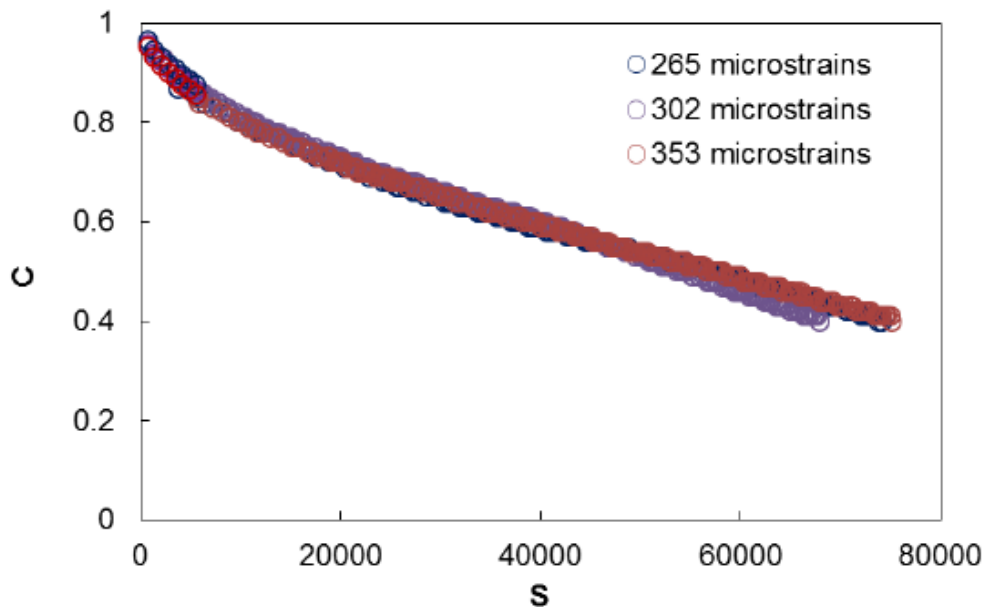
CSED – energia dissipada até a ruptura durante o ensaio de resistência à tração (Pa);

h_{rev} – espessura do revestimento (mm).

Na Carolina do Norte, nos EUA, um grupo de pesquisadores, liderados pelo professor Richard Kim, desenvolveram um modelo constitutivo chamado *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD), que utiliza propriedades fundamentais dos materiais para descrever a evolução do dano (S) e queda da integridade (C) das misturas asfálticas (KIM e LITTLE, 1990; DANIEL e KIM, 2002; CHEHAB *et al.*, 2003; HOU, 2009; UNDERWOOD *et al.*, 2010; LUO, 2012;

NASCIMENTO, 2015; XIE e SHEN, 2015; CAO *et al.*, 2016; RAHBAR-RASTEGAR *et al.*, 2017). O modelo de dano contínuo viscoelástico utiliza características viscoelásticas das misturas asfálticas e tem como principal resultado a curva característica de dano (C – integridade *versus* S – dano) (Figura 16), que é uma propriedade intrínseca do material e independe das condições em que se realizam os ensaios para obtê-la, tais como temperatura, amplitude, modo de controle (tensão ou deformação), entre outras (DANIEL e KIM, 2002; NASCIMENTO *et al.*, 2014). Desta forma, pode-se simular o comportamento do material sob diversas condições, às quais os materiais estarão expostos em campo.

Figura 16 – Exemplo de curvas características de dano (NASCIMENTO *et al.*, 2014)



O modelo VECD originalmente foi desenvolvido para ensaios monotônicos, mas devido a limitações em termos de carga do *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT), equipamento amplamente utilizado nos Estados Unidos para ensaios em misturas asfálticas, e à necessidade de adotar um critério de ruptura (NASCIMENTO *et al.*, 2014), Underwood *et al.* (2010, 2012) adaptaram o modelo para ensaios cíclicos, dando-se o nome de *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD).

O modelo foi desenvolvido com base em três principais conceitos: (1) no princípio da correspondência elástico-viscoelástico, baseado na pseudo-deformação; (2) na teoria do trabalho potencial de Schapery, baseada na mecânica do dano contínuo; (3) e na superposição tempo-temperatura com dano acumulado (KIM e LITTLE, 1990; NASCIMENTO, 2015).

O princípio da correspondência elástico-viscoelástico, proposto por Schapery (1984), baseia-se na utilização de pseudo-variáveis, pseudo-deformação ou pseudo-tensão, em substituição às deformações ou tensões impostas ao material. Estes termos não possuem significado físico, mas permitem que problemas viscoelásticos, mais complexos, sejam resolvidos por soluções elásticas, mais simples. A pseudo-deformação (ε^R) apresenta um valor similar à deformação, porém não inclui os efeitos do tempo. Para o cálculo da pseudo-deformação utiliza-se a equação (32), considerando a condição de carregamento transiente empregado no modelo VECD, e a equação (33) para a condição de carregamento estável utilizado no modelo S-VECD.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (32)$$

$$\varepsilon_{0,ta}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (33)$$

Onde:

ε^R – pseudo-deformação;

ε – deformação medida;

E_R - módulo de referência (normalmente adota-se E_R igual a 1);

ξ – tempo reduzido;

$E(\xi)$ – módulo de relaxação viscoelástico do material;

$\varepsilon_{0,ta}^R$ - amplitude da pseudo-deformação na condição de tração;

β - fator que quantifica a duração da carga de tração em um determinado ciclo (1 para tração total, 0 para carga totalmente revertida, e -1 para compressão total);

$\varepsilon_{0,pp}$ - amplitude de deformação total (pico a pico);

$|E^*|_{LVE}$ - módulo dinâmico viscoelástico linear do material.

A pseudo-rigidez (C), também chamada de integridade do material (equação (34)), e o dano (S), são os dois principais parâmetros do modelo. Para determinar a integridade (C) é necessário calcular a relação entre o módulo dinâmico do corpo de prova a ser submetido ao ensaio de fadiga, determinado no ensaio chamado de *fingerprint*, com o módulo dinâmico do material para uma dada temperatura e frequência obtido no ensaio de caracterização viscoelástica linear ($|E^*|_{LVE}$). Esta relação é apresentada na equação (35), sendo chamada de *Dynamic Modulus Ratio* (DMR), e o valor obtido é multiplicado ao valor da pseudo-deformação na equação (34),

buscando normalizar os resultados quanto à variabilidade entre os corpos de prova ensaiados (UNDERWOOD *et al.*, 2012). De acordo com Nascimento (2015) os valores típicos de DMR encontram-se entre 1,1 e 0,9.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (34)$$

$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (35)$$

Onde:

σ - tensão;

ε^R - pseudo-deformação.

$|E^*|_{fingerprint}$ - módulo dinâmico obtido no ensaio de *fingerprint*, o qual é realizado em cada corpo de prova antes do ensaio cíclico de fadiga;

$|E^*|_{LVE}$ - módulo dinâmico viscoelástico linear do material.

Em relação a determinação do dano (S) para ensaios monotônicos e para o primeiro ciclo dos ensaios cíclicos o cálculo se dá pela equação (36), enquanto que para os demais ciclos o cálculo é realizado usando a equação (37).

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (36)$$

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)_i^2 \Delta C_i^* \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi_p)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} (K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (37)$$

Onde:

α - taxa de evolução do dano, definida como a máxima inclinação da curva módulo de relaxação em função do tempo reduzido, em escala log-log;

C^* - pseudo-rigidez baseada no carregamento cíclico;

$\Delta \xi$ - incremento de tempo reduzido;

$\Delta \xi_p$ - intervalo de tempo reduzido do pulso de carga;

K_1 - fator de ajuste considerando que a pseudo-deformação não é constante ao longo do ciclo.

De acordo com HOU (2009) o fator de ajuste K_1 é dependente do histórico de tempo de carregamento ($f(\xi)$), e considerando a premissa de que o crescimento do dano em um único ciclo é relativamente pequeno, o fator K_1 pode ser determinado pela equação (38).

$$K_1 = \frac{1}{\Delta \xi} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (f(\xi))^{2\alpha} d\xi \quad (38)$$

Onde:

ξ_i e ξ_f – tempo reduzido de início e de fim da tensão de tração (de dano) para um dado ciclo, respectivamente.

As curvas características de dano podem ser ajustadas por modelos matemáticos utilizando funções potência (equações (39)) ou exponencial (equação (40)), e segundo Underwood *et al.* (2012) a opção por qual função usar dependerá da mistura que está sendo avaliada, verificando a função que melhor represente o material. Assim, determinando-se a curva C versus S para um dado material é possível simular a curva para outras condições de ensaio empregando a equação (41).

$$C(S) = 1 - C_{11} S^{C_{12}} \quad (39)$$

$$C(S) = e^{-aS^b} \quad (40)$$

$$S_{i+1} = S_i + \left(\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 C_{11} C_{12} S^{C_{12}-1} \right)^\alpha K_1 (d\xi) \quad (41)$$

Onde:

C_{11} e C_{12} – constante do ajuste para a função potência;

a e b – constante do ajuste para a função exponencial.

A teoria do trabalho potencial desenvolvida por Schapery (1990), considerada o segundo pilar sobre o qual o modelo de dano contínuo se baseia, foi elaborada para materiais elásticos com alterações estruturais, como danos crescentes. Esta teoria é baseada na termodinâmica dos processos irreversíveis, separando a parcela de dano correspondente à parte viscosa do material e, assim, permitindo a caracterização do material por uma lei de evolução do dano.

O concreto asfáltico no estado viscoelástico linear, não danificado, é considerado um material termoreologicamente simples (KIM e LEE, 1995), podendo ser aplicado o princípio da superposição tempo-temperatura (t-T). De acordo com Chehab *et al.* (2002) este princípio é baseado na condição que o mesmo valor de módulo pode ser obtido em temperaturas baixas com tempos de carregamentos longos (frequências baixas) e em temperaturas altas com tempos de carregamentos curtos (frequências altas). Assim, o efeito do tempo e da temperatura podem ser combinados em um parâmetro único, transladando horizontalmente as curvas de módulo dinâmico obtidas em diferentes temperaturas e frequências, para uma dada temperatura de referência (T_R), originando a chamada curva mestra.

Para transladar as curvas isotermas de módulo dinâmico, representação gráfica do módulo em função da frequência aplicada em cada temperatura de ensaio, multiplica-se os valores das frequências por uma constante chamada de fator de deslocamento ou *shift-factor* (a_T), buscando o melhor ajuste possível da curva mestra. As frequências de ensaio transladadas são chamadas de frequências reduzidas (f_R). Conforme consta na norma AASHTO TP-107 (2014) e na norma DNIT 416 (2019) a curva mestra resultante pode ser ajustada por um modelo sigmoidal, apresentado na equação (42), e os fatores de deslocamento em função da temperatura podem ser ajustados por um polinômio de segunda ordem, conforme apresentado na equação (43)

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_R)}} \quad (42)$$

$$\log(a_T) = a_1(T^2 - T_R^2) + a_2(T - T_R) \quad (43)$$

Onde:

$|E^*|$ – módulo dinâmico;

δ , α , β e γ – coeficientes de ajuste;

f_R – frequência reduzida;

a_T – fator de deslocamento;

T – temperatura do ensaio (°C);

T_R – temperatura de referência, para a qual será feita a translação (°C);

a_1 e a_2 – coeficientes de ajuste.

Para aplicação no modelo S-VECD os resultados de módulo dinâmico são interconvertidos em módulo de relaxação, utilizado nos cálculos das pseudo-deformações, pela teoria da viscoelasticidade e de técnicas matemáticas de interconversão descritas por Schapery e Park (1999). O processo consiste em expressar o módulo de armazenamento (E'), obtido experimentalmente, em função da frequência angular (ω_R) conforme a equação (44), podendo também ser representado na forma de uma série de Prony apresentada na equação (45). Esta série permite descrever o comportamento viscoelástico linear dos materiais, e os mesmos coeficientes ρ_i e E_i determinados na equação (45) são então utilizados na série de Prony da equação (46) para determinar o módulo de relaxação ($E(t)$) no domínio tempo.

$$E'(\omega_r) = |E^*(\omega_r)| \cos(\varphi(\omega_r)) \quad (44)$$

$$E'(\omega_r) = E_\infty + \sum_{i=1}^m \frac{\omega_r^2 p_i^2 E_i}{\omega_r^2 p_i^2 + 1} \quad (45)$$

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^m E_i e^{-t/p_i} \quad (46)$$

Onde:

E' – módulo de armazenamento;

E^* – módulo dinâmico;

ω_r – frequência angular reduzida;

φ – ângulo de fase;

E_∞ – módulo elástico;

E_i – módulo do elemento de Maxwell i ;

p_i – tempo de relaxação;

$E(t)$ – módulo de relaxação.

Os dados de módulo de armazenamento também são ajustados por uma função sigmoideal antes de serem expressos na forma de série de Prony. De acordo com Kim (2009), este procedimento busca um melhor ajuste da série de Prony do módulo de relaxação. A função sigmoideal para o E' é apresentada na equação (47).

$$\log(E') = k + \frac{\log(\max E') - k}{1 + e^{\delta + \gamma \log(f_R)}} \quad (47)$$

Onde:

$\max E'$ – valor máximo que E' pode assumir, baseado em características da mistura, como vazios do agregado mineral e relação betume-vazios;

k , δ e γ – coeficientes de ajuste.

A norma AASHTO TP-107 (2014) apresenta o detalhamento dos procedimentos de ensaios e etapas de cálculo para caracterização da curva de dano de um determinado material. A descrição dos equacionamentos utilizados no desenvolvimento do modelo S-VECD, também, se encontra nos trabalhos de Kim *et al.* (1997), Daniel e Kim (2002), Kim *et al.* (2002), Hou (2009), Underwood e Kim (2009), Underwood *et al.* (2010, 2012) e Nascimento (2015).

Nascimento (2016) desenvolveu duas equações, considerando tanto o critério de ruptura do G^R (equação(48)) quanto o D^R (equação (49)), para prever N_f utilizando os parâmetros obtidos na metodologia S-VECD (equação (50) a (54)).

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left(\frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (48)$$

$$N_f = \left[\left(\frac{D^R}{\delta} \right) \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right) \right]^{\frac{p}{C_{12}}} \left[\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \right] \quad (49)$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 C_{11} \left(\frac{\left(p (C_{11} C_{12})^\alpha (\varepsilon_{0,ta}^R)^{2\alpha} k_1 \right)^{\left(\frac{C_{12}}{p} \right)}}{f_R 2^\alpha} \right) \quad (50)$$

$$\varepsilon_{0,ta}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (51)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (52)$$

$$G^R = Y (N_f)^\Delta \quad (53)$$

$$D^R = \frac{\sum (1-C)}{N_f} \quad (54)$$

As variáveis utilizadas nas equações podem ser obtidas por uma rotina de cálculo utilizada na planilha eletrônica FlexMAT, desenvolvida pelo Prof. Richard Kim da *North Carolina State University* (NCSU), onde:

N_f – número de ciclos até a falha;

$\varepsilon_{0,ta}^R$ - amplitude da pseudo-deformação na condição de tração;

C_{11} e C_{12} – coeficientes da curva CxS média das amostras;

C – integridade do material ou pseudo-rigidez;

S – parâmetro de dano;

α – taxa de evolução do dano;

k_1 - fator de ajuste considerando que a pseudo-deformação não é constante ao longo do ciclo.

f_R – frequência reduzida;

E_R - módulo de referência (normalmente adota-se E_R igual a 1);

β - fator que quantifica a duração da carga de tração em um determinado ciclo (1 para tração total, 0 para carga totalmente revertida, e -1 para compressão total);

$\varepsilon_{0,pp}$ - amplitude de deformação pico a pico;

$|E^*|_{LVE}$ - módulo dinâmico viscoelástico linear do material;

G^R – taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio;

Y e Δ – coeficientes de ajuste da equação do G^R .

D^R – redução média da pseudo-rigidez ao longo do ensaio até o momento da ruptura.

Wang (2019) propôs o uso de um parâmetro, S_{app} (equação (55)), como um indicativo de capacidade de dano usando o critério de ruptura do D^R . Este parâmetro considera os efeitos da rigidez e tenacidade do material na resistência à fadiga, assim, valores mais altos de S_{app} indicam maior resistência à fadiga, sendo considerado adequado um S_{app} acima de 8. O autor validou este parâmetro para 105 misturas asfálticas, com diferentes tipos de ligantes e materiais granulares empregados nos Estados Unidos, e obteve resultados de desempenho à fadiga condizentes com observações em campo realizadas nas pistas experimentais do NCAT, apresentando valores limites de S_{app} em função do tráfego (número equivalente de eixo-padrão), conforme apresentado na Tabela 1.

$$S_{app} = \frac{1}{1000} \frac{a_T^{\frac{1}{\alpha+1}} \left(\frac{D^R}{C_{11}} \right)^{\frac{1}{C_{12}}}}{\left(\frac{|E^*|}{10^6} \right)^{\frac{\alpha}{4}}} \quad (55)$$

Onde:

$|E^*|$ - módulo dinâmico do material para frequência de 10 Hz na temperatura de referência (kPa).

Tabela 1 – Valores limites recomendados para o parâmetro S_{app} à diferentes níveis de tráfego (adaptado de WANG, 2019).

Tráfego (milhões de eixo-padrão - AASHTO)	Limites S_{app}	Nível do tráfego
Inferior a 10	$S_{app} > 8$	Padrão
Entre 10 e 30	$S_{app} > 24$	Pesado
Acima de 30	$S_{app} > 30$	Muito pesado
Acima de 30 e baixa velocidade	$S_{app} > 36$	Extremamente pesado

Sabe-se que o número de passadas de um carregamento de eixo-padrão requerido para causar um trincamento por fadiga em campo é maior que o número de ciclos para falha em um ensaio de fadiga em laboratório, sendo necessário aplicar fatores de correlação laboratório-campo (*shift-factor* - SF) ou utilizar funções de transferência nas relações de previsão de vida de fadiga para obter o desempenho de campo.

Nos modelos de previsão de fadiga que são atribuídos *shift-factor* (equação (56)), estes podem variar de 10 a 10.000 dependendo das condições empregadas em laboratório e do nível de trincamento tolerado em campo (PINTO, 1991; BABURAMANI, 1999; MATEOS *et al.*, 2011).

$$N_{campo} = N_{laboratório} \times SF \quad (56)$$

Onde:

N_{campo} - número de aplicações de carga para causar 10% a 30% de trincamento por fadiga na trilha de roda;

$N_{laboratório}$ - número de ciclos para falha de fadiga obtido em ensaios de laboratório; SF (*shift-factor*) - patamar de valor que depende da espessura da camada de revestimento, nível de carga por eixo, clima e qualidade de construção da estrutura do pavimento.

As funções de transferência (equação (57)) são modelos calibrados que permitem correlacionar o trincamento observado em campo, usando a área trincada do pavimento, com o dano causado no material devido as deformações e tensões impostas pela repetição de cargas. O dano é acumulado por período de análise usando a lei de Miner (equação (58)).

$$AT = C1 \times \left(\frac{N}{N_f} \right)^{C2} \quad (57)$$

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{N_i}{N_f} \quad (58)$$

Onde:

AT– percentagem de área trincada;

C1 e C2 – constantes de ajuste;

D – dano acumulado total;

j – número total de sub-períodos da análise;

N_i – número de passagens de cada eixo do tráfego para o sub-período i;

N_f – número de repetições de carga necessários para atingir a ruptura, para a condição de clima e carregamento do sub-período i, estimado pelo modelo de desempenho de fadiga.

Nascimento (2015) calibrou uma função de transferência utilizando o modelo simplificado de dano contínuo viscoelástico (S-VECD), correlacionando o dano obtido em laboratório, empregando ensaios de fadiga por tração direta, e área trincada observada em pistas experimentais do “Projeto Fundação”, utilizando 27 pistas experimentais com estruturas e materiais diferentes, buscando simular estruturas típicas brasileiras. O modelo também foi validado para 17 pistas experimentais pertencentes a Rede Temática do Asfalto, localizados no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

A equação (59) apresenta a função de transferência obtida por Nascimento (2015), na qual é usado o dano médio reduzido (equação (60)) calculado para uma percentagem de 10% de área trincada. Esse percentual de área trincada foi definido para verificar a correlação entre o nível de dano simulado no início do trincamento e o índice da taxa de crescimento do dano. O dano médio reduzido considera um fator de deslocamento, chamado de Função “S”, baseado em um tempo necessário para atingir um dano de 35% (equação (61)) ou na taxa secante entre o 12° e 1° mês, em termos de dano médio por mês (equação (62)). Os coeficientes de ajustes obtidos para as equações determinadas por Nascimento (2015) são apresentados na Tabela 2.

$$CA = C_1 \times \left(\frac{N}{N_f} red \right)^{C_2} \quad (59)$$

$$\frac{N}{N_f} red = \frac{N}{N_f} * \text{Função "S"} \quad (60)$$

$$S_{T_{0,35}} = A * T_{0,35} + B \quad (61)$$

$$S_{R_{12-1}} = \beta_1 (R_{12-1})^2 + \beta_2 (R_{12-1}) + \beta_3 \quad (62)$$

Onde:

CA – percentagem de área trincada prevista;

N/N_f red - dano médio reduzido;

C₁ e C₂ – coeficientes de ajuste;

S_{T_{0,35}} – Função “S” considerando T_{0,35};

T_{0,35} – período em meses, nas simulações, para atingir 35% de dano;

A e B – coeficientes de ajuste;

S_{R₁₂₋₁} – Função “S” considerando R₁₂₋₁;

R₁₂₋₁ - taxa secante de dano médio entre os meses 12 e 1;

β₁, β₂ e β₃ – coeficientes de ajuste.

Tabela 2 – Coeficientes de ajustes obtidos por Nascimento (2015).

Função		Coeficientes	
Função "S"	S _{T_{0,35}}	A	0,00827
		B	0,63524
	S _{R₁₂₋₁}	β ₁	836,913
		β ₂	-50,496
		β ₃	1,399
Função de transferência	S _{T_{0,35}}	C ₁	7272,68
		C ₂	8,6629
	S _{R₁₂₋₁}	C ₁	3700,98
		C ₂	7,4006

Fritzen (2016) calibrou uma função de transferência, a qual está sendo utilizada no programa MeDiNa proposto para ser o novo método de dimensionamento de pavimentos brasileiro, considerando 6 misturas asfálticas utilizadas em 45 segmentos localizados nas principais vias da Cidade Universitária na Universidade Federal do Rio de Janeiro, também pertencentes ao

“Projeto Fundão”. A calibração desta função foi baseada em ensaios de fadiga de tração indireta por compressão diametral, sob tensão controlada e temperatura de 25°C, e na análise dos segmentos experimentais a partir da observação da porcentagem de área trincada. Também, foi realizada a validação da função utilizando segmentos experimentais de diferentes regiões do país que fazem parte da Rede Temática de Asfalto.

A função de transferência (equação (63)) proposta por Fritzen (2016), também, utilizou o dano médio reduzido (equação (64)), contudo o valor encontrado de dano médio para uma porcentagem de 10% de área trincada foi de 0,8. Assim, o fator de deslocamento de dano considerado (Função “S”) foi baseado em um tempo necessário para atingir um dano de 80% (equação (65)). Os coeficientes de ajustes obtidos para as equações determinadas por Fritzen (2016) são apresentados na Tabela 3.

$$AT_{prevista} = C_1 \times \left(\frac{N}{N_f} red \right)^{C_2} \quad (63)$$

$$\frac{N}{N_f} red = \frac{N}{N_f} * Função "S" \quad (64)$$

$$S_{T_{0,80}} = A * (T_{0,80})^B \quad (65)$$

Onde:

$AT_{prevista}$ – porcentagem de área trincada;

C_1 e C_2 – coeficientes de ajuste; sendo $C_1 = 1,5 * 10^5$ e $C_2 = 40,61338$;

$S_{T_{0,80}}$ – Função “S” considerando $T_{0,80}$;

$T_{0,80}$ – período em meses, nas simulações, para que o dano atinja 80%.

Tabela 3 – Coeficientes de ajustes obtidos por Fritzen (2016).

Função	Coeficientes	
Função "S"	A	0,8756
	B	0,0307
Função de transferência	C_1	$1,5 \times 10^5$
	C_2	40,61338

Os modelos de previsão de desempenho, assim como os fatores laboratório-campo ou funções de transferência, são desenvolvidos sob diferentes métodos, condições de ensaio e projetos de

mistura, dessa forma, necessitam de investigação das condições de carregamento (tráfego) e realização de extensa validação de campo.

2.6 MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO E USINA

Em diferentes países, agências e a indústria vêm buscando avançar em relação a projetos baseados no desempenho para avaliar as misturas asfálticas produzidas em laboratório, menor escala, antes de passar para a produção em usina, larga escala. Alguns autores (JOHNSON *et al.*, 2010; MOGAWER *et al.*, 2012; XIAO *et al.*, 2014; MOHAMMAD *et al.*, 2006; RAHBAR-RASTEGAR e DANIEL, 2016; OSHONE *et al.*, 2018) mostraram a ausência de uma tendência consistente entre as misturas produzidas em laboratório e na usina. Isto pode ocorrer devido ao envelhecimento da mistura à medida que passa pela usina e durante o armazenamento e transporte. Além disso, durante o processo de compactação em campo a mistura reage com o oxigênio do ar, tornando-se mais rígida e perdendo voláteis nas altas temperaturas. O envelhecimento continua a uma taxa reduzida ao longo da vida útil do pavimento, porém em climas quentes ou durante os meses de verão, quando as temperaturas são maiores, o envelhecimento pode ocorrer de forma mais acelerada.

Também foi verificado que reaquecer misturas produzidas em usina no laboratório, para produção de amostras, afeta as propriedades do material devido às suas características (MOGAWER *et al.*, 2012). Assim, torna-se importante considerar as mudanças nas propriedades da mistura ao prepará-la no laboratório. Oshone *et al.* (2018) relatam que uma maneira de reduzir estas diferenças é empregando um condicionamento de curto prazo, de forma a simular, no laboratório, o envelhecimento que ocorre durante a usinagem, transporte e a execução do serviço. Neste sentido, existem distintos protocolos de laboratório que buscam simular estas condições.

No protocolo da norma AASHTO R-30 (2015) para mistura de projeto sugere-se o envelhecimento a curto prazo em estufa por duas horas na temperatura de compactação, enquanto para produção de amostras para ensaios mecânicos, com mistura produzida em laboratório, sugere-se o envelhecimento a curto prazo da mistura, antes da compactação, em estufa por um período de quatro horas na temperatura de 135 °C.

De acordo com norma DNIT 178 (2018), as misturas preparadas em laboratório e usadas para produção de amostras destinadas a ensaios mecânicos devem ser submetidas à compactação depois de duas horas de envelhecimento em estufa na temperatura de compactação. Enquanto misturas produzidas em usina e reaquecidas em laboratório, para produção de amostras, devem permanecer em estufa na temperatura de compactação apenas o tempo necessário para atingir tal temperatura.

Oshone *et al.* (2018) verificaram o comportamento mecânico de amostras compactadas com mistura produzida em laboratório, com um envelhecimento de quatro horas em estufa na temperatura de 135°C, mistura produzida em laboratório e reaquecida, também usando quatro horas de envelhecimento em estufa à 135°C, e mistura produzida em usina e reaquecida em laboratório. Os autores mostraram que as amostras compactadas com mistura produzida em laboratório e reaquecida, considerando o envelhecimento da mistura em estufa de quatro horas à 135°C, apresentaram desempenho quanto à fadiga semelhante as amostras compactadas com mistura produzida em usina e reaquecida em laboratório.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de adotar um protocolo de envelhecimento a curto prazo para misturas produzidas em laboratório, com o intuito de aproximar as características destas misturas com misturas produzidas em usina, uma vez que o envelhecimento exerce um papel muito importante no desempenho mecânico de misturas asfálticas.

2.7 INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO PARA AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS DO PAVIMENTO

Pistas experimentais vêm sendo implantadas ao longo dos anos com o objetivo de avaliar o desempenho das diversas camadas que compõem o pavimento em serviço, utilizando ensaios acelerados, com emprego de simuladores de tráfego, ou trechos implantados em rodovias sob ação do tráfego real. Estas pistas são monitoradas durante sua vida útil por observações visuais, ensaios de campo e/ou instrumentação com sensores eletrônicos, de onde pode-se obter respostas estruturais de maneira mais acurada.

Para o dimensionamento de pavimentos novos e em projetos de restaurações é necessário compreender o comportamento dos pavimentos sob diferentes condições de carga e variações ambientais. Tendo em vista as incertezas incorporadas nos modelos de análise de desempenho determinados em laboratório é necessário simular de forma mais precisa o sistema da estrutura

do pavimento e o padrão de carregamento, que pode ser verificado por medidas de deformação, tensão e temperatura utilizando sistemas de instrumentação nas camadas do pavimento. Tais medidas *in situ* ajudam a compreender melhor as respostas do pavimento ao carregamento e às condições do meio ambiente, permitindo identificar as principais diferenças entre os ensaios de laboratório e o desempenho real no campo (AL-QADI e NASSAR, 2003).

A instrumentação utilizada nas camadas do pavimento pode contemplar células de pressão, utilizadas para leitura das tensões; extensômetros elétricos, conhecidos como *strain gages*, os quais determinam as deformações através da variação da resistência elétrica em um filamento metálico; e sensores para medição da temperatura, como os termopares. O processo de instalação dos sensores pode ser realizado durante ou após a construção do pavimento e, os locais mais usuais para instalação são na parte inferior da camada de revestimento asfáltico e/ou no topo do subleito, local de maior interesse para as principais patologias – fadiga da camada asfáltica e deformação permanente do subleito. A maioria desses sensores foram adaptados para o uso na pavimentação e, por mais que já tenham sido utilizados em diversas pesquisas, ainda se tem dificuldades de encontrar e especificar os mesmos para esta finalidade, bem como coletar de forma adequada os dados do pavimento em campo.

A instrumentação de pavimentos é uma alternativa utilizada em diversos países, apresentando resultados satisfatórios que muitas vezes contribuem para a validação dos métodos de dimensionamento de pavimentos (VAN DEUSEN *et al.*, 1992; PRIEST e TIMM, 2006; MATEOS *et al.*, 2011).

O Departamento de Transportes do Estado de Minnesota (Mn/DOT) desenvolveu um projeto denominado de *Minnesota Road Research Project* (Mn/Road) para monitorar o desempenho de diferentes estruturas de pavimento em um trecho experimental com 40 seções de teste, localizado em Ostego, Minnesota, construído entre 1990 e 1993 e liberado ao tráfego em 1994. O sistema de instrumentação utilizado contava com aproximadamente 8.500 sensores para coleta de dados referente às repostas do pavimento às cargas do tráfego, com uso de *strain gages* e células de pressão; e às condições ambientais, que são monitoradas pelas leituras de temperatura e umidade na camada do pavimento (JOHNSON *et al.*, 2009). Os dados foram coletados em campo e enviados para o laboratório do Mn/DOT para verificação e armazenamento em um banco de dados, e a coleta e processamento dos dados foram completamente automatizados (ALVAREZ e THOMPSON, 1998). Com os resultados obtidos em campo foi possível avaliar os métodos de dimensionamento existentes e, também,

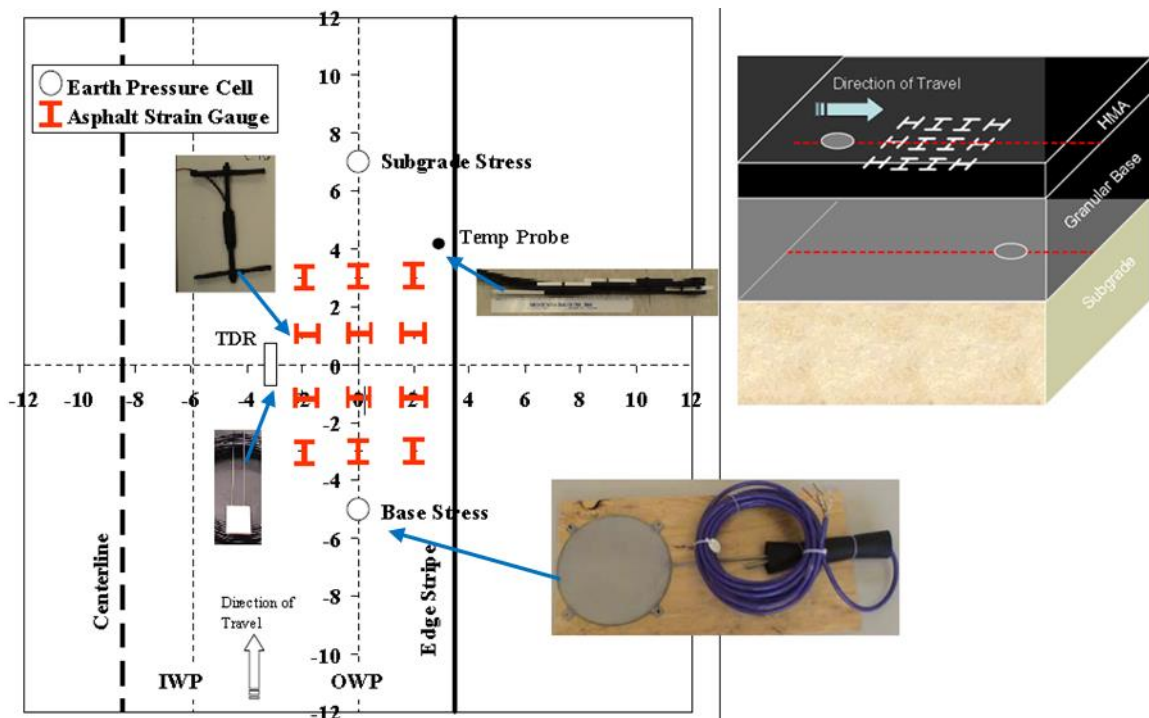
desenvolver novos métodos considerando as respostas do pavimento a médio e longo prazo (VAN DEUSEN *et al.*, 1992).

O Departamento de Transportes da Virgínia (VDOT) implantou em 1998 uma pista experimental – *Virginia Smart Road* – com doze seções de teste, variando a estrutura do pavimento, também com o intuito de acompanhar o desempenho destes pavimentos quando submetidos a diferentes condições ambientais e de tráfego. Foram instaladas células de pressão nas camadas asfálticas e granulares, *strain gages* nas camadas de concreto asfáltico, termopares para medições de temperatura, sondas de reflectometria para verificar o teor de umidade nas camadas de base e sondas de resistividade para medir a penetração de gelo. Uma descrição do sistema de instrumentação pode ser encontrada no trabalho de Loulizi *et al.* (2001). Toda a instrumentação foi realizada durante a construção das seções, constatando-se uma falha média dos sensores durante a construção em torno de 4,6% e, após o período de um ano de monitoramento a falha média verificada foi inferior a 13%. Os dados referentes às medidas dinâmicas (pressão e deformação) no pavimento foram coletados semanalmente, enquanto os dados de temperatura foram coletados a cada 15 minutos e os dados de umidade a cada hora. Os resultados de campo serviram para embasar uma análise sobre a distribuição do carregamento e as respostas de deformação no pavimento quando submetido a diferentes velocidades, veículos e cargas. Verificou-se que as baixas velocidades afetam prejudicialmente o comportamento de pavimentos asfálticos devido ao maior tempo de carregamento, fazendo com que as deformações horizontais nas camadas de concreto asfáltico aumentem e, ainda, que a flexão alternada entre compressão e tração em pontos por onde passam os veículos agravem o problema de fadiga (LOULIZI *et al.*, 2001).

No projeto *NCAT Test Track* desenvolvido pelo Centro Nacional para Tecnologia de Asfalto (NCAT) na Universidade de Auburn, em Alabama nos Estados Unidos, foi construída em 2004 uma pista experimental delimitada em oito seções com diferentes espessuras e ligantes asfálticos, buscando validar modelos mecanístico-empíricos e avaliar os fatores que podem influenciar no desempenho estrutural dos pavimentos. O sistema de instrumentação foi composto por células de pressão instaladas no topo da camada de base (capacidade de 250 kPa) e no topo do subleito (capacidade de 100 kPa), sensores de deformação instalados na parte inferior da camada de revestimento asfáltico, sensores de temperatura em diversos pontos da estrutura e sensores de umidade inseridos no subleito (Figura 17). Todas as células de pressão instaladas funcionaram após a construção, bem como 85% dos sensores de deformação. Os

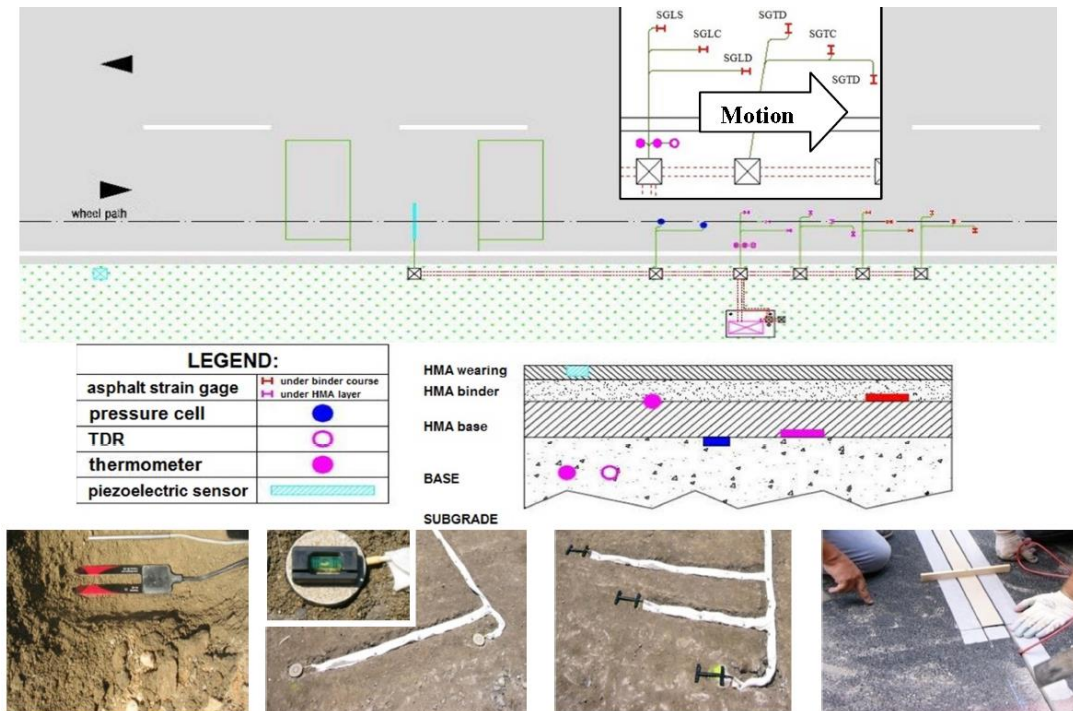
dados foram coletados por meio de um sistema de aquisição e utilizados na calibração da função de transferência adotada no método mecanístico-empírico do Departamento de Transportes do Alabama (ALDOT), para previsão do desempenho à fadiga de concretos asfálticos (TIMM *et al.*, 2004; PRIEST e TIMM, 2006).

Figura 17 – Detalhes da instrumentação utilizada no projeto do NCAT (TIMM *et al.*, 2004).



O projeto de pesquisa intitulado Leopoldo, desenvolvido em Toscana na Itália, analisou um trecho experimental em serviço com seis seções instrumentadas com células de pressão no topo da base granular; *strain gages* na fibra inferior das camadas de base e camada de ligação, ambas em concreto asfáltico; termômetros nas camadas de base granular, base e camada de ligação em CA; *time domain reflectometers* (TDRs) na camada de base granular para verificação da umidade; e um sistema *Weight in Motion* (WIM). Na Figura 18 são apresentados os detalhes do sistema de instrumentação utilizado, salientando que não ocorreu nenhuma falha dos sensores após a construção, devido a diversos cuidados que foram considerados durante o processo de instalação, sendo detalhados no trabalho de Leandri *et al.* (2013). Foram monitoradas as repostas do pavimento, as condições ambientais, o espectro de carga e o desempenho do pavimento ao longo do tempo. Os dados obtidos em campo foram analisados e comparados com modelos teóricos, apresentando uma boa concordância (LEANDRI *et al.*, 2013).

Figura 18 – Sistemas de instrumentação do projeto de pesquisa Leopoldo (LEANDRI *et al.*, 2013).



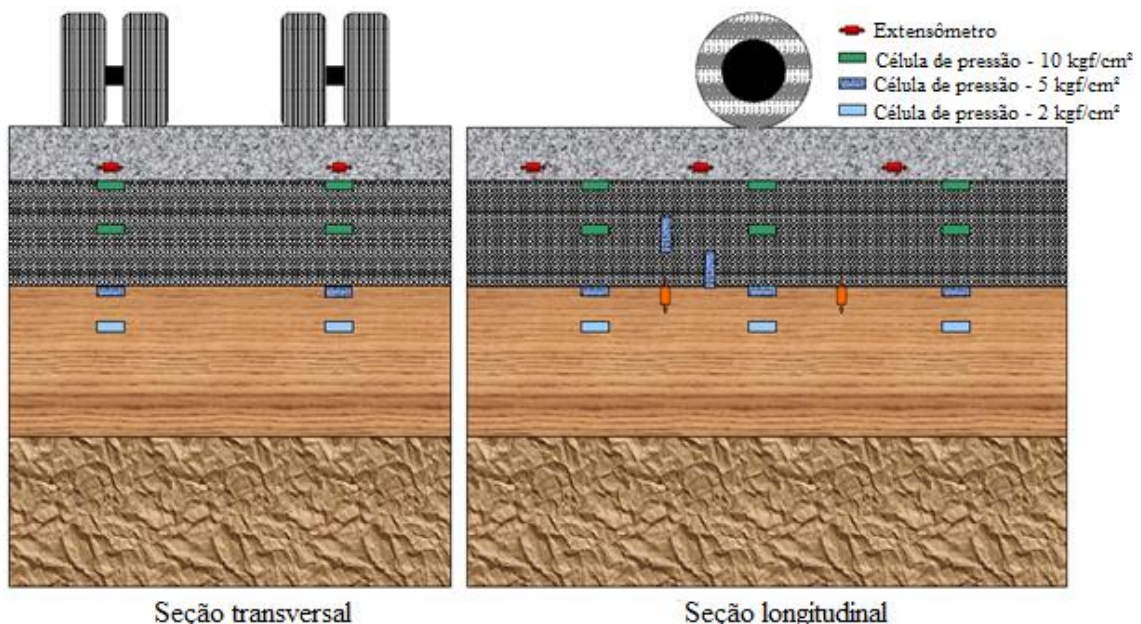
Silva e Motta (1999), realizaram uma abordagem sobre as principais experiências em instrumentação de pavimentos em campo realizadas no Brasil, destacando que a primeira instrumentação foi realizada em 1976, buscando analisar misturas pozolânicas em um trecho experimental da BR-101, na localidade de Nova Brasília em Imbituba, Santa Catarina. O estudo contemplou a instrumentação de duas seções do pavimento, com espessuras diferentes de base de mistura pozolânica. Segundo Pinto *et al.* (1977 *apud* SILVA e MOTTA, 1999), o sistema de instrumentação foi composto por 12 células de pressão total, que funcionaram bem durante cerca de 4 meses; 19 sensores de deformação, que não funcionaram; e 24 termopares para medição da temperatura, os quais apresentaram um bom funcionamento durante todo o período de acompanhamento do trecho (cerca de 3 anos).

Em 1998, foi realizada uma instrumentação na Pista Circular Experimental do IPR/DNER através de um convênio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), para estudar o recapeamento de pavimentos asfálticos com concreto - *whitetopping* (WT). Nesta pesquisa, foram utilizados 6 extensômetros, instalados a cerca de 2 cm acima da camada de concreto asfáltico ficando imersos no concreto, o mais próximo possível da fibra inferior do recapeamento; e 2 células de carga para medir os esforços que a placa de concreto exerceu sobre a superfície do CA.

De acordo Silva e Motta (1999), os 6 extensômetros instalados na camada de WT resistiram satisfatoriamente aos esforços na fase de construção e as solicitações impostas pelo carregamento e fatores ambientais, porém o período de registro das medições foi de aproximadamente 3 meses, período considerado curto para se concluir sobre a vida útil dos sensores. Contudo, com os dados obtidos dos extensômetros foi possível calcular as tensões de tração na parte inferior do WT e, também, foram realizadas simulações numéricas apresentando resultados satisfatórios quando comparados com os dados coletados.

Gonçalves (2002) realizou a instrumentação de seis pistas experimentais localizadas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Lapav-UFRGS), das quais duas foram submetidas a ensaios acelerados utilizando o simulador linear de tráfego da UFRGS/DAER. As pistas foram instrumentadas com células de pressão e extensômetros (Figura 19) encapsulados em resina epóxi com duas configurações, roseta a 45° e H-gage. Estas configurações foram utilizadas devido a necessidade de ancoragem do sensor no interior da mistura asfáltica e para assegurar a sua horizontalidade.

Figura 19 – Pista instrumentada, com a distribuição e posicionamento dos sensores utilizados (GONÇALVES, 2002).



Gonçalves (2002) projetou e desenvolveu um sistema de aquisição de dados para ensaios de laboratório e campo, o qual permitiu a leitura dos *strain gages* e células de pressão, instalados no pavimento, de maneira operacional e confiável. As tensões e deformações determinadas a

partir dos dados coletados em campo, apresentaram magnitudes compatíveis com os valores obtidos na aplicação de modelos teóricos. Além disso, o monitoramento das condições funcionais e estruturais permitiu que o autor estabelecesse modelos de regressão para reproduzir o desempenho do pavimento em termos de evolução do trincamento do revestimento asfáltico.

O autor citado também fez algumas considerações importantes em relação à instrumentação, destacando que o elevado nível de perda dos *strain gages* instalados durante a compactação das camadas asfálticas das pistas experimentais ocorreu devido ao uso de vibro-acabadora inadequada e a falta de treinamento da equipe de construção dos pavimentos; o funcionamento inadequado de algumas células de pressão ocorreu em função da presença de umidade nas emendas realizadas nos cabos elétricos; e as células de carga com capacidade de 100 kPa utilizadas para leituras de tensões em camadas de brita graduada não foram adequadas para tal finalidade, pois os registros efetuados apresentaram variações significativas (GONÇALVES, 2002).

Wickboldt (2005) analisou a reflexão de trincas em uma camada de recapeamento com asfalto-borracha usando ensaios acelerados, com o simulador linear de tráfego da UFRGS/DAER, e um sistema de instrumentação composto por célula de pressão, sensores de temperatura e extensômetros, nas direções longitudinais, transversais e a 45°. Os sensores foram instalados entre o pavimento asfáltico trincado e a camada de recapeamento com asfalto-borracha, apresentando um aumento progressivo das deformações horizontais nas direções longitudinais e a 45° com a aplicação de ciclos de carga. No entanto, as leituras de deformação transversal e tensão horizontal acabaram apresentando uma queda brusca, indicando dano no sensor, não sendo possível monitorar o trecho até o final da pesquisa.

Na BR 101 – Sul em Santa Catarina, foi instrumentada uma seção do km 418/419 com instrumentos de pesagem dinâmica, para a avaliação de sistemas de pesagem em movimento, e sensores de deformação instalados no revestimento, ao longo da trilha da roda externa, para avaliar o comportamento do pavimento. Esta pesquisa foi realizada por meio de um convênio firmado entre o Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (DNIT/UFSC, 2007, 2008).

Silva (2009) construiu um Tanque-Teste de pavimentos no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ com o objetivo de reproduzir em verdadeira grandeza um perfil de pavimento rodoviário sendo solicitado por cargas cíclicas. As camadas do pavimento, construído no

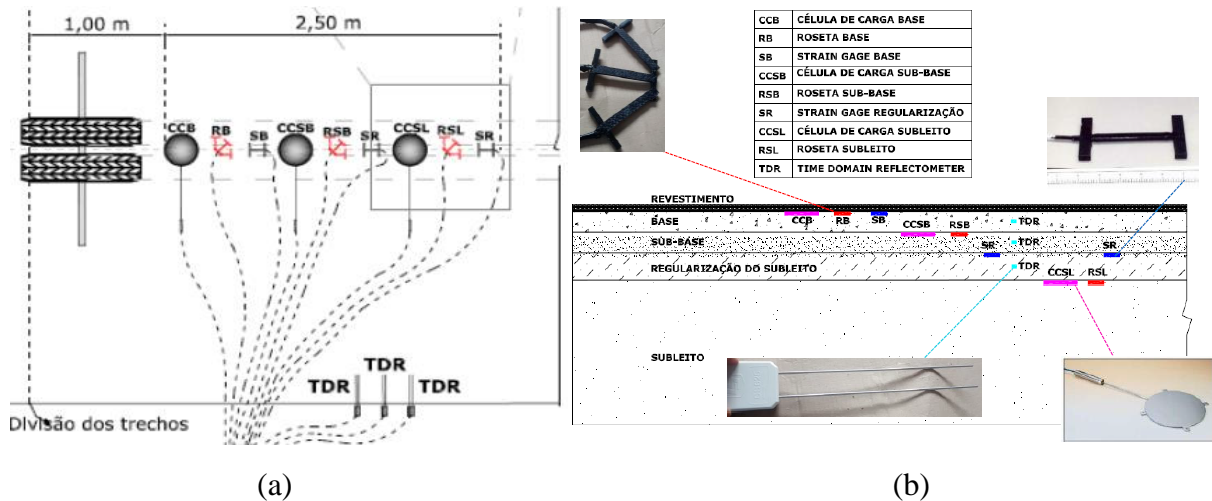
Tanque-Teste, foram instrumentadas com TDRs, para verificação da variação de umidade, células de carga, para analisar a distribuição das tensões verticais, tensiômetros, para verificar a sucção das camadas de base, sub-base e subleito, e transdutores (LVDTs) para medir os deslocamentos elásticos na superfície da estrutura. O autor realizou ensaios de carga repetida variando a posição do nível de água, buscando relações entre a tensão aplicada e a deflexão da estrutura para analisar o efeito da condição de umidade do pavimento. Silva (2014), também, utilizou este Tanque-Teste para avaliar o comportamento de um pavimento semirrígido, instrumentando as camadas da estrutura com células de pressão total e *strain gages*, constatando que a tensão vertical reduz com o aumento da profundidade e as paredes do tanque influenciaram nas respostas estruturais do pavimento analisado.

Em uma pesquisa desenvolvida em parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e a Concessionária Autopista Fernão Dias foi instrumentado um trecho do pavimento asfáltico da BR-381, localizado entre os municípios de Extrema (MG) e Bragança Paulista (SP). O trecho foi dividido em quatro segmentos, com variação no material que compunha a camada de base do pavimento. A instrumentação foi realizada na parte inferior da camada de revestimento asfáltico e na camada de base com uso de células de pressão, sensores de deformação, temperatura e umidade. Chaves *et al.* (2016) relatam ter ocorrido uma grande perda de sensores e dificuldades com o sistema de coleta de dados, somente podendo ser analisadas as deformações obtidas na camada de revestimento, com utilização de um caminhão composto de um eixo traseiro simples de rodas duplas, carregado com 8,2 toneladas, e um segundo caminhão com eixo traseiro em tandem duplo, carregado com 17 toneladas.

Bastos (2016) instrumentou as camadas do pavimento de uma pista experimental localizada em Fortaleza/CE e utilizou um simulador de tráfego de grande porte. A instrumentação ocorreu durante a construção do pavimento contemplando 12 *strain gages*, 03 células de pressão, 03 sensores de umidade (TDR) e 12 termopares. A Figura 20a mostra o posicionamento da instrumentação em relação a passagem de um semi-eixo e a Figura 20b ilustra os sensores utilizados e a suas posições em relação às camadas do pavimento. A autora destaca que todos os sensores resistiram à fase de construção, porém os ensaios com o simulador iniciaram após três meses da execução do revestimento e, assim, foi possível a coleta de dados de apenas 03 *strain gages*, localizados na base do revestimento; a célula de pressão instalada na parte inferior da camada de base apresentou-se danificada e a posicionada na base do revestimento apresentou

mal contato, com leituras oscilatórias; em relação aos sensores de temperatura, 10 permaneceram funcionais durante a pesquisa.

Figura 20 – Vista superior do posicionamento dos sensores (a) e posição dos sensores nas camadas - seção longitudinal (b) (BASTOS, 2016).



Os dados da pesquisa de Bastos (2016) foram coletados para passagem de um semi-eixo com velocidade de até 4 km/h e carga de 4 toneladas, verificando-se na parte inferior do revestimento asfáltico uma pressão máxima de 500 kPa, uma deformação de tração máxima de $51 \mu\epsilon$ obtida pelo sensor transversal, uma deformação máxima de compressão de $60 \mu\epsilon$ e de tração de $40 \mu\epsilon$ apresentadas pelo sensor longitudinal, enquanto o sensor posicionado a 45° apresentou o mesmo valor de deformação máxima de tração e compressão de $60 \mu\epsilon$. Em relação aos dados de temperatura, a autora verificou que a temperatura média na camada de revestimento foi de 40°C , podendo-se perceber uma variação ao longo do dia de 33°C a 47°C , enfatizado a necessidade de utilizar o módulo dinâmico para caracterizar a rigidez da mistura asfáltica sob diferentes temperaturas.

3 INSTRUMENTAÇÃO DE TRECHO DA RODOVIA BR-116

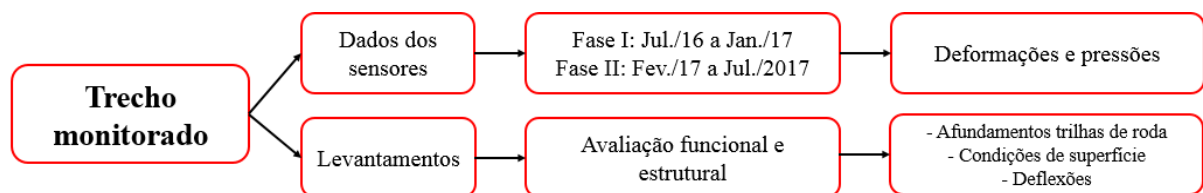
Neste capítulo é apresentado o planejamento da pesquisa e são descritas as etapas realizadas na parte que contempla a instrumentação de campo, apresentando o trecho monitorado e o sistema de instrumentação implantando.

3.1 PLANEJAMENTO DAS ETAPAS DE CAMPO

O processo de instrumentação foi desenvolvido em duas etapas, com tempos distintos de execução do trecho, sendo ambas compostas pela implantação do sistema de instrumentação e coleta de dados em campo. Assim, apresentam-se as atividades desenvolvidas, bem como o fluxograma (Figura 21):

- a) Escolha da rodovia e do trecho em serviço para instalação do sistema de instrumentação e monitoramento do pavimento em campo;
- b) Definição dos sensores e células de pressão utilizados no pavimento para leituras de deformação, carga e temperatura em campo;
- c) Elaboração do sistema de monitoramento para realizar a aquisição e coleta de dados em campo;
- d) Execução do revestimento asfáltico no trecho selecionado, realizado em duas fases: primeira fase em julho de 2016 e segunda fase em fevereiro de 2017;
- e) Monitoramento do trecho após a instalação dos sensores, realizado em duas fases: primeira fase em julho de 2016 e segunda fase em fevereiro de 2017;
- f) Compilação dos dados obtidos em campo e validação dos mesmos.

Figura 21 – Fluxograma das etapas de campo desta pesquisa.



3.2 APRESENTAÇÃO DO TRECHO MONITORADO

O trecho escolhido para instalação e monitoramento do sistema de instrumentação fica localizado no km 298+560 da rodovia BR-116, sentido Guaíba – Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. O trecho faz parte de uma rodovia em serviço e está em operação desde 2014, tendo sido executado pela Concessionária que administrava a rodovia. Na Figura 22 encontra-se a localização do trecho selecionado, com comprimento em torno de 100 metros, destacado em relação ao estado do Rio Grande do Sul e a cidade de Porto Alegre e Guaíba.

Figura 22 – Localização do trecho selecionado.

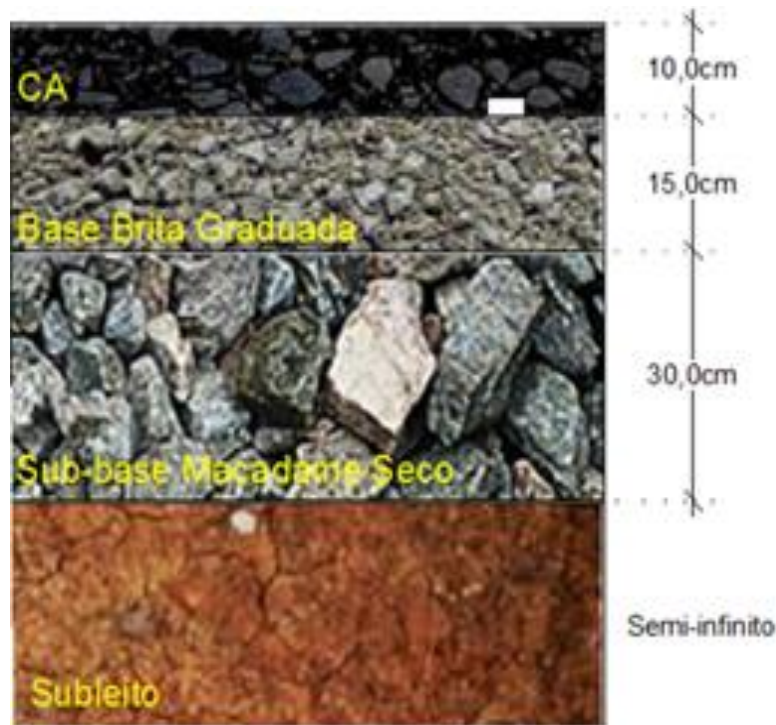


A BR 116 é uma das principais rodovias brasileiras, sendo uma rodovia longitudinal que tem início no estado do Ceará, na cidade de Fortaleza, e término no estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Jaguarão, fronteira com o Uruguai. No Rio Grande do Sul, esta rodovia assume grande importância em relação ao escoamento de produtos agrícolas, bem como o transporte da produção dos principais pólos de desenvolvimento industrial do Estado.

O trecho selecionado pertenceu à um segmento administrado até 2018 pela Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre S/A – Concepa, hoje sem concessão, a qual disponibilizou aporte técnico e logístico para o desenvolvimento dos trabalhos de campo. De acordo com levantamentos de tráfego realizados pela empresa Engimind e fornecidos pela Concessionária, este local caracteriza-se por apresentar um tráfego pesado, com um volume diário médio comercial (VDMc) de 2.237 veículos para o ano de 2017.

De acordo com o projeto de dimensionamento do pavimento da rodovia, fornecido pela Concessionária, a estrutura é formada por uma camada de revestimento de concreto asfáltico de 10 cm de espessura, uma camada de base de brita graduada simples (BGS) com 15 cm de espessura e uma camada de sub-base de 30 cm de macadame seco, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Estrutura do pavimento asfáltico da BR-116/RS no km 298+560 – Sentido Guaíba-Porto Alegre (adaptado de SPECHT, 2012).



Diante do exposto, o trecho do km 298+560, sentido Guaíba-Porto Alegre, da rodovia da BR-116/RS foi selecionado devido à proximidade do município de Porto Alegre, o que facilitaria o monitoramento e coleta dos dados e, também, por apresentar um elevado tráfego comercial. Além disso, a estrutura do pavimento era conhecida, por ter sido construído pela

Concessionária, estando em serviço a dois anos antes do início desta pesquisa e apresentando boas condições funcionais e estruturais.

3.3 SELEÇÃO DOS SENSORES INSTALADOS NA PISTA

Para um melhor acompanhamento da evolução do comportamento mecânico da estrutura faz-se necessário avaliar a distribuição de tensões e deformações geradas na estrutura, devido as solicitações das cargas de tráfego, onde as camadas de revestimento e base aliviam as tensões verticais de compressão no topo do subleito. Além disso, na parte inferior da camada do revestimento asfáltico ocorrem tensões e deformações de tração que irão causar o trincamento por fadiga desta camada, em função das repetições das cargas do tráfego.

Logo, é importante monitorar as respostas do pavimento sob carga na parte inferior da camada de revestimento asfáltico, na parte superior das camadas granulares e no topo do subleito, sendo esta instrumentação a tradicionalmente empregada (GONÇALVES, 2002; TIMM *et al.*, 2004). Assim, ao selecionar a instrumentação deseja-se ter sensores capazes de medir as respostas nestes locais.

Como um dos objetivos desta pesquisa foi o estudo do trincamento por fadiga no revestimento asfáltico e o trecho selecionado para instrumentação era um trecho existente, construído em 2014, somente foi possível a instalação de sensores no topo da camada de base, havendo a necessidade de remover toda a camada de revestimento asfáltico, de 10 cm de espessura, existente no trecho e, após a instalação dos sensores, refazer esta camada.

Para o monitoramento de deformações e tensões na fibra inferior do revestimento e de temperaturas, às quais o revestimento estará sujeito, foram selecionados sensores de deformação do tipo *strain gage*, células de pressão e sensores de temperatura, que permitem obter estes dados, possibilitando a avaliação do comportamento da estrutura do pavimento.

a) Sensores de deformação – Extensômetro (*strain gage*)

Os sensores de deformação selecionados são do tipo KM-120-120-H2-11-W1M (Figura 24), de fabricação da empresa Kyowa, e suas principais características estão apresentadas na Tabela 4. A escolha desse tipo de sensor foi devido ao histórico bem-sucedido do seu emprego em outras pesquisas (GONÇALVES, 2002; DNIT/UFSC, 2008; SILVA, 2014; BASTOS, 2016).

Figura 24 – Sensores de deformação do tipo KM-120-120-H2-11-W1M.



Tabela 4 – Características técnicas dos extensômetros.

Elemento do material resistivo	CuNi alloy
Material base	Acrílico
Temperatura de operação (°C)	-10 a 70
Faixa de auto compensação de temperatura (°C)	0 a 50
Coefficiente de expansão linear ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11
Máxima deformação a temperatura ambiente (%)	0,3
Comprimento x largura x espessura (mm)	120 x 15 x 5
Resistência (Ω)	120

Os extensômetros são tipicamente muito frágeis, quando manipulados diretamente, e por esse motivo precisam passar por um processo de selagem, que também protege contra a umidade, a temperatura e o impacto por esmagamento.

Foram instalados no topo da camada de base conjuntos de extensômetros em formato de roseta (primeira e segunda fase) e um conjunto (segunda fase) com um extensômetro no sentido longitudinal e outro no sentido transversal ao tráfego, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Extensômetros instalados no topo da camada de base: conjunto de extensômetros em forma de roseta (a) e conjunto com um extensômetro no sentido longitudinal e outro no sentido transversal (b).

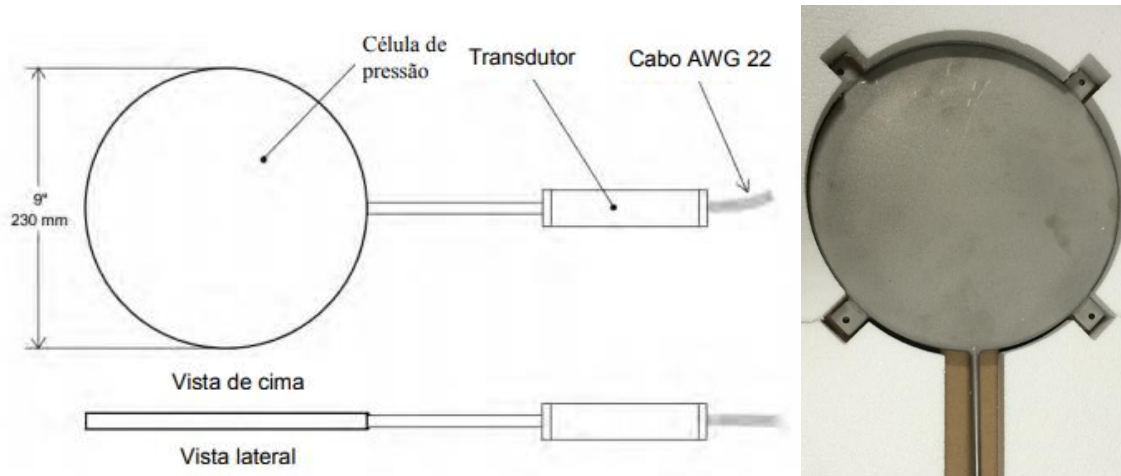


Na primeira fase da pesquisa foram instalados seis extensômetros e todos apresentaram leitura após o processo de instalação. Já na segunda fase foram instalados oito sensores, dos quais dois sensores apresentaram problemas de leitura após a instalação. O objetivo da instalação dos extensômetros foi medir a resposta de deformação no fundo da camada de revestimento asfáltico sob ação das cargas de tráfego.

b) Células de pressão

Para medição das pressões, foram instaladas no topo da camada de base, células de pressão total da marca Geokon, da série 3500. Estas células podem ser usadas em solos, concretos e outros materiais, apresentando as seguintes especificações: capacidade de carregamento variável, sendo usadas nesta pesquisa células de 0,5 MPa, 1,0 MPa e 2,5 MPa, temperatura de trabalho entre -20 e 80°C, altura de 6 mm e diâmetro de 230 mm, à prova de água e projetada para mais de 100 milhões de ciclos de carregamentos à capacidade máxima. Na primeira fase da pesquisa, foram instaladas duas células de pressão com capacidade de 1 MPa e 2,5 MPa. Já na segunda fase, foram instaladas três células com capacidade de 0,5 MPa, 1 MPa e 2,5 MPa. A Figura 26 apresenta o modelo da célula de pressão total utilizada nesta pesquisa.

Figura 26 – Célula de pressão total modelo 3500 (adaptado de Geokon, 2013).



As células de pressão são constituídas por duas membranas de aço inox, ligadas por solda entre si pelo seu perímetro. O interior é preenchido por óleo, cuja pressão varia com a pressão nas paredes da célula, provocada pelas pressões externas. A pressão do óleo é transformada em sinal elétrico por um transdutor de pressão acoplado, do tipo semiconductor. Este tipo de transdutor é geralmente utilizado em situações onde rápidas mudanças de pressão precisam ser registradas, como é o caso em estruturas de pavimentos. Esta série de células é a mesma utilizada pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) nas suas pistas experimentais (TIMM *et al.*, 2004; TIMM, 2009) e, também, recomendada pelo DNIT/UFSC (2008).

c) Sensores de temperatura

Para verificar a temperatura do revestimento asfáltico, foram instalados, acoplados aos extensômetros, sensores de temperatura (termopares) do tipo LM35. Estes sensores são bastante empregados devido a sua robustez, custo acessível, tamanho e simplicidade de utilização. Além disso, apresentam uma boa precisão, em torno de $0,5^{\circ}\text{C}$, na sua faixa de utilização, compreendida entre de -55°C a 150°C , atendendo as necessidades das etapas construtivas e de serviço de pavimentos asfáltico. Na Figura 27 é apresentado o sensor LM 35 utilizado neste trabalho.

Figura 27 – Sensor de temperatura LM35.



Foram instalados no trecho cinco termopares, dois na primeira fase e três na segunda fase, e todos apresentaram funcionamento adequado após a construção do revestimento.

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

O sistema de aquisição de dados foi produzido especialmente para esta pesquisa pela equipe do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV-UFRGS), fazendo parte de um projeto de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) financiado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).

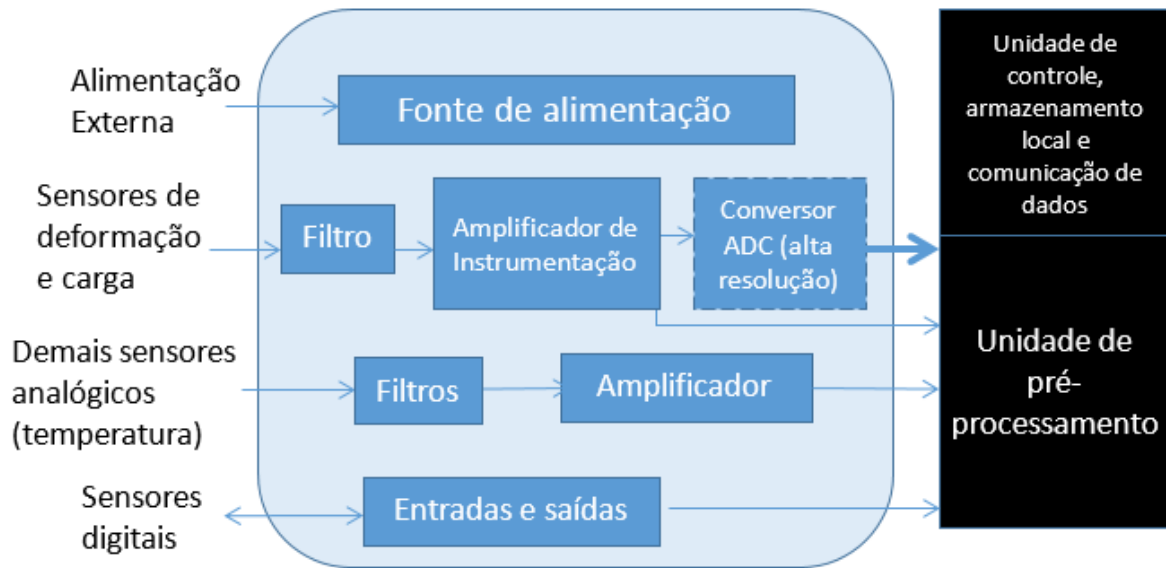
Dentre os principais desafios envolvidos no desenvolvimento dessa instrumentação destacam-se: a dificuldade na coleta dos dados de uma rodovia em serviço, devido à velocidade operacional, heterogeneidade do tráfego, topologia da via para instalação dos sensores e sistemas de coleta e variação da posição transversal dos veículos na via; interesse de uso do sistema para monitoramento de uma ponte, com características específicas quanto ao tipo de construção; e o objetivo de baixo consumo de energia pelo sistema para alinhamento com outras pesquisas do grupo do LAPAV-UFRGS.

As leituras e aquisições dos dados, provenientes dos sensores, foram realizadas por um sistema eletrônico que permitiu o monitoramento contínuo do local instrumentado, neste caso a parte inferior do revestimento asfáltico do trecho, devendo satisfazer os seguintes requisitos:

- a) Ler simultaneamente os sensores de temperatura, deformação e pressão;
- b) Coletar dados a taxas de 900 pontos por segundo, permitindo a caracterização dos dados provenientes de veículos trafegando em velocidades adequadas com a rodovia, neste caso 100 km/h;
- c) Pré-processamento dos dados provenientes dos sensores para extrair as informações relevantes de forma automática e, assim, usar os recursos limitados de armazenamento e envio de dados de forma otimizada e eficiente;
- d) Ser alimentado por rede elétrica convencional ou baterias, com baixo consumo de energia;
- e) Ser um sistema autônomo, independente de um computador padrão para coleta contínua dados.

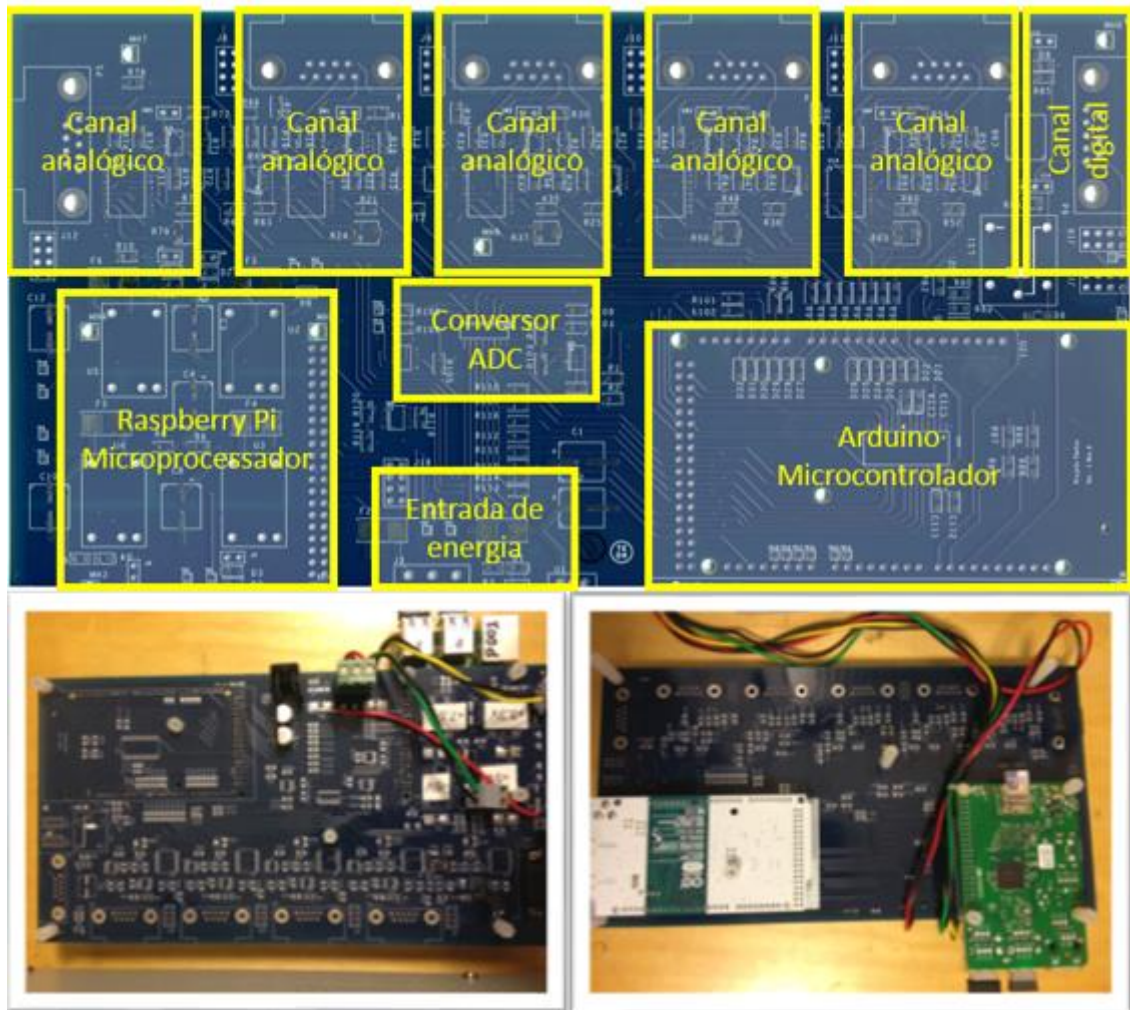
Um sistema que atenda a estes requisitos foi proposto, conforme apresentado na Figura 28, onde são descritos os seus principais blocos funcionais, destacando: o bloco fonte de alimentação, responsável por gerar as tensões internas de trabalho a partir de uma fonte externa; os blocos filtros analógicos, amplificador de instrumentação e conversor analógico digital (ADC - alta resolução), para permitir a leitura dos sensores de deformação e pressão; os blocos filtros e amplificador comum, para a leitura dos demais sensores analógicos, incluindo os sensores de temperatura; e o bloco entradas e saídas digitais, para permitir a leitura dos sensores digitais. Estes blocos estão conectados ao bloco unidade de pré-processamento (Arduino) e ao bloco unidade de controle, armazenamento local e comunicação de dados (Raspberry PI), responsáveis pelas funções necessárias para o funcionamento do sistema. Os blocos destacados pela cor preta indicam que são componentes comerciais, adquiridos diretamente no mercado, enquanto os blocos em azul indicam que foram desenvolvidos na pesquisa.

Figura 28 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados proposto.



O sistema de aquisição de dados é composto por uma placa (Figura 29) produzida a partir de um projeto teórico de circuito impresso, desenvolvido no LAPAV-UFRGS, com a descrição do circuito elétrico, e posterior desenho físico em programas específicos para esta aplicação. Após a impressão da placa, foi realizada a montagem dos componentes do sistema de forma automática, por um equipamento especializado que coloca os componentes e uma pasta de solda, usada para fixação e conexão elétrica, na placa. O equipamento utilizado na montagem automática foi disponibilizado pelo laboratório LASCAR da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para efetivar a solda dos componentes à placa, foi necessário o aquecimento dos mesmos, o que ocorreu em um forno especializado para essa aplicação, também disponibilizado pelo laboratório LASCAR.

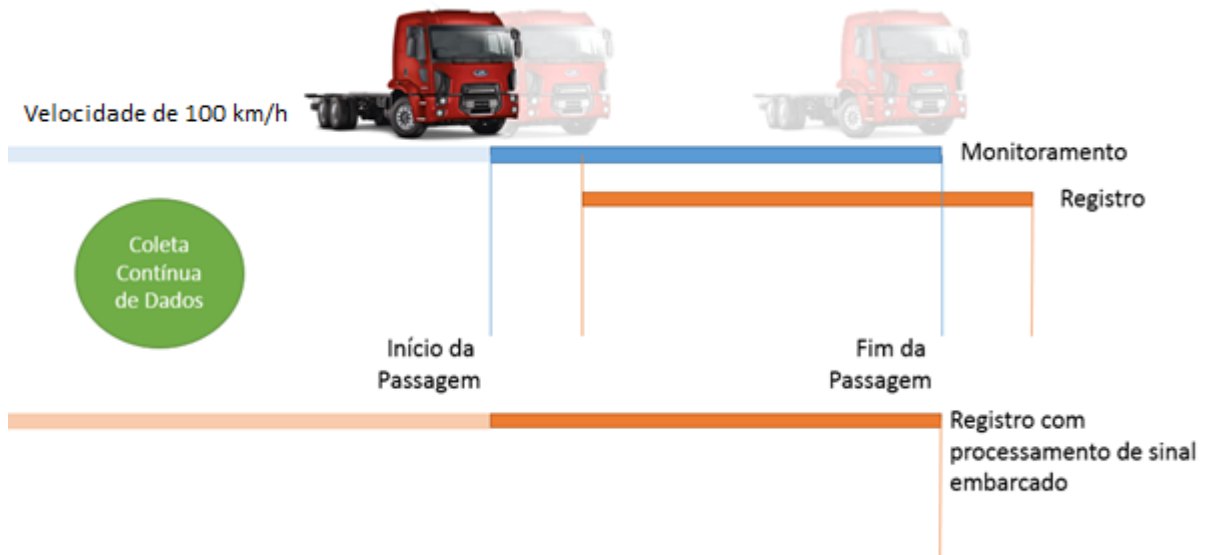
Figura 29 – Placa de circuito impresso para o sistema de aquisição de dados (superior) e componentes colados na placa (inferior).



O microcontrolador do tipo Arduino foi selecionado por suas características satisfazerem as necessidades do projeto do sistema de aquisição de dados desenvolvido nesta pesquisa, as quais englobam a aquisição e pré-processamento dos dados. Também foi utilizado um microprocessador, o Raspberry Pi, desenvolvido como um computador de placa única do tamanho de um cartão de crédito. O Raspberry Pi, por ser um sistema que implementa um pequeno computador simples comparado com computadores pessoais do tipo *desktop* e *notebook*, porém de estrutura muito mais simples e menor custo, possibilita instalar um sistema operacional para que o mesmo realize as atividades de comunicação com o microcontrolador e com a rede de comunicação de dados. Esta rede permite o acesso remoto às informações coletadas pelo sistema de aquisição de dados.

Os dados dos sensores são monitorados e coletados de forma contínua durante a passagem dos veículos no trecho. Como mostra a Figura 30, o sistema de aquisição de dados está programado para identificar o início e o fim da passagem do veículo, monitorando toda a sua extensão. No entanto, utiliza-se um registro com filtro e processamento de sinal embarcado, programado para o microcontrolador Arduino, capturando apenas dados significativos a passagem do veículo, a fim de evitar que a aquisição dos dados ultrapasse a capacidade de armazenamento do sistema, ou mesmo o volume de dados seja tal que seu processamento se torne dispendioso.

Figura 30 – Processo de aquisição dos dados com processamento embarcado – memória de transferência de coleta



Inicialmente se tinha a intenção de utilizar um sistema de comunicação para acesso remoto aos dados coletados, via rede de celular 3G, o que facilitaria a coleta de dados, não sendo necessário a armazenagem de dados no local. Porém, o modem 3G instalado gerava um certo nível de ruído nas leituras, interferindo na qualidade dos sinais. Foram realizadas tentativas de mitigação deste efeito, com soluções como aterramento e outras práticas comuns neste tipo de cenário, porém o resultado não foi muito eficiente, optando-se então por cancelar este método de armazenagem dos dados.

O sistema de aquisição foi instalado em uma caixa metálica localizada na borda externa da rodovia (Figura 31). O sistema foi alimentado pela rede elétrica convencional existente no local, porém devido aos picos de energia foi necessário a utilização de um *nobreak*. Cabe salientar a ocorrência de diversos problemas de furto de cabos da rede elétrica, o que prejudicou a coleta

contínua de dados do trecho, sendo muitas vezes necessária a utilização de um gerador para coletas periódicas.

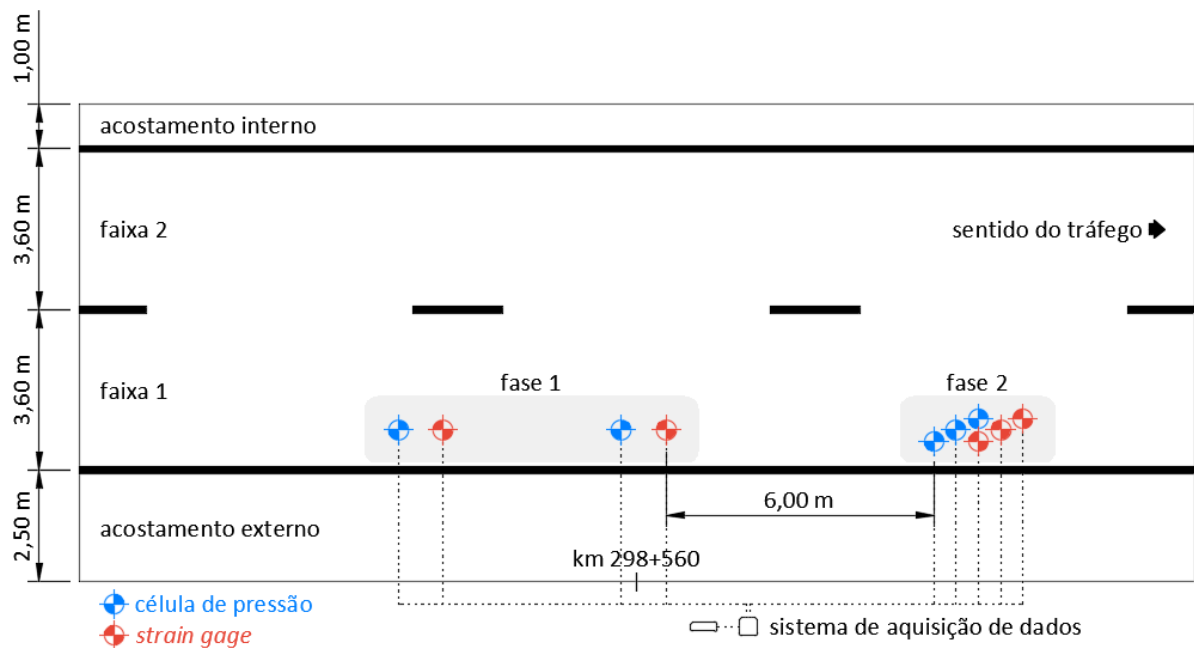
Figura 31 – Caixa de proteção com o sistema de aquisição de dados instalado.



3.5 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO

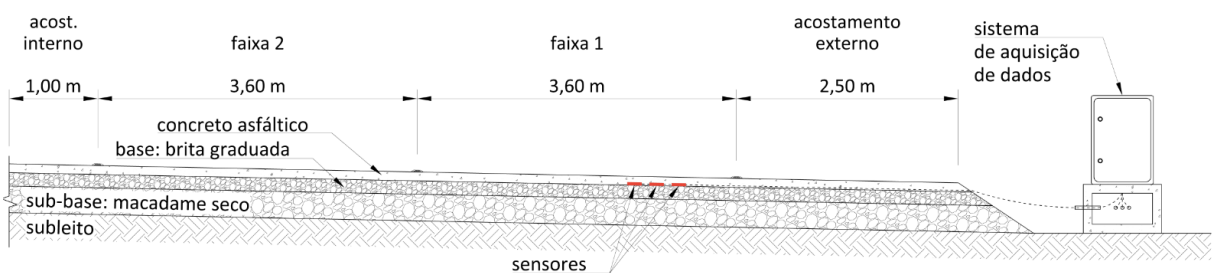
A instalação do sistema de instrumentação e monitoramento foi realizada em duas fases, sendo a primeira fase em julho de 2016 e a segunda em fevereiro de 2017. Devido ao surgimento de alguns defeitos no trecho, após 6 meses da instalação dos sensores da primeira fase, o órgão regulador solicitou à Concessionária que realizasse intervenções no revestimento, e como alguns dos sensores já haviam apresentado falhas, optou-se pela reconstrução do revestimento instrumentado em uma segunda fase. A nova instalação (fevereiro/2017) foi realizada no mesmo trecho, porém com um deslocamento de 6 metros em relação ao local da primeira fase (julho/2016), como mostra a Figura 32. O processo de instalação dos sensores, a execução do revestimento e o tipo de mistura asfáltica utilizada foram semelhantes em ambas as fases da pesquisa, somente sendo alterada a disposição dos sensores ao longo da pista.

Figura 32 – Seções instrumentadas do pavimento asfáltico desta pesquisa.



Para instalar os sensores no topo da camada de base, conforme apresentado na Figura 33, foi necessário a fresagem de toda a espessura da camada de revestimento asfáltico. Na primeira fase da pesquisa foi realizada a fresagem de uma seção de aproximadamente 30 metros, enquanto na segunda fase a seção fresada foi em torno de 20 metros.

Figura 33 – Seção transversal do pavimento asfáltico.



3.5.1 Adequações do trecho selecionado

O sistema de instrumentação foi instalado em um pavimento em operação, construído em 2014, e por isso precisou passar por um processo de preparação antes da colocação dos sensores. Primeiramente foi necessário realizar uma fresagem para remoção de toda a camada existente de revestimento, visto que os sensores foram instalados no topo da camada de base. Após a fresagem realizou-se a limpeza da camada de base existente no local, com auxílio de um

equipamento de limpeza, buscando remover o material proveniente da fresagem. Também foi realizada a compactação desta camada utilizando um rolo liso, regularizando-a para colocação dos sensores e construção da nova camada de revestimento. Além das adequações no pavimento, também foi necessário realizar a abertura de uma valeta na lateral da pista, para colocação da tubulação elétrica e dos cabos do sistema de instrumentação, e a instalação de uma caixa metálica na borda do acostamento externo, próximo das seções instrumentadas, para acomodação do sistema de aquisição de dados, com o objetivo de protegê-lo quanto a intempéries e furtos. Estas etapas são mostradas na Figura 34.

Figura 34 – Etapas de adequação do trecho desta pesquisa.



(a) Fresagem da camada de revestimento.



(b) Verificação da espessura.



(c) Limpeza da camada.



(d) Compactação da base.



(e) Instalação da tubulação.



(f) Caixa metálica.

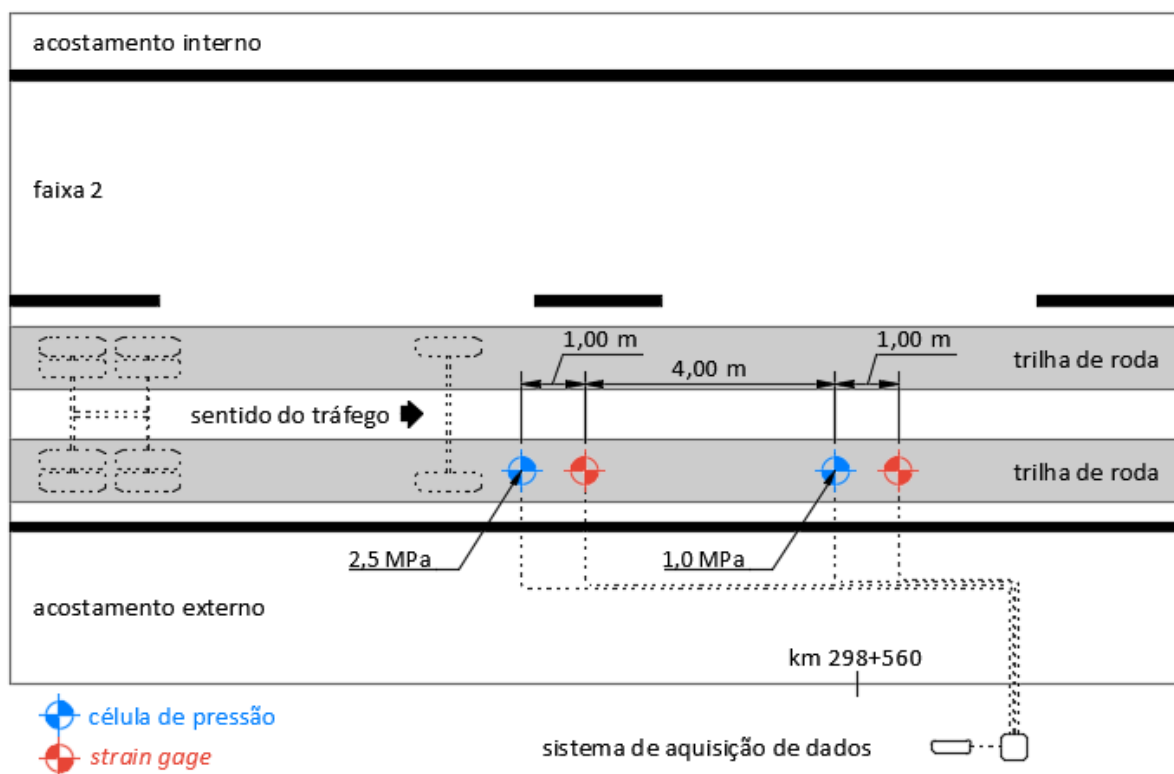
3.5.2 Instrumentação do revestimento asfáltico do trecho estudado

O processo de instalação dos sensores em campo contou com a colaboração de pesquisadores do Lapav, bolsistas do Peter (Programa especial de treinamento em engenharia rodoviária) e da equipe da Concessionária.

Os conjuntos de sensores, tanto da primeira fase quanto da segunda fase, foram instalados na faixa externa, denominada de faixa 1, da pista da BR 116, sentido Guaíba – Porto Alegre, distribuídos na trilha de roda externa. Os conjuntos foram posicionados a partir de um ponto de referência conhecido, sendo utilizada a marcação do km 298+560 no acostamento externo da pista.

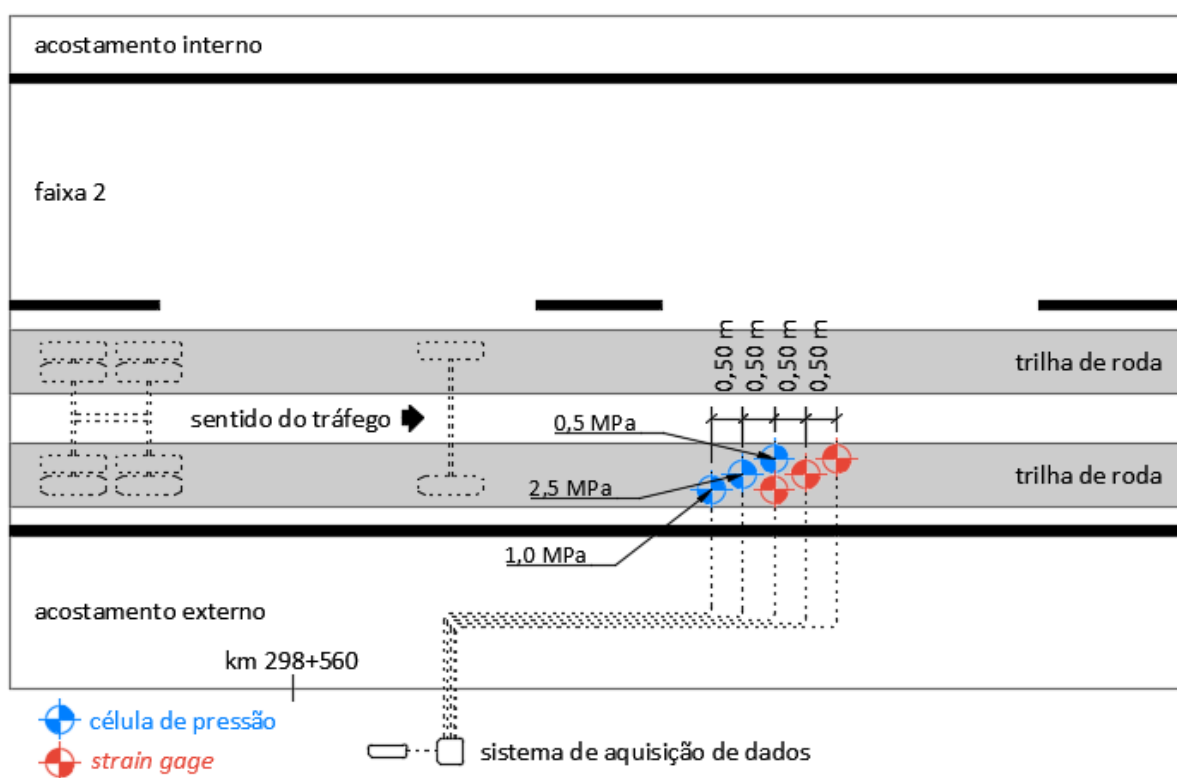
Para o monitoramento do trecho foram instalados, na primeira fase, dois conjuntos de sensores, no topo da camada de base, compostos por duas células de pressão, com capacidade de 1 MPa e 2,5 MPa, seis *strain gages*, no formato de roseta para verificar as deformações horizontais, verticais e à 45°, e dois termopares acoplados nos *strain gages*. Ambos os conjuntos foram posicionados no centro da trilha de roda externa, como mostra a Figura 35.

Figura 35 - Detalhamento da posição dos conjuntos de *strain gages* e células de pressão instalados na primeira fase (Julho/2016) desta pesquisa.



O *layout* de instalação dos sensores da segunda fase foi alterado em relação a primeira fase, buscando otimizar o espaço na trilha de roda, visto que a passagem dos veículos em pontos afastados dos sensores dificulta a interpretação dos sinais. Para isto, três células de pressão com capacidade de 0,5 MPa, 1 MPa e 2,5 MPa, oito *strain gages*, no formato de roseta, e três termopares acoplados nos *strain gages* foram instalados com deslocamento tanto na transversal quanto na longitudinal da trilha de roda. O deslocamento transversal permite as leituras com maior precisão por aumentar a possibilidade de o veículo passar no ponto em cima de pelo menos um dos sensores, enquanto o deslocamento longitudinal facilita o sistema de ativação das leituras e permite o cálculo da velocidade dos veículos. A Figura 36 apresenta o posicionamento dos sensores instalados na segunda fase.

Figura 36 – Detalhamento da posição dos sensores instalados na segunda fase (Fevereiro/2017) desta pesquisa.



Para o posicionamento dos sensores na trilha de roda externa seguiu-se a demarcação da pintura de sinalização existente na borda externa da pista. As demarcações dos pontos de instalação dos sensores foram realizadas em campo com auxílio de trena métrica, linha, estacas de madeira e tinta. Após a pintura dos locais de instalação, realizou-se uma limpeza manual na superfície da camada de base para o assentamento dos sensores, etapa fundamental para conseguir um adequado posicionamento e proteção dos mesmos em relação a possíveis agregados salientes

nestes pontos. Além disso, foi colocada uma fina camada de pó de pedra para auxiliar na regularização do assentamento e proteção dos sensores. Devido à retirada total do revestimento asfáltico existente foi necessário realizar a imprimação da camada de base para proteção da mesma e, também, da camada de assentamento de pó de pedra. Todas essas etapas são mostradas na Figura 37.

Figura 37 – Demarcação dos pontos para instalação dos sensores nesta pesquisa.



(a) Posicionamento das seções.



(b) Demarcação da posição dos sensores.



(c) Limpeza manual da base.



(d) Camada de pó de pedra.



(e) Ajuste das células.



(f) Ajuste dos *strain gages*.



(g) Imprimação da base.



(h) Imprimação da camada de pó.

Os cabos dos sensores foram posicionados nas trincheiras abertas no acostamento, sendo cobertos com misturas asfálticas de forma manual, tendo-se o cuidado para não os danificar. Optou-se por colocar os cabos no interior de dutos, buscando evitar possíveis danos durante o processo de execução do revestimento. Após os ajustes dos cabos, os sensores foram devidamente posicionados nas suas marcações e cobertos por uma fina camada de pó de pedra para proteção, a qual também passou pelo processo de imprimação. Estas etapas podem ser vistas na Figura 38.

Figura 38 – Posicionamento dos sensores na parte superior da camada de base nesta pesquisa.



(a) Preenchimento das trincheiras.



(b) Ajustes dos cabos.



(c) Posicionamento das células.



(d) Posicionamento dos *strain gages*.



(e) Cobrimento final dos sensores.



(f) Imprimação final no local dos sensores.

A nova camada de revestimento foi executada com uma mistura asfáltica enquadrada na Faixa C da norma DNIT 031 (2006), apresentando um teor de ligante asfáltico modificado por polímero (AMP 60/85) de 5,2% e uma composição granulométrica de 25% de brita 3/4", 15% de brita 3/8" e 60% de pó de pedra, conforme projeto de dosagem fornecido pela Concessionária. Cabe salientar que esta mistura é usualmente utilizada pela Concessionária que administra a rodovia. Na execução do revestimento foi utilizada uma vibroacabadora para aplicação, nivelamento e pré-compactação da mistura asfáltica. No entanto, no local onde os sensores foram instalados a aplicação da mistura foi de forma manual, buscando evitar qualquer movimentação dos sensores, somente finalizando a camada com a vibroacabadora. A camada do revestimento foi compactada utilizando primeiramente o rolo de pneu e posteriormente o rolo de chapa para finalizar o acabamento. Em toda a etapa de compactação da camada não foi permitido o uso de vibração, para evitar que os sensores fossem danificados. Após a finalização da execução do revestimento, foi realizada a pintura da sinalização horizontal para divisão das faixas e da borda externa da pista, concluindo assim, a etapa de construção do trecho, como apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Etapas da execução da camada de revestimento asfáltico desta pesquisa.



(a) Vibroacabadora.



(b) Aplicação manual.



(c) Finalização da camada.



(d) Compactação com rolo pneu.



(e) Compactação com rolo chapa.

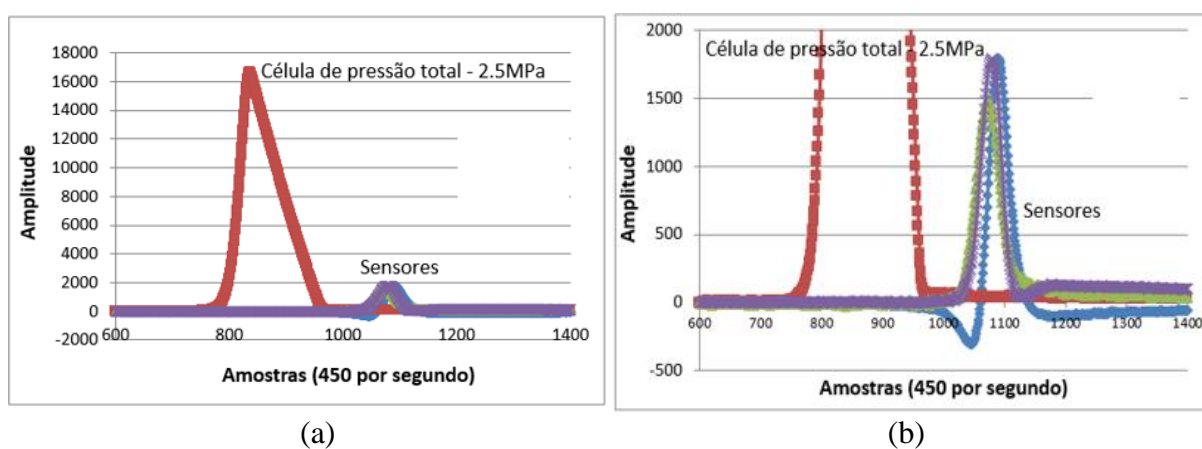


(f) Pintura de sinalização.

3.6 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO

Para verificação inicial do funcionamento dos sensores e da célula de pressão, logo após a construção do revestimento, foram realizadas leituras quando solicitados pela passagem do rolo compactador da camada, utilizando o sistema desenvolvido, mas sem processamento e conversão dos dados para unidades de deformação e pressão, podendo-se observar o sucesso da instalação, como mostra a Figura 40, cuja relação sinal-ruído está com excelentes margens.

Figura 40 – Dados da célula de pressão (a) e do conjunto de sensores (b) quando solicitados pela passagem do rolo compactador no sentido do tráfego nesta pesquisa.



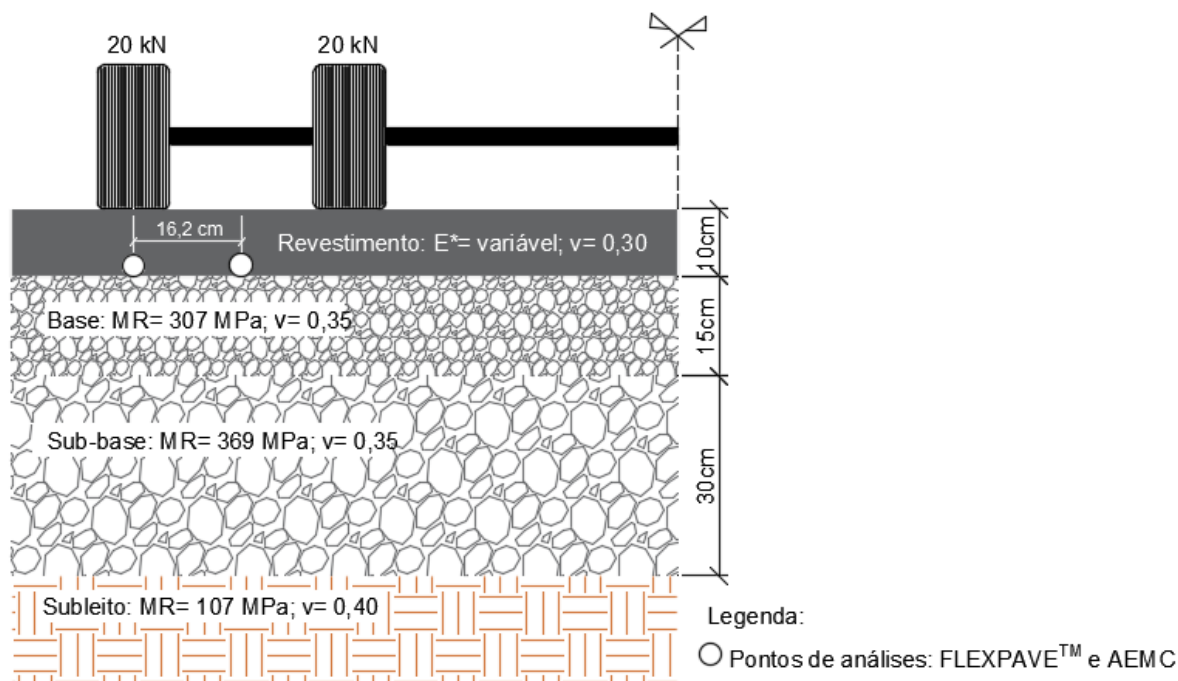
O monitoramento das tensões e deformações desenvolvidas em estruturas de pavimento em serviço são de grande interesse para a área rodoviária, permitindo o adequado entendimento do comportamento sob condições de tráfego e ambientais reais. Assim, a instrumentação é uma importante ferramenta para a comparação do comportamento em campo e laboratório, auxiliando na calibração de modelos de desempenho.

Os sinais dos sensores foram analisados, inicialmente, de modo a verificar o formato dos pulsos obtidos, uma vez que sua magnitude é variável devido à distância lateral do sensor em relação a passagem do rodado, à velocidade do veículo, à temperatura do revestimento e às diferentes cargas dos veículos.

Para validação e verificação dos pulsos de pressão e deformações registradas nas direções longitudinal e transversal em campo, os mesmos foram correlacionados com resultados do programa de análise elástica de múltiplas camadas – AEMC, o qual está inserido no programa MeDiNa, utilizando dados da estrutura do trecho instrumentado, com camada de revestimento de 10 cm de concreto asfáltico, base de brita graduada simples com 15 cm, sub-base de

macadame seco com 20 cm e subleito. No projeto de dimensionamento do pavimento do trecho estudado da BR-116 foram sugeridos, com base nos dados apresentados por Specht (2012), módulos de resiliência de 261 MPa para a camada de base de brita graduada simples (BGS), de 291 MPa para a camada de sub-base de macadame seco e de 134 MPa para o subleito. A partir de dados de bacias deflectométricas, obtidos por levantamentos de FWD (*Falling Weight Deflectometer*) fornecidos pela Concessionária, foi realizada a retroanálise da estrutura, usando o programa BackMeDiNa, para estimar os valores de módulo de resiliência, considerando as camadas aderidas e coeficientes de Poisson de 0,30 para o revestimento, 0,35 para base e sub-base e 0,40 para o subleito, de acordo com recomendações de Bernucci *et al.* (2008), Specht (2012) e Medina e Motta (2015). Os valores de módulo obtidos na retroanálise e usados nas simulações foram de 307 MPa para camada de base, 369 MPa para camada de sub-base e 107 MPa para o subleito. Para o módulo de resiliência do revestimento foi usado o valor de 5371 MPa, obtido em laboratório na temperatura de 25°C. A Figura 41 ilustra a estrutura do pavimento e as características de cada camada usadas nas simulações.

Figura 41 – Representação da estrutura simulada.



As simulações foram realizadas considerando a passagem de um eixo padrão (eixo simples de rodas duplas - ESRD), com carga padrão de 20 kN por roda, pressão de inflação de 560 kPa, espaçamento entre as rodas de 32,4 cm e camadas aderidas. Na Figura 42 são mostrados os

pulsos de deformação e tensão obtidos no AEMC e na Figura 43 os pulsos coletados em campo na passagem de um ESRD com 20 kN por roda.

Figura 42 – Pulsos de deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e tensão vertical (c) obtidos no AEMC para a estrutura do trecho.

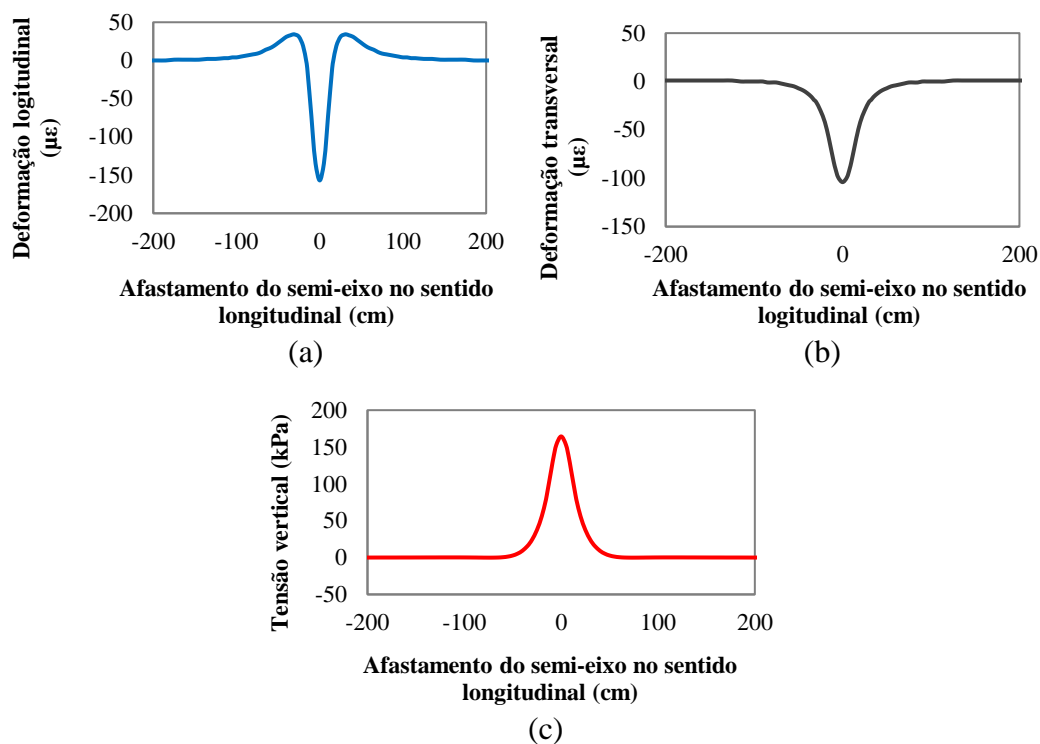
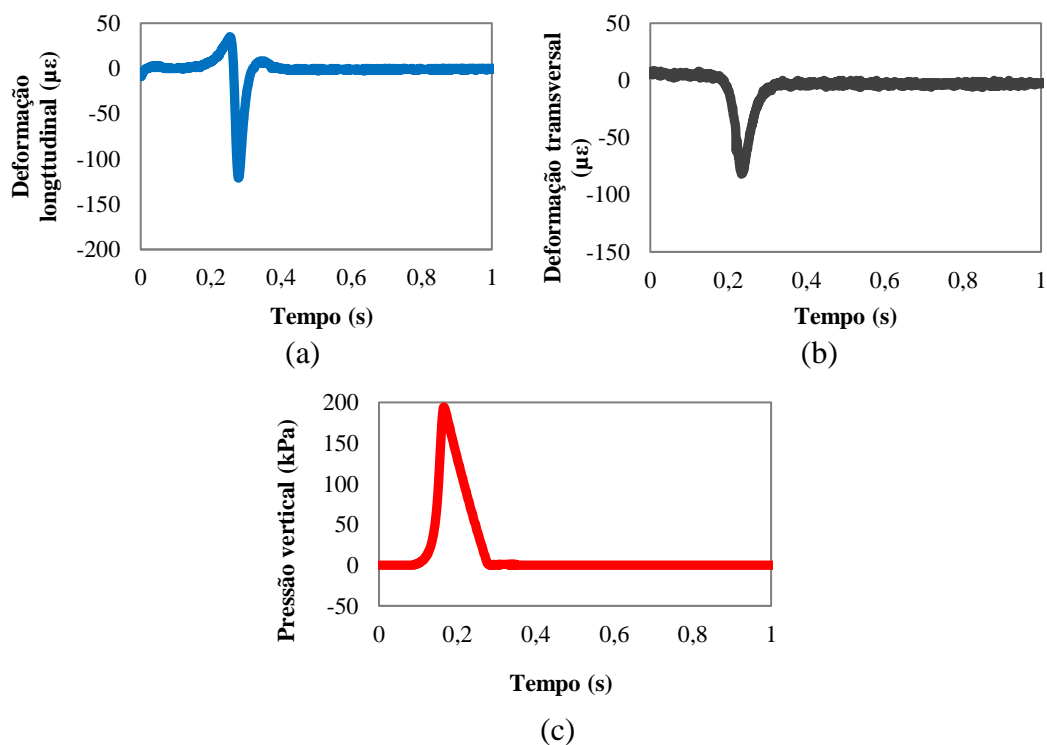
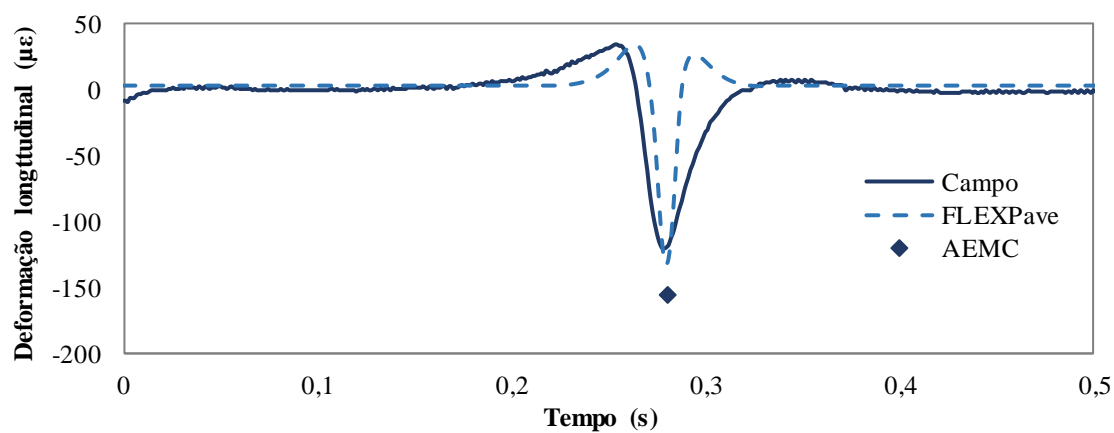


Figura 43 – Pulsos de dados coletados em campo com a instrumentação para um ESRD: (a) deformação longitudinal, (b) deformação transversal e (c) pressão vertical.

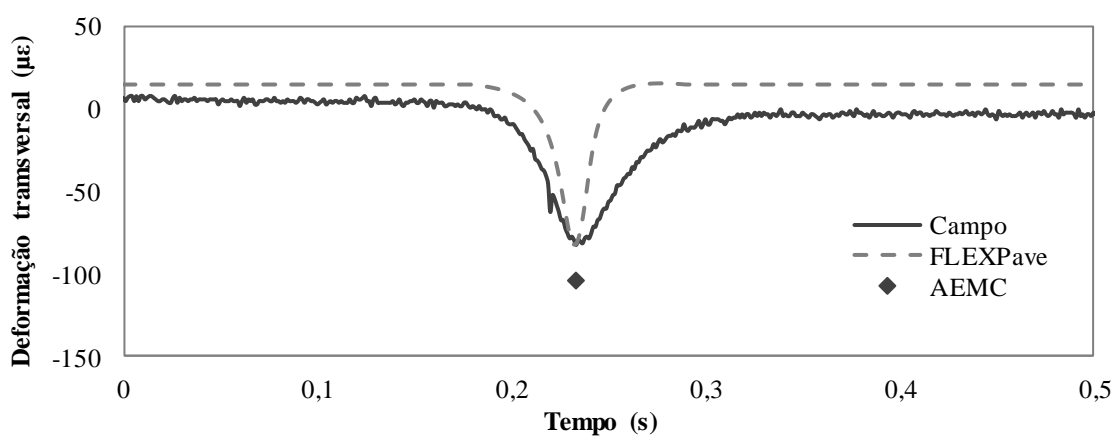


Como o programa AEMC realiza uma análise elástica do pavimento e o comportamento da estrutura varia com a velocidade dos veículos, também, foram realizadas simulações para avaliar os pulsos considerando a velocidade e o comportamento viscoelástico do concreto asfáltico utilizando o programa FlexPAVE™, cedido pelo Professor Richard Kim da *North Carolina State University* (NCSU). A estrutura do pavimento inserida no FlexPAVE™ foi a mesma do trecho estudado da BR-116 e usada no AEMC, considerando uma temperatura de 25°C para análise do comportamento viscoelástico da camada de revestimento, pressão de inflação de 560 kPa, espaçamento entre as rodas de 32,4 cm e uma velocidade de 30 km/h, semelhantes às condições de campo, com dados coletados no dia 03/05/2017, próximo às 11 horas, para um caminhão com ESRD de 80 kN. Na Figura 44 é apresentado um comparativo dos dados de deformação e pressão obtidos no campo e com os programas FlexPAVE™ e AEMC, podendo-se verificar uma boa correlação dos pulsos obtidos em campo com os simulados pelo programa FlexPAVE™. Já os valores máximos de deformação calculados pelo AEMC foram superiores aos de campo, tanto no sentido longitudinal quanto transversal, e em relação a pressão vertical os valores de pico máximo determinados pelo AEMC e FlexPAVE™ ficaram inferiores ao de campo, conforme apresentado na Tabela 5.

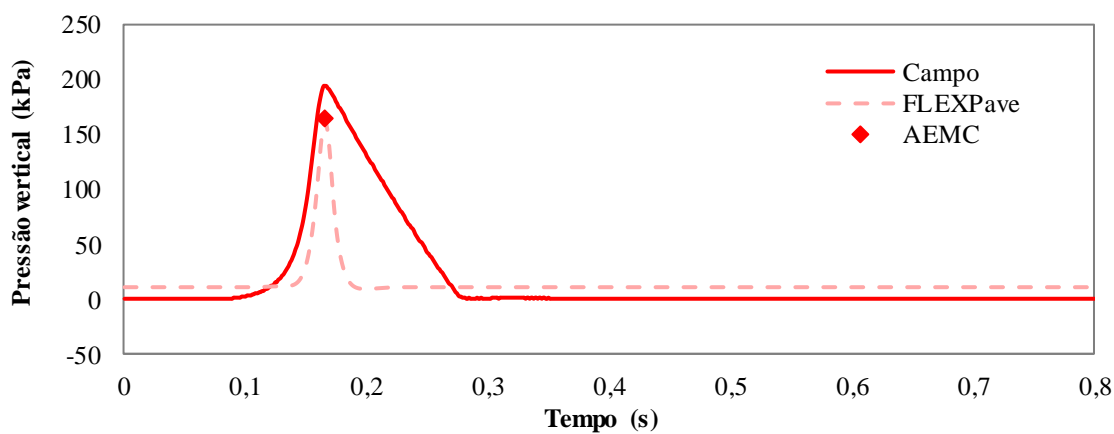
Figura 44 – Pulso de sinais coletados em campo, obtidos em simulações no FlexPAVE™ e valor máximo determinado pelo AEMC para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).



(a)



(b)



(c)

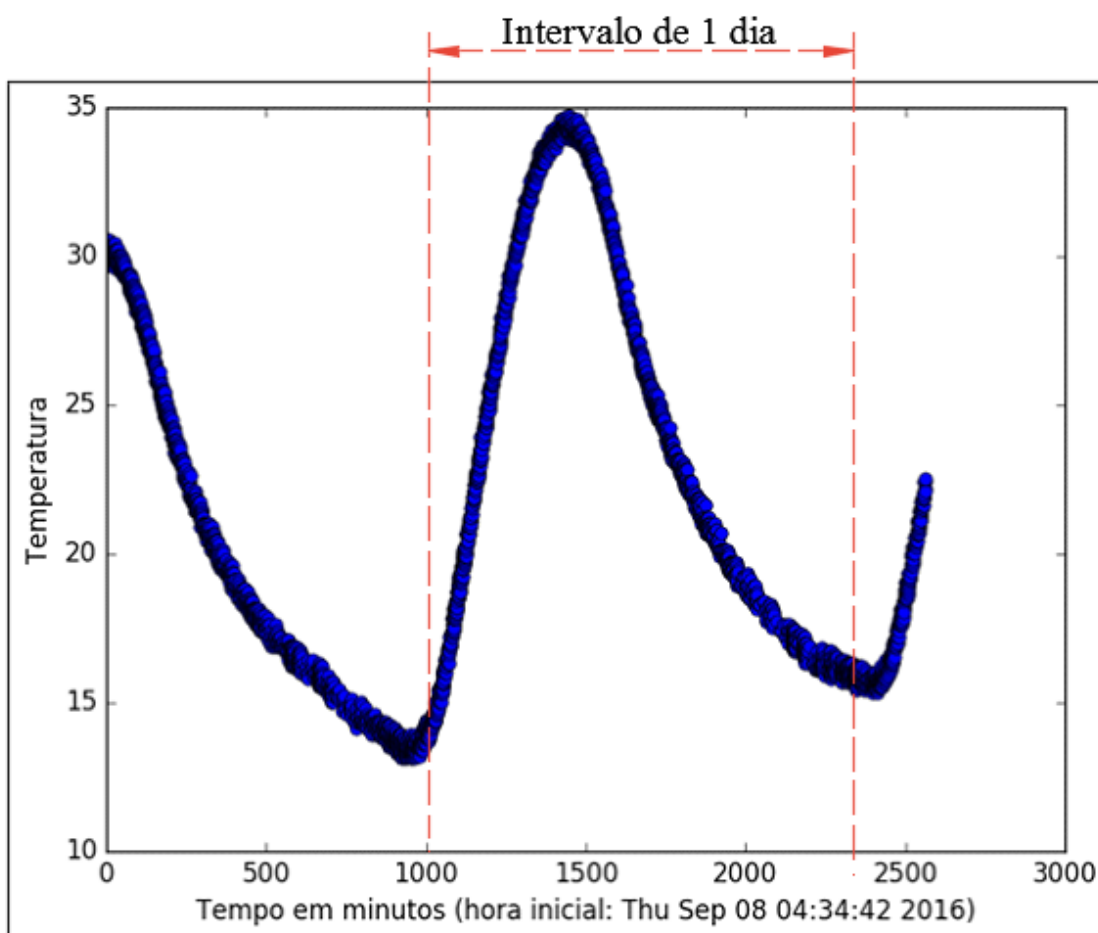
Tabela 5 – Dados de deformação longitudinal, deformação transversal e pressão vertical máximos obtidos pelos sensores e nas simulações para condições semelhantes.

Parâmetros	Campo	FlexPAVE™	AEMC
Def. longitudinal ($\mu\epsilon$)	121	133	157
Def. transversal ($\mu\epsilon$)	82	82	104
Pressão vertical (kPa)	194	162	164

As respostas simuladas do pavimento são consistentes com as medições de campo, validando o sistema de aquisição de dados. Em relação a forma e a magnitude do sinal obtidos pelo FlexPAVE™, a deformação transversal e a deformação longitudinal indicam uma melhor correspondência para o conjunto de dados coletados da instrumentação. O formato da pressão vertical medida pela célula de pressão mostra uma diferença no caminho de descarga em comparação com os dados simulados (Figura 44c). A forma do caminho de descarga está relacionada ao comportamento de relaxamento dos materiais asfálticos e a diferença observada pode ser uma incapacidade do programa em descrever bem esse fenômeno de materiais viscoelásticos.

As respostas de deformação e pressão devem ser analisadas levando em conta a temperatura do pavimento, devido à alta sensibilidade térmica das misturas asfálticas. A Figura 45 apresenta um gráfico da temperatura, em graus Celsius, coletada pelos termopares, no fundo da camada de revestimento, durante um período de aproximadamente 42 horas, onde pode-se verificar uma grande oscilação ao longo do dia e uma amplitude de variação térmica de 22°C, o que influencia de maneira determinante a resposta da estrutura.

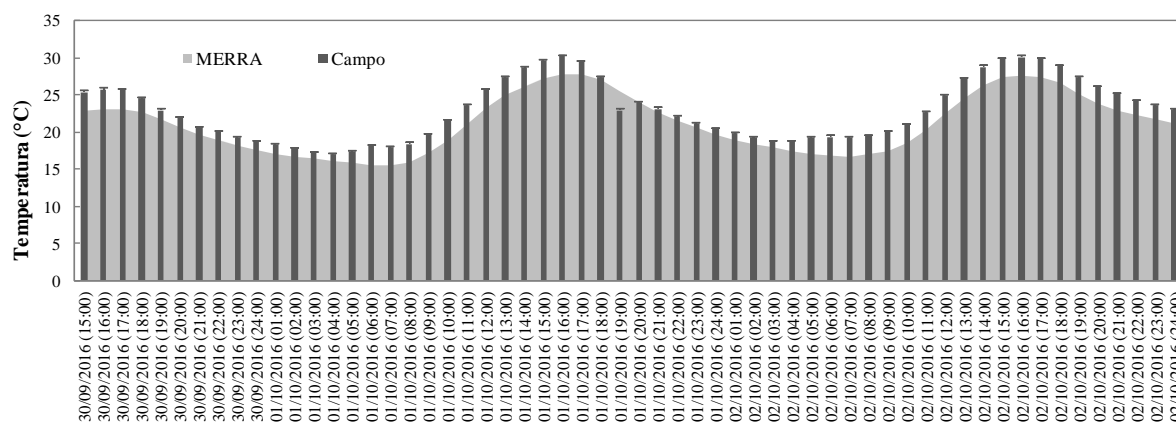
Figura 45 – Coleta de dados de temperatura realizada em 08/09/2016 no trecho instrumentado desta pesquisa.



Para um determinado período de coleta de dados em campo, foram selecionadas as temperaturas, obtidas com os sensores instalados na parte inferior do revestimento, e correlacionadas com temperaturas determinadas por análise do clima no *software* AASHTOWare Pavement-ME, desenvolvido com base no guia proposto pela AASHTO em 2002 para avaliação de desempenho de pavimento, utilizando o banco de dados climáticos do *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (MERRA), o qual é um modelo de reanálise que combina campos modelados computacionalmente com observações terrestres, atmosféricas, oceânicas e por satélite, de abrangência mundial. Os dados climáticos do MERRA incluem temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa e cobertura de nuvens, fornecidos de hora em hora para qualquer local no mundo (incluindo Brasil), com base na localização selecionada, e neste caso foi escolhido um ponto de referência mais próximo do local de instalação dos sensores. Na Figura 46 é apresentada uma seleção de dados coletados em campo no período de 30/09/2016 a 02/10/2016 e os calculados usando os

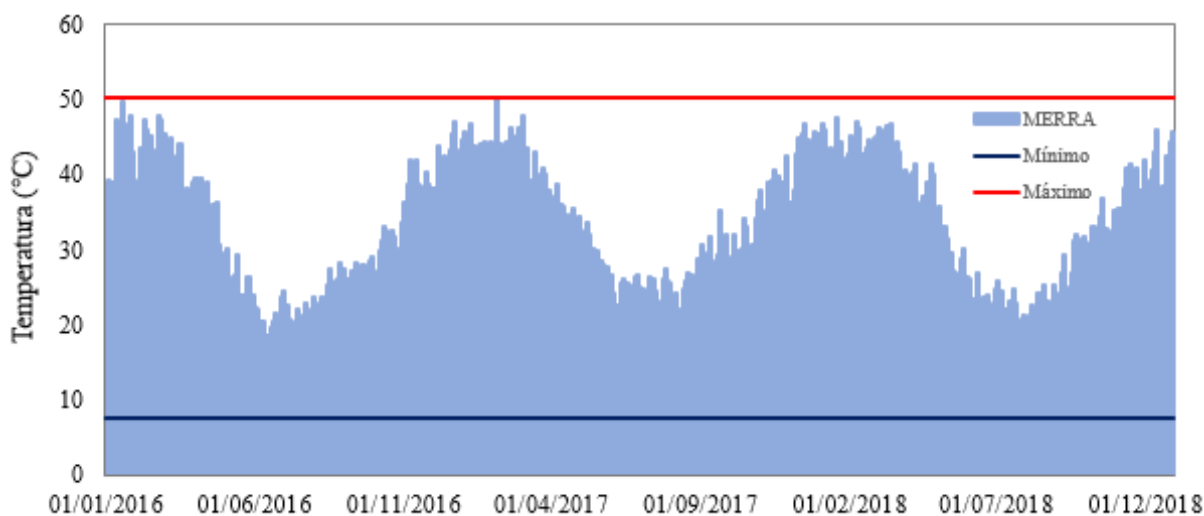
dados climatológicos do MERRA, neste mesmo período, para uma profundidade de 10 cm em relação a superfície do revestimento, podendo-se verificar a semelhança entre ambos.

Figura 46 – Coleta de dados de temperatura realizada em campo no período de 30/09/2016 a 02/10/2016 e calculados a partir do MERRA.



Na Figura 47 constam as temperaturas calculadas a partir dos dados climatológicos do MERRA no período de 01/01/2016 a 31/12/2018, com a localização escolhida próxima ao local de instalação dos sensores, para uma profundidade de 10 cm em relação a superfície do revestimento. Para o período verificado obteve-se uma temperatura mínima de 7,6°C e temperatura máxima de 50,3°C, com uma temperatura média de 26,5°C.

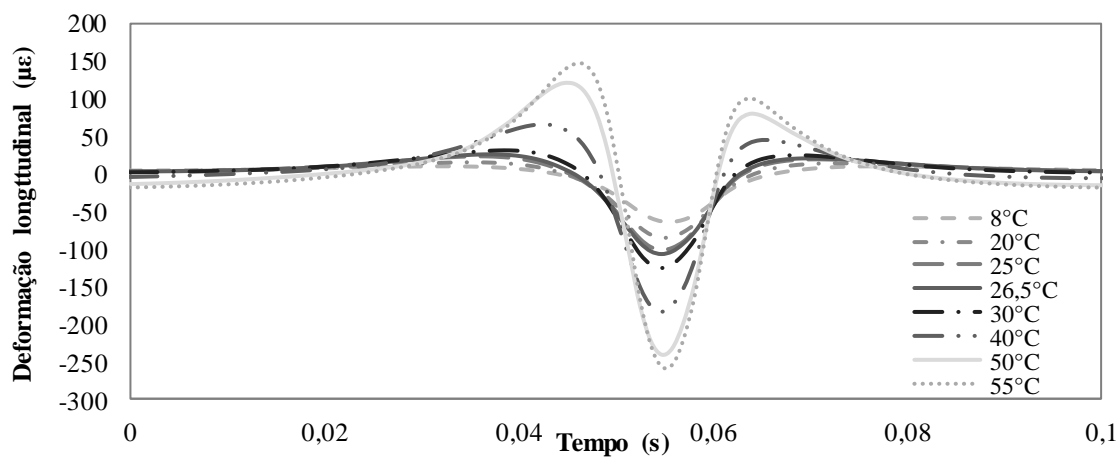
Figura 47 – Dados de temperatura para profundidade de 10 cm calculados a partir do banco de dados climatológico MERRA.



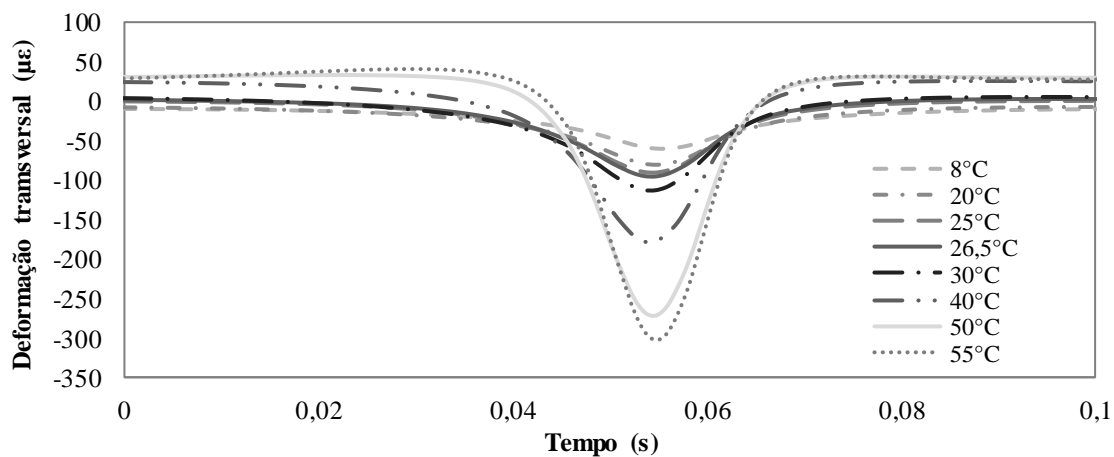
A partir destas verificações de variação de temperatura foram simulados no FlexPAVE™, para a estrutura do pavimento do trecho estudado da BR-116, a resposta do pavimento quanto a deformação longitudinal (Figura 48a), deformação transversal (Figura 48b) e pressão vertical (Figura 48c) para as temperaturas de 8°C, 20°C, 25°C, 26,5°C, 30°C, 40°C, 50°C e 55°C, considerando uma velocidade de 80 km/h (velocidade operacional da rodovia BR-116 no trecho analisado). Em relação às deformações, verificou-se uma variação de 60 $\mu\epsilon$ a 300 $\mu\epsilon$, já para pressão vertical a variação foi de 100 kPa a 350 kPa, mostrando a sensibilidade da resposta mecânica do material em relação à variação de temperatura.

Também foram realizadas simulações no FlexPAVE™ para verificar a resposta do pavimento em função da mudança de velocidade, considerando 30 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h e 100 km/h, empregando a temperatura média obtida no MERRA, de 26,5°C. A Figura 49a apresenta os dados obtidos para deformação longitudinal e a Figura 49b para a deformação transversal, verificando-se que para menores velocidades, 30 km/h, ocorrem as maiores deformações longitudinal e transversal, 125 $\mu\epsilon$ e 113 $\mu\epsilon$, respectivamente. Já para velocidades maiores, no caso 100 km/h, o valor de pico para deformação foi de 104 $\mu\epsilon$, no sentido longitudinal, e de 93 $\mu\epsilon$, no sentido transversal. Isto evidencia que a resposta do concreto asfáltico também é sensível à alteração da frequência de carregamento, porém com menor intensidade, apresentando uma variação de até 22% para as velocidades testadas. Na Figura 49c são apresentados os dados obtidos de pressão vertical, sendo o valor máximo de 158 kPa, para velocidade de 30 km/h, e o valor mínimo encontrado foi de 138 kPa para velocidade de 100 km/h, correspondendo a uma variação de até 15%. A defasagem entre os pulsos ocorre devido a diferença entre os intervalos de tempo considerados, que são inversamente proporcionais às velocidades.

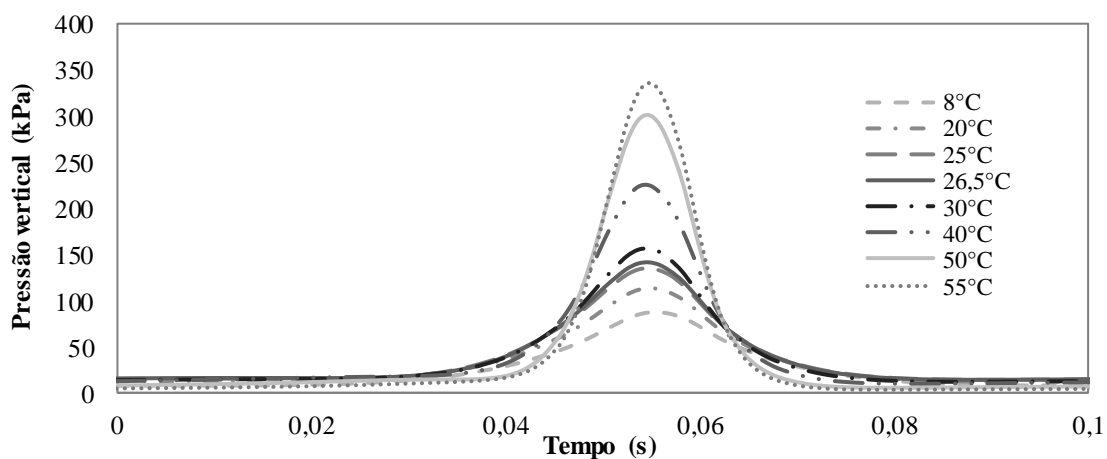
Figura 48 – Pulso de sinais obtidos em simulações no FlexPAVE™ considerando uma velocidade de 80 km/h para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).



(a)

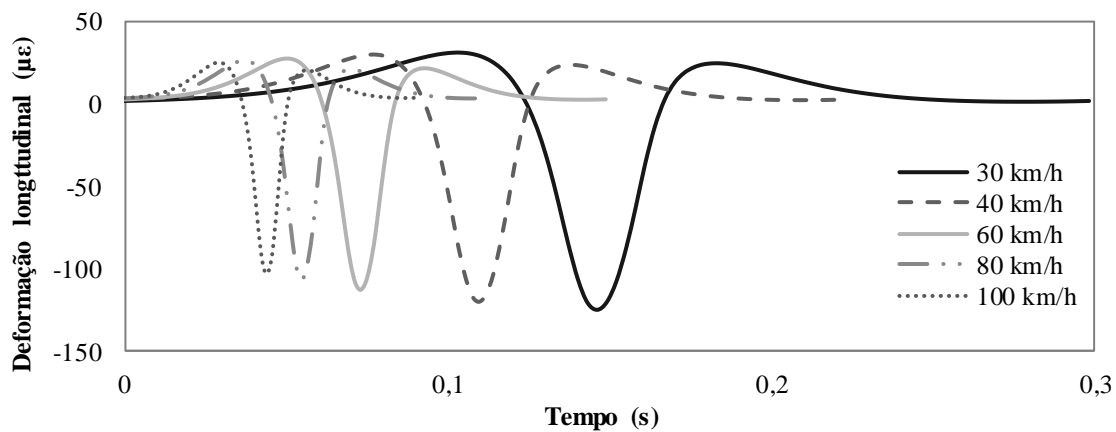


(b)

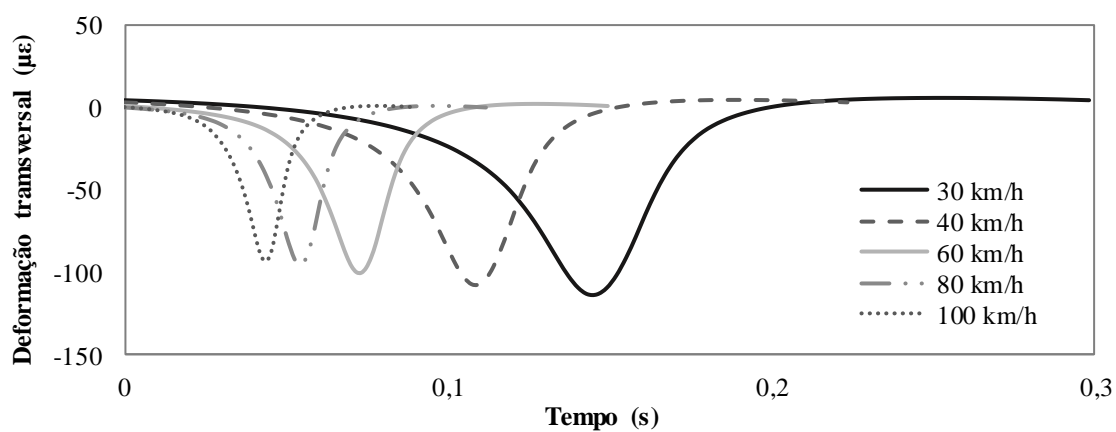


(c)

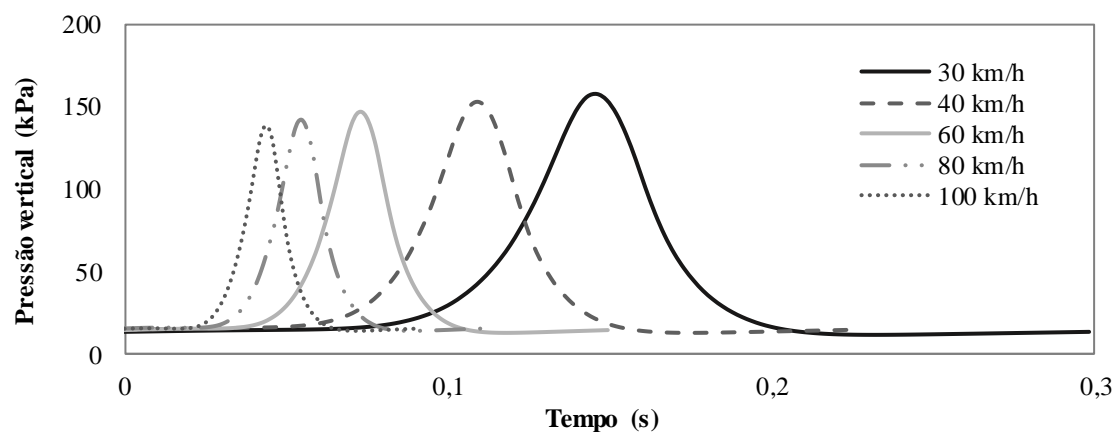
Figura 49 – Pulso de sinais obtidos em simulações no FlexPAVE™ considerando a temperatura de 26,5°C para deformação longitudinal (a), deformação transversal (b) e pressão vertical (c).



(a)



(b)

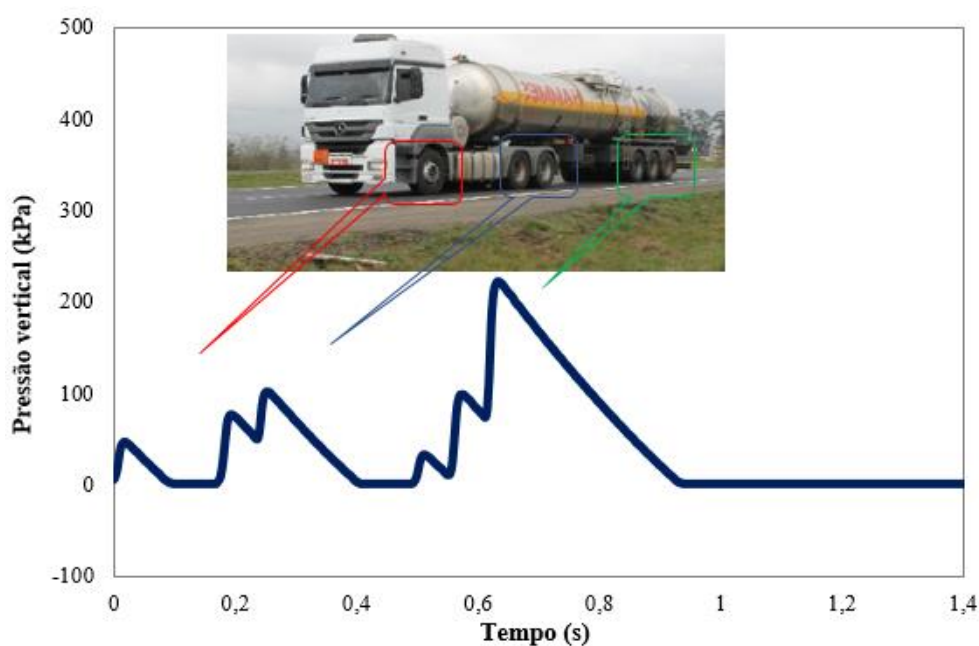


(c)

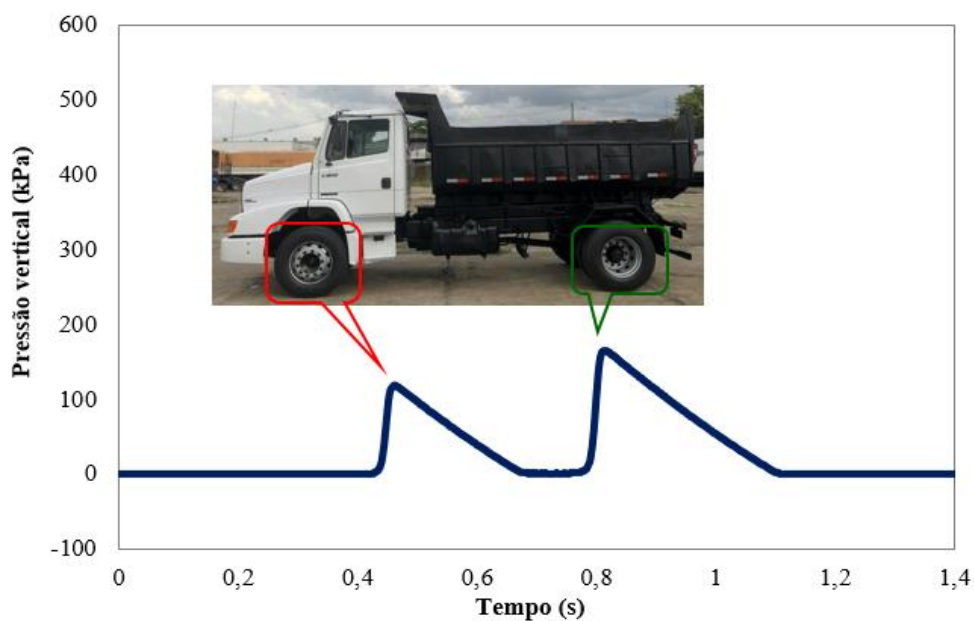
3.7 MONITORAMENTO DE VEÍCULOS EM CAMPO

Foram realizados acompanhamentos em campo com monitoramentos e registros fotográficos dos veículos pesados que trafegavam no trecho. As leituras de pressão, para veículos específicos, são mostradas na Figura 50 e de deformação na Figura 51. Com essas leituras é possível a identificação dos eixos passantes no trecho monitorado e as respectivas pressões inferidas ao pavimento.

Figura 50 – Acompanhamento em campo da coleta de dados das células de pressão para veículos específicos.

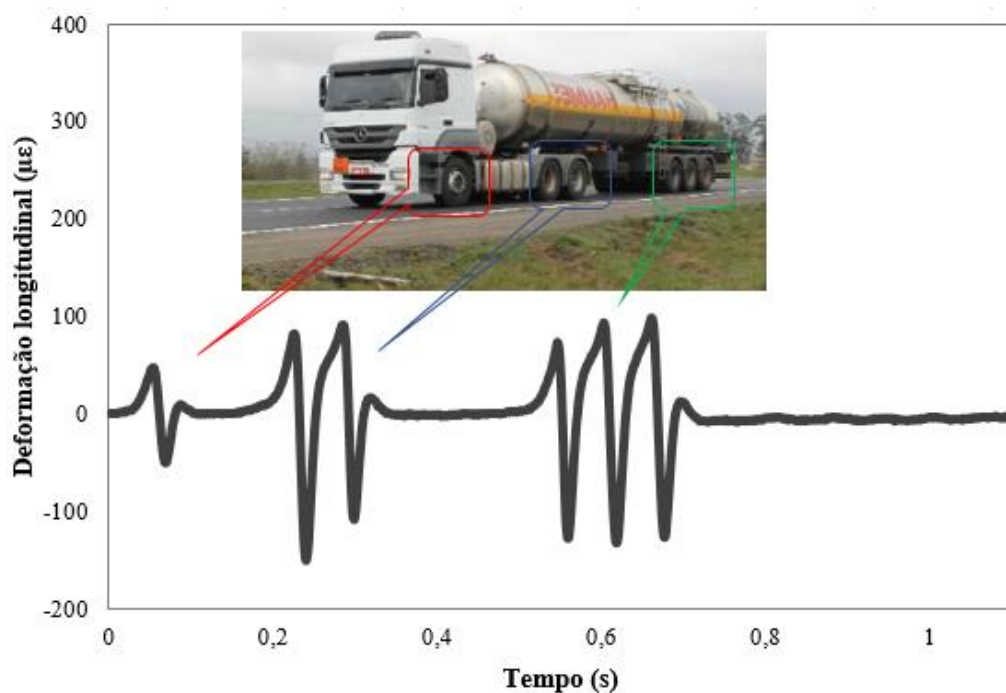


(a)

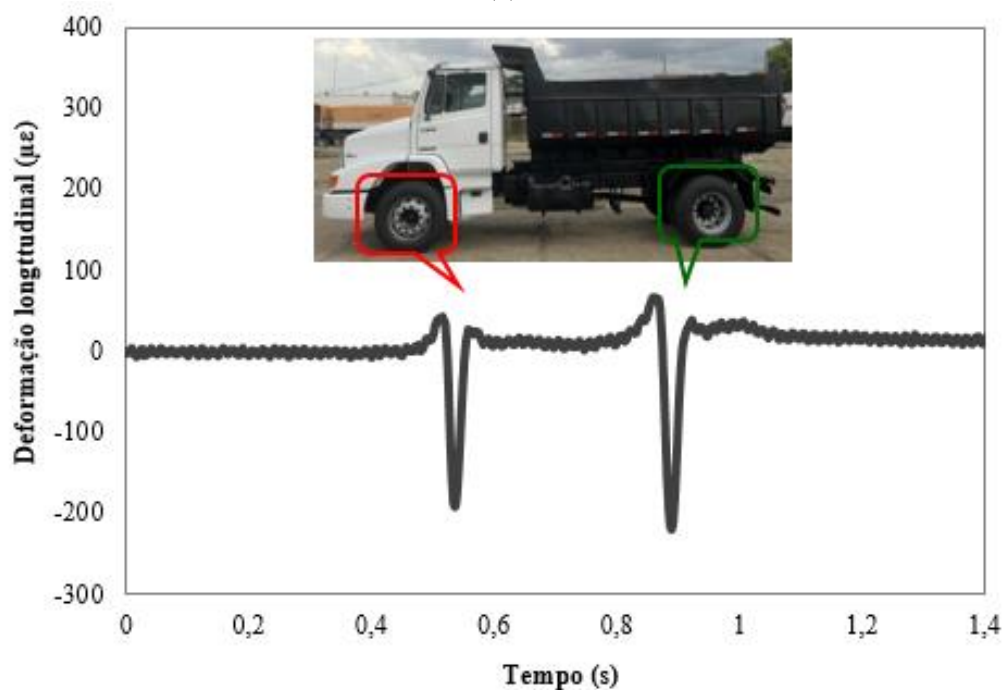


(b)

Figura 51 – Acompanhamento em campo da coleta de dados dos sensores de deformação para veículos específicos.



(a)



(b)

É notável, pelos sinais de pressão vertical, a energia estocada pelo material, que é dissipada mais lentamente no descarregamento, por se tratar de um material viscoelástico. Desta forma, há uma sobreposição dos efeitos de carga quando da passagem de um eixo duplo ou triplo. Este efeito deve ser levado em conta para o cálculo do laço de histerese.

Na Figura 52, Figura 53 e Figura 54 são apresentados sinais de dados de deformação longitudinal, transversal e a 45°, respectivamente, enquanto na Figura 55 são mostrados dados de pressão vertical, coletados para um grupo de veículos nos dias 30/09/2016 e 01/10/2016 no período das 15:20 às 06:05, com temperaturas coletadas pelos sensores instalados na base do revestimento variando de 19°C à 30°C. A letra “N” representa o veículo e o número, que acompanha a letra, a sua posição de coleta no banco de dados da série selecionada, por exemplo, “N4” corresponde aos dados coletados do quarto veículo no período selecionado.

Observa-se a excelente qualidade dos sinais obtidos, podendo-se identificar os tipos de eixos para cada veículo, bem como os picos de deformação, até 150 $\mu\epsilon$, e pressão vertical, com valor de no máximo 150 kPa, para esta gama de veículos selecionados, corroborando com os dados simulados para condições semelhantes.

Figura 52 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação longitudinal.

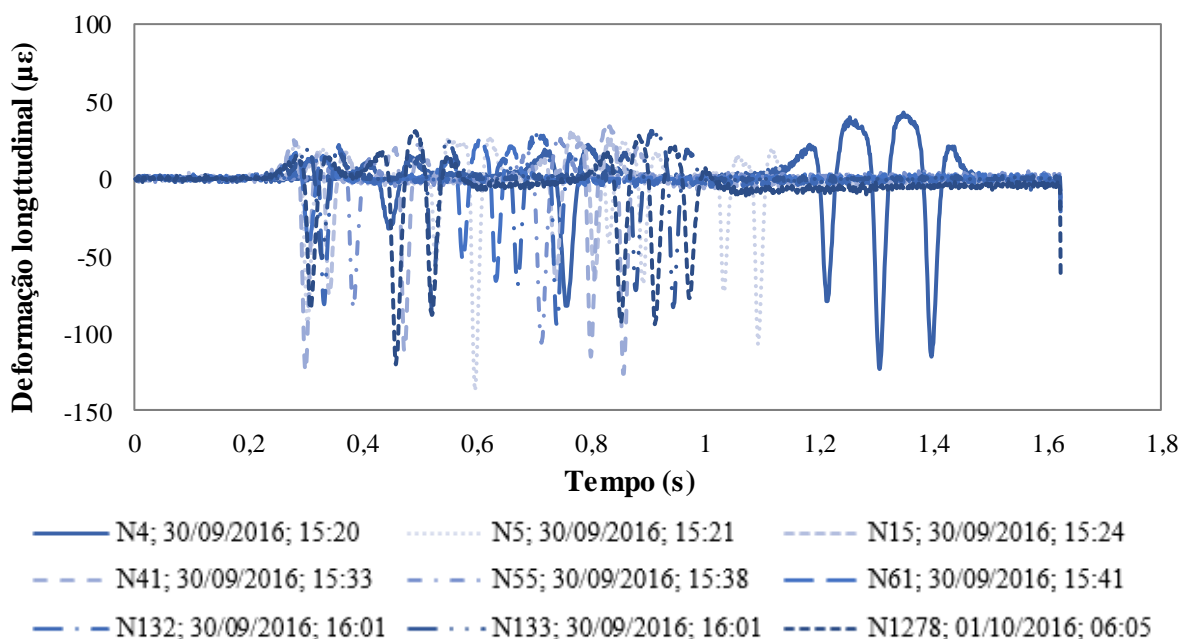


Figura 53 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação transversal.

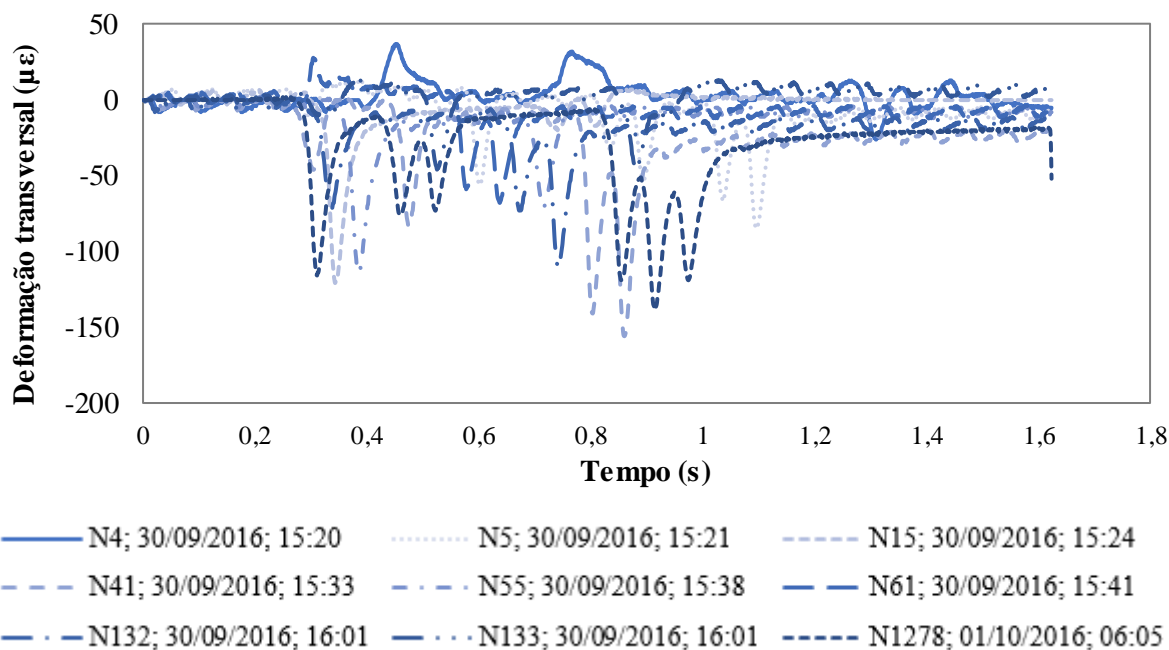


Figura 54 – Pulso de sinais coletados em campo para deformação a 45°.

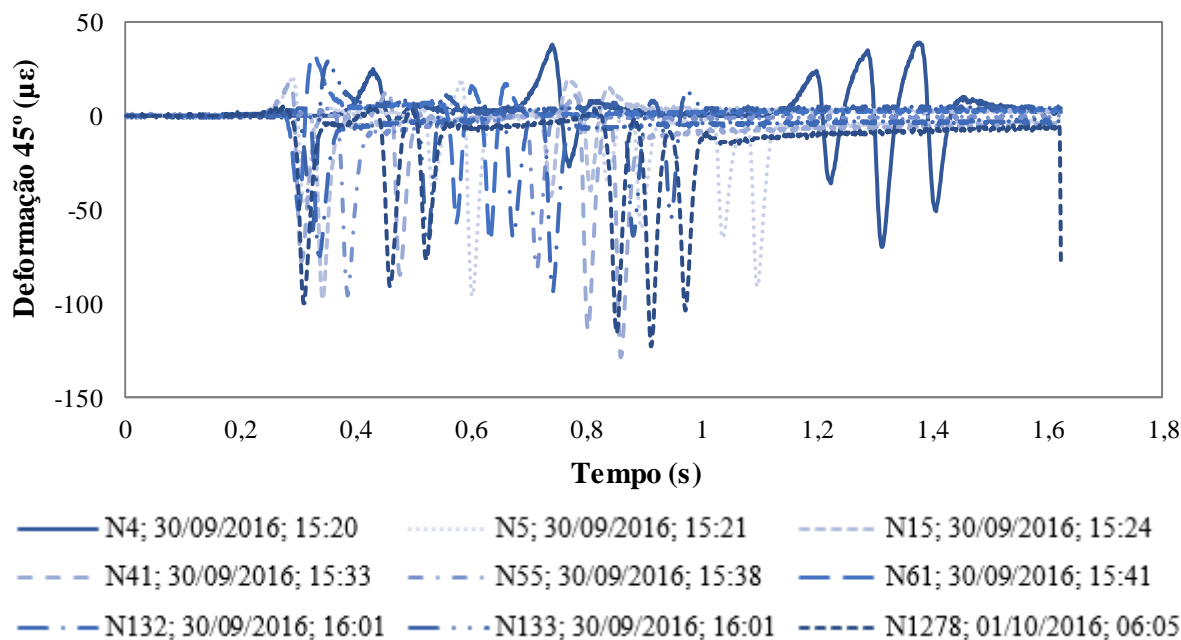
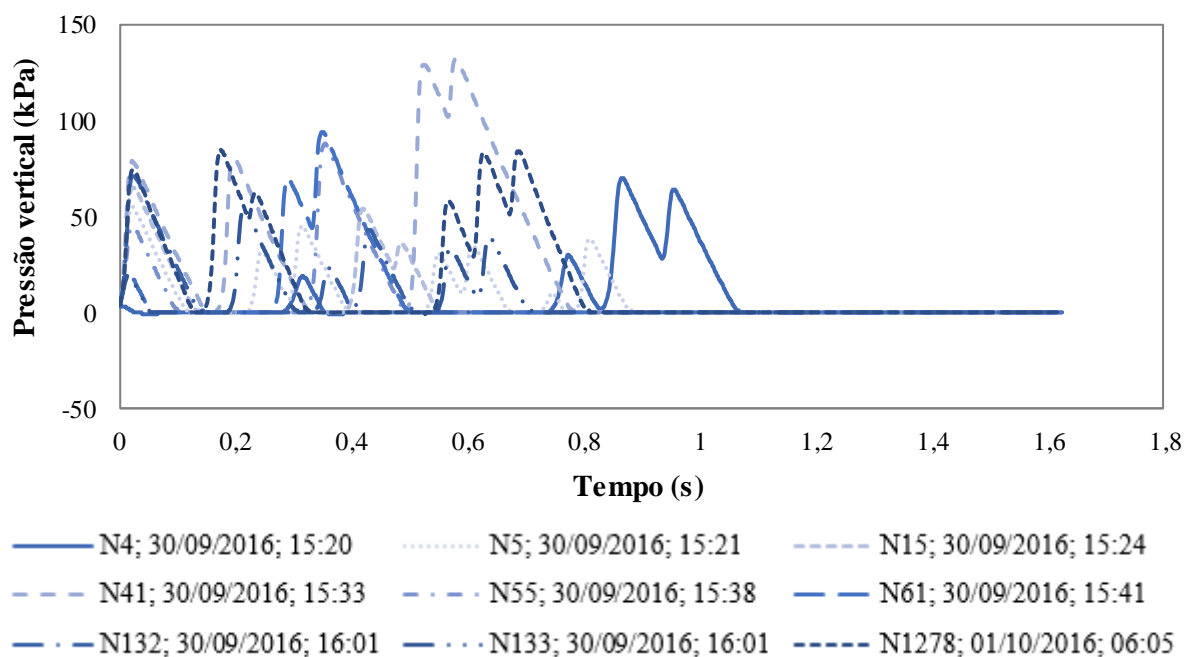
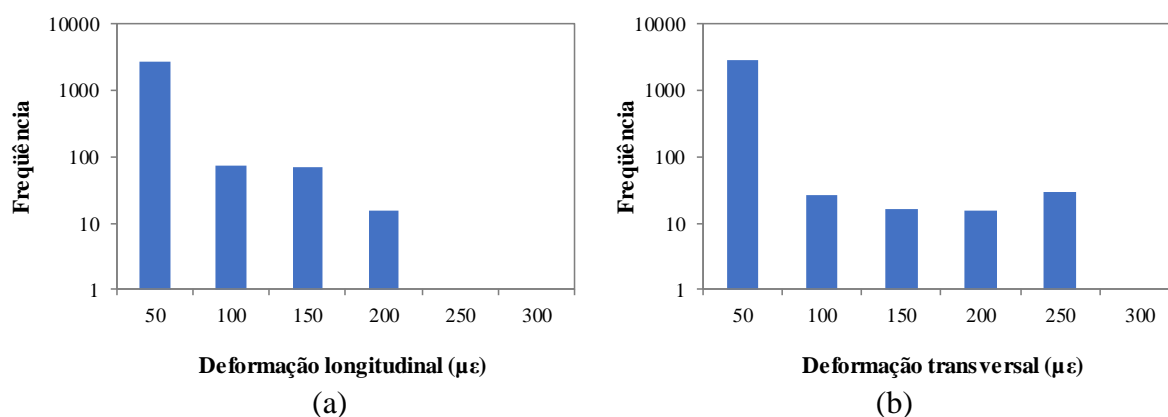


Figura 55 – Pulso de sinais coletados em campo para pressão vertical.



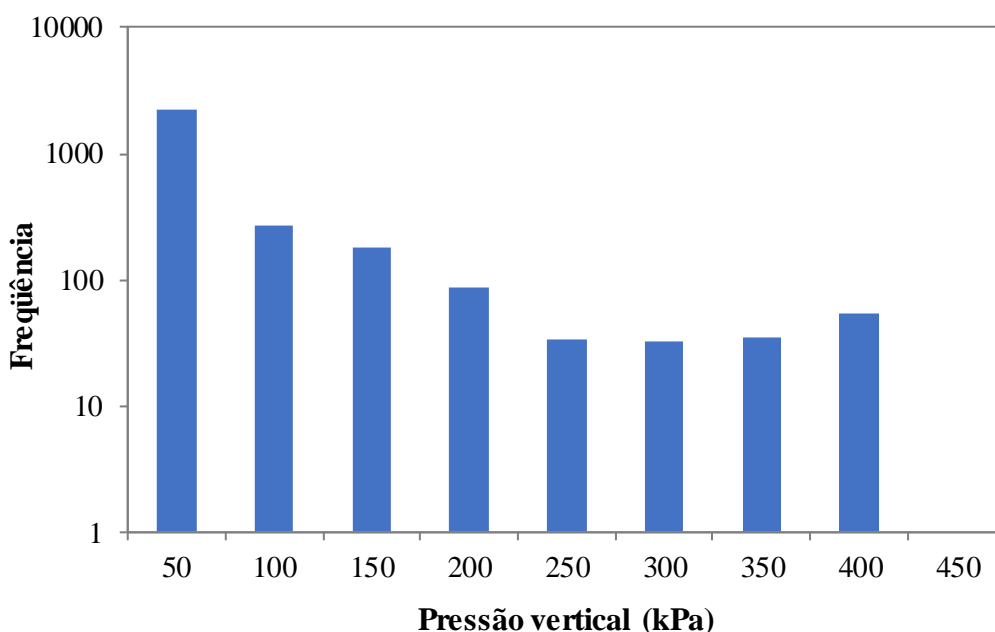
Em função das variáveis existentes, as análises do nível de pressão e deformação obtidos ao longo do tempo devem ser feitas com coletas de séries de eventos. O histograma para uma série com 3000 eventos é apresentado na Figura 56, onde é possível observar que as deformações, para este caso, não excedem o valor de 300 $\mu\epsilon$. Vale ressaltar que nas simulações da passagem de um eixo padrão (eixo simples de rodas duplas - ESRD) com carga legal (10 toneladas por eixo), considerando a estrutura do trecho, os valores de deformação de tração foram em torno de 150 $\mu\epsilon$, considerando o módulo de resiliência do concreto asfáltico a uma temperatura de 25°C.

Figura 56 – Distribuição das deformações longitudinais (a) e deformações transversais (b) para uma série de 3000 eventos.



Em relação às pressões, os dados obtidos para a mesma série indicam que o nível de pressão vertical geralmente fica abaixo dos 450 kPa, conforme apresentado no histograma de pressões da Figura 57. Observa-se uma maior ocorrência dos valores de 50 kPa até valores próximos à 200 kPa. O sistema possui uma sensibilidade para aquisição até mesmo de alguns tipos de veículos leves, podendo o valor de 50 kPa estar associado com estes tipos de veículos, justificando a maior ocorrência. O valor de 200 kPa é próximo ao valor obtido em simulações para o eixo simples de rodas duplas com carga de 10 toneladas, dependendo da posição em que o eixo se encontra em relação ao sensor.

Figura 57 – Distribuição das pressões verticais para uma série de 3000 eventos.



Em função da distribuição dos sensores na pista, o sistema mede a tensão vertical, pela célula de pressão, com defasagem de tempo. Esta defasagem é proporcional a distância entre os sensores, nesta instalação a distância foi de um metro, e a velocidade dos veículos que trafegam na rodovia. Para que se possa realizar o alinhamento destes sinais e fazer análises dependentes do tempo, reconfigurou-se o sistema para realizar a medida simultânea das duas células de pressão, além dos três *strain gages*. Considerando a instalação da primeira fase, a segunda célula de pressão (CP 1 MPa) foi posicionada a 5 m da primeira célula (CP 2,5 MPa). A partir da medida de pressão, nestes dois sensores, pode-se determinar o tempo que o veículo leva para percorrer os cinco metros (distância entre as células de pressão), com isso, determina-se a sua velocidade e, conseqüentemente, o tempo de atraso para cada evento. A Figura 58 mostra o sinal das duas células de pressão, além do sinal dos *strain gages*, como medido pelo sistema.

Em pós processamento, e utilizando a velocidade estimada, os sinais de tensão da célula posicionada a um metro dos *strain gages* são atrasados para alinhar estes sinais. Esta nova situação é mostrada na Figura 59.

Figura 58 – Sinais lidos pelo sistema, incluindo a segunda célula de pressão nesta pesquisa.

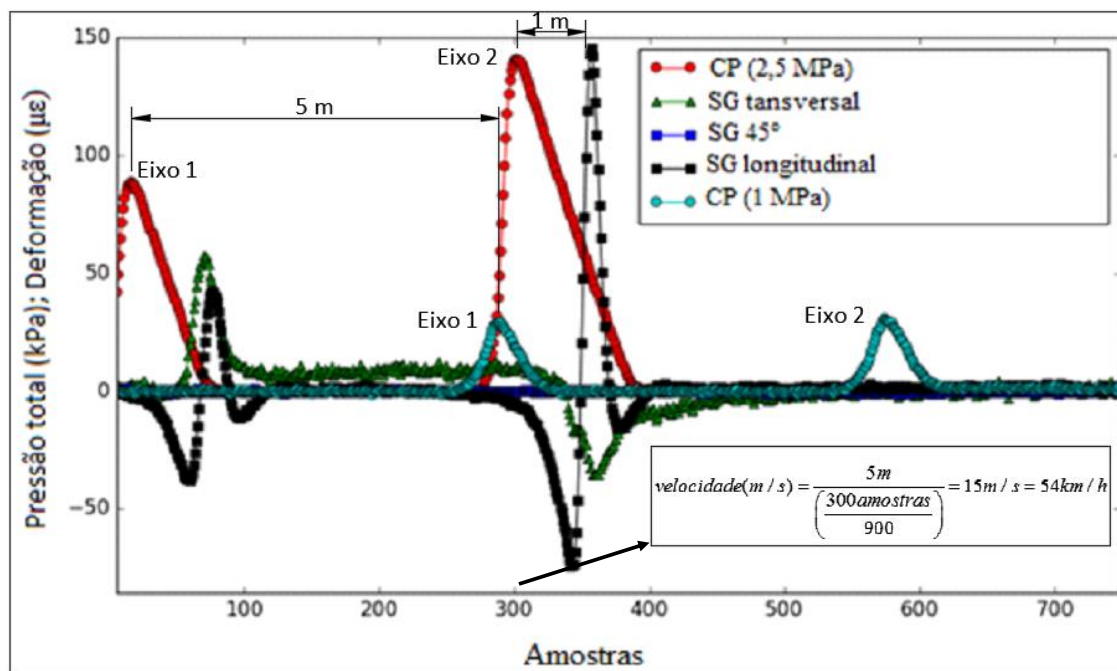
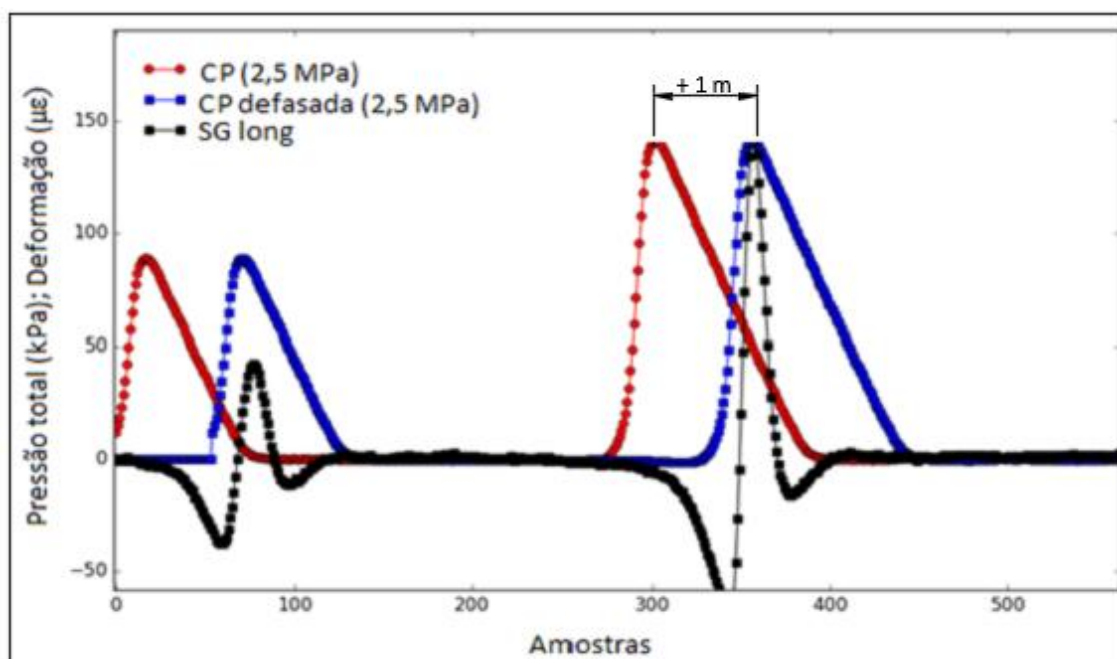
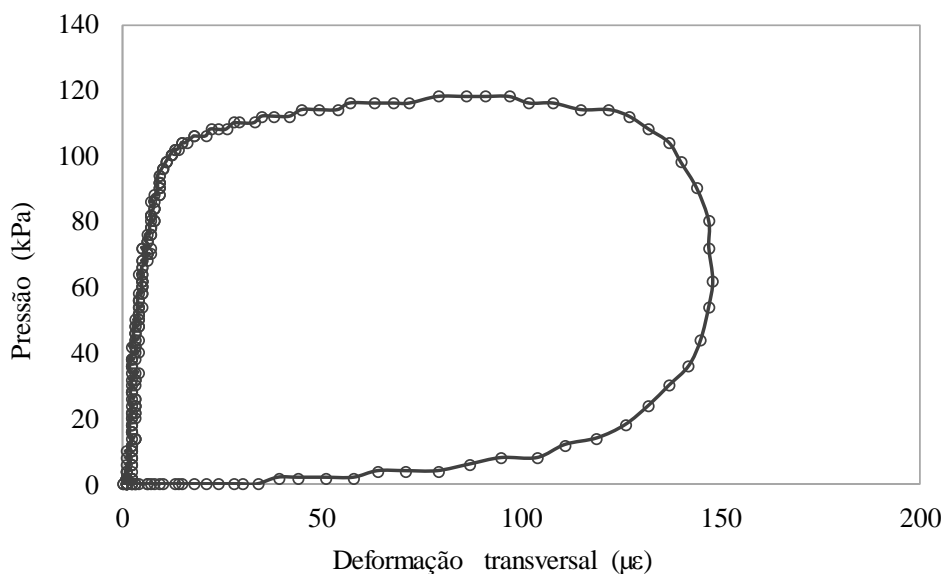


Figura 59 – Sinal alinhado no tempo, com o uso da medida de velocidade estimada pela leitura da segunda célula de pressão nesta pesquisa.



Os sinais alinhados permitem a geração de curvas como o laço de histerese apresentado na Figura 60, onde são plotados os valores de pressão *versus* os valores de deformação. A partir desses laços é possível calcular a energia dissipada em campo e analisar em conjunto com os dados de energia obtidos em laboratório.

Figura 60 – Laço de histerese obtido com os dados coletados em campo.



A ideia de localização e arranjo da instalação dos sensores se deu com o intuito de gerar dados por um período mínimo de um ano, filtrando dados coletados de deformação e pressão para a temperatura representativa do período de avaliação e, com isso, determinar a energia dissipada *versus* o tráfego da rodovia. Com a evolução da energia dissipada em função do tráfego, buscava-se determinar um fator de transferência para aplicar na energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga em laboratório e, assim, correlacionar a ruptura do material em laboratório com o surgimento de trincas no campo. Ou seja, tipicamente o período de um ano é pequeno para determinar a evolução da fadiga; com o auxílio da instrumentação, no entanto, seria possível com este pequeno ramo da evolução da energia dissipada, localizar a referida taxa, numa curva de fadiga realizada em laboratório, permitindo, assim, uma combinação unívoca de seu comportamento. Isto permitiria estabelecer a relação entre o comportamento de campo e laboratório com base na instrumentação com este “pequeno” período de tempo e estimar o comportamento futuro daquele pavimento para as condições de tráfego atuantes.

O volume de dados coletados foi grande, com aproximadamente 361 mil veículos, contabilizando as duas fases de instalação, em um período de 10 meses. No entanto, dada a

limitação de tempo do projeto RDT, do qual este trabalho fez parte, problemas de vandalismo e furto, necessidade de filtrar os dados devido ao posicionamento do eixo em relação ao sensor e a interpretação complexa dos dados sobrepostos de pressão, não foi possível verificar a evolução da energia dissipada ao longo do tempo. Contudo, há a possibilidade de utilização dessa metodologia de análise para avaliação da degradação do pavimento em relação à fadiga.

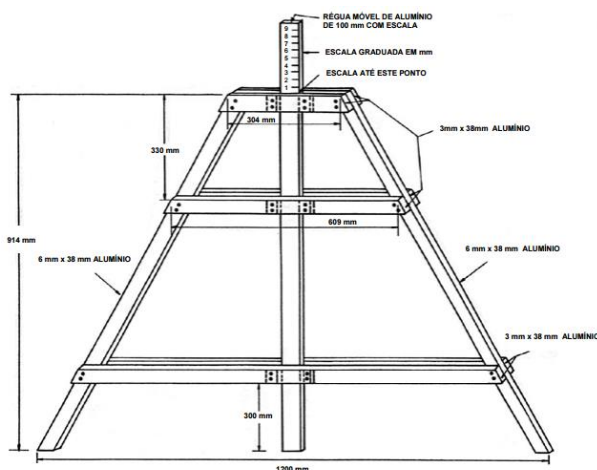
4 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DO PAVIMENTO DA BR-116

No trecho da BR 116 foram realizados levantamentos para acompanhar as condições funcionais e estruturais do pavimento perante o tráfego imposto. O monitoramento da condição funcional foi realizado com ensaios para determinação do afundamento de trilha de roda (ATR), avaliação da resistência à derrapagem e avaliação visual das condições de superfície do pavimento. A avaliação da condição estrutural do pavimento deu-se por levantamentos de deflexões pontuais com viga Benkelman.

4.1 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EM CAMPO

Os levantamentos de afundamentos nas trilhas de roda (ATR) foram realizados com a utilização de uma treliça metálica com leituras em ambas as trilhas da faixa estudada (faixa externa), considerando a região onde os sensores da instrumentação foram instalados. O princípio de funcionamento da treliça metálica é simples e segue os procedimentos descritos na norma DNIT 006 (DNIT, 2003b). A treliça fica apoiada em pontos fora da trilha de roda com uma régua móvel no centro, apoiada em um ponto dentro da trilha (Figura 61). A marcação “zero” da régua se dá quando esta se encontra no mesmo nível dos apoios laterais, ou seja, não há afundamento. À medida que o afundamento existe, a régua ficará desnivelada em relação aos apoios, e o valor deste desnível pode ser lido na régua.

Figura 61 – Treliça de alumínio utilizada na medição dos afundamentos nas trilhas de roda.



A condição superficial do pavimento pode ser avaliada pela presença de uma série de defeitos quantificados e medidos de forma objetiva, gerando um inventário de defeitos. Os defeitos de superfície são considerados os danos ou deteriorações que surgem na superfície dos pavimentos asfálticos, podendo ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia descrita na norma DNIT 005 (DNIT, 2003a), sendo eles: fissura, trinca, afundamento, ondulação, escorregamento, exsudação, desgaste, panela e remendo. Identificar e classificar os tipos de defeitos de um pavimento é importante para um adequado sistema de gerência, sendo possível diagnosticar de maneira correta as causas dos mesmos e adotar medidas corretivas, garantindo uma maior vida útil do pavimento.

A resistência a derrapagem de um pavimento é uma característica funcional de extrema importância para a segurança dos usuários das rodovias. Um pavimento deve ter microtextura e macrotextura adequadas para que possa garantir ao usuário uma boa aderência pneu-pavimento. O trecho foi avaliado em relação a microtextura utilizando o ensaio de pêndulo britânico, enquanto a macrotextura foi com o ensaio de mancha de areia.

O ensaio de pêndulo britânico consiste em um equipamento dinâmico (Figura 62) que mede a perda de energia de um pêndulo calibrado e com características conhecidas, provido de uma sapata de borracha na extremidade, quando este é liberado de uma certa altura e a sapata toca na superfície do pavimento, que é mantida molhada para simular uma situação crítica de aquaplanagem. O valor medido pelo pêndulo é relacionado com o atrito entre pneu e pavimento, expresso em BPN (*British Pendulum Number*) ou, em português, VRD (Valor de Resistência à Derrapagem). Este valor de atrito é obtido realizando-se cinco lançamentos da sapata contra o pavimento, sendo a primeira medida descartada, e com as leituras seguintes faz-se o cálculo do valor médio do VRD. No Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT IPR-720, 2006) constam as classes de microtexturas (Tabela 6) de uma superfície de acordo com o VRD, sendo recomendado valores de $VRD \geq 55$ (superfície medianamente rugosa a rugosa).

Figura 62 – Pendulo Britânico utilizado para determinar a resistência à derrapagem.



Tabela 6 – Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico (DNIT IPR-720, 2006).

Classificação	Limites de VRD
Perigosa	< 25
Muito Lisa	25 - 31
Lisa	32 - 39
Insuficientemente Rugosa	40 - 46
Medianamente Rugosa	47 - 54
Rugosa	55 - 75
Muito Rugosa	> 75

O ensaio de mancha de areia consiste em se tomar um volume determinado de areia com granulometria padrão, verter sobre o pavimento e, utilizando uma haste com base de borracha, espalhar a areia com movimentos circulares até o completo espalhamento. À medida que a mancha vai aumentando a areia vai preenchendo as irregularidades na superfície do pavimento. A leitura do ensaio é dada pelo diâmetro médio da mancha, a partir do qual é calculada a espessura média da mancha de areia, uma vez que o volume inicial de areia é conhecido (Figura 63). O resultado do ensaio é a altura de areia (HS) (equação (66)) e, o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT IPR-720, 2006) também especifica os limites de macrotextura de uma superfície em função do HS (Tabela 7). A faixa recomendada pelo DNIT IPR-720 (2006) para os valores da altura média da mancha de areia é $0,6 \text{ mm} < \text{HS} < 1,2 \text{ mm}$ (superfície com textura média a grossa).

Figura 63 – Ensaio de mancha de areia.



$$HS = \frac{V \times 4}{D_m^2 \times \pi} \quad (66)$$

Onde: HS - altura média da mancha (mm); V - volume de areia (25.000 mm³); D_m - diâmetro médio da mancha (mm).

Tabela 7 – Classes de macrotextura pelo método da mancha de areia (DNIT IPR-720, 2006).

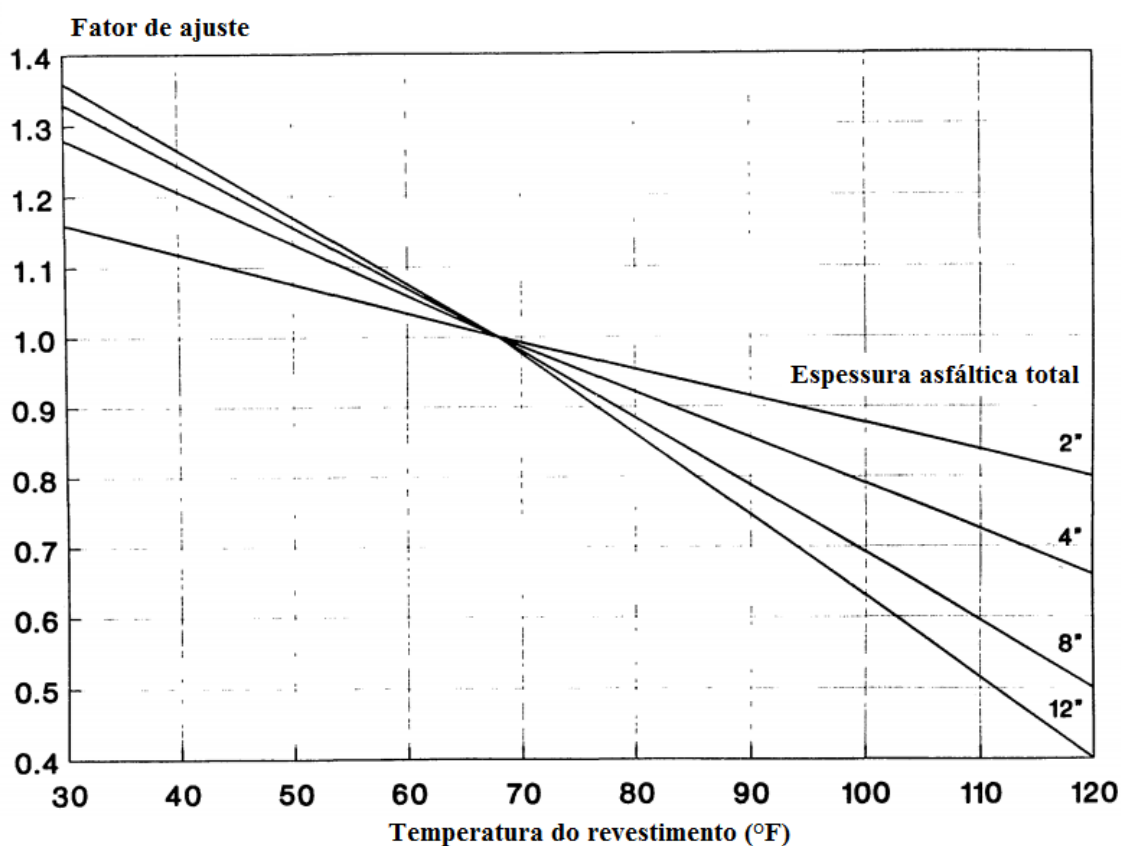
Classificação	Limites de HS
Muito Fina	<0,20
Fina	0,21 - 0,40
Média	0,41 - 080
Grossa	0,81 - 1,20
Muito Grossa	>1,20

A condição estrutural do pavimento monitorado foi avaliada com levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman (Figura 64), de acordo com os procedimentos descritos na norma DNER 024 (1994). Os levantamentos foram realizados usando um caminhão com eixo traseiro simples de rodas duplas com carga controlada de 8,2 toneladas e pressão de inflação dos pneus de 560 kPa. Durante estes levantamentos foram realizadas medidas da temperatura da superfície do pavimento com um termômetro digital, tendo-se o cuidado para que as leituras fossem feitas entre às rodas traseiras do semi-eixo do caminhão. Para as medidas de deflexão realizadas com uma temperatura diferente de 20°C, temperatura de referência considerada pelo AASHTO (1993), foi aplicado um fator de ajuste (Figura 65), em função da temperatura e da espessura do revestimento, devido as alterações das propriedades viscoelásticas da mistura asfáltica que compõem o revestimento.

Figura 64 – Levantamento de campo com a viga Benkelman.



Figura 65 – Fator de ajuste da deflexão em função da temperatura na superfície e espessura do revestimento asfáltico (adaptado de AASHTO, 1993).



4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO

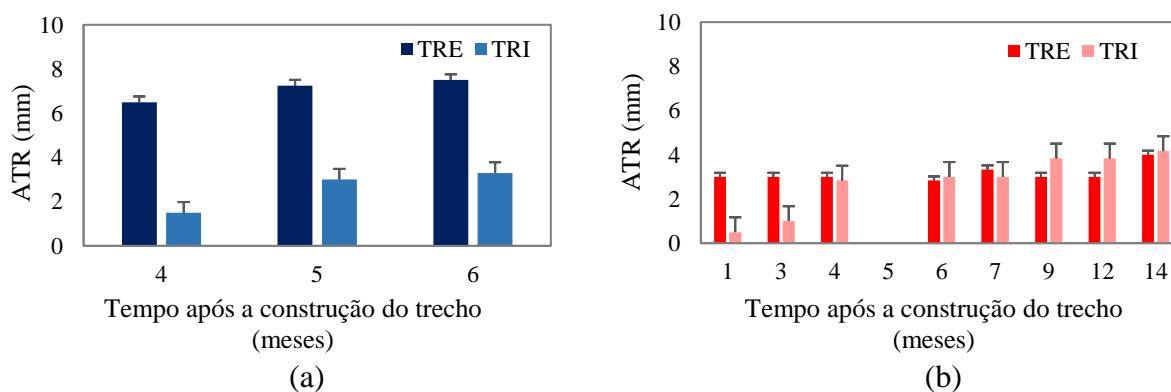
Os levantamentos no trecho, correspondente a primeira fase executada em julho de 2016, foram realizados no 4° (novembro), 5° (dezembro) e 6° (janeiro) mês após a construção do segmento em quatro pontos, próximos ao local de instalação dos sensores: dois pontos localizados no lado esquerdo da faixa externa e dois no lado direito da mesma faixa. Na segunda fase, executada em

fevereiro de 2017, os levantamentos foram feitos no 1° (março), 3° (maio), 4° (junho), 6° (agosto), 7° (setembro), 9° (novembro), 12° (fevereiro) e 14° (abril) mês após a construção em seis pontos, próximos ao local de instalação dos sensores: três pontos localizados no lado esquerdo da faixa externa e três no lado direito da mesma faixa. Devido a problemas operacionais não foi possível realizar os levantamentos durante os meses iniciais da primeira fase.

A Concessionária realizou entre o 3°- 4° mês da segunda fase a aplicação de microrrevestimento e entre o 9°- 12° mês a microfresagem e aplicação de microrrevestimento no trecho. Estas intervenções não eram programadas para o trecho, e acabou interferindo nas condições de superfície e nos levantamentos, não sendo possível acompanhar a evolução do trincamento ao longo do tempo.

O afundamento de trilha de roda foi medido em ambas as fases de construção do revestimento do trecho, nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), ao longo dos meses de levantamento após a construção. Na Figura 66a são apresentados os resultados de ATR medidos na trilha de roda interna e externa para a primeira fase e na Figura 66b os ATRs medidos na segunda fase de execução do trecho. Percebe-se que o nível de afundamento evoluiu de forma significativa no segmento da primeira fase, com maiores valores obtidos na trilha de roda externa, sendo este um dos motivos pelo qual foi necessária uma intervenção da Concessionária neste segmento, necessitando remoção dos sensores para recapeamento no local da instalação, e implicando na interrupção temporária dos levantamentos e coleta de dados. Já o segmento da segunda fase apresentou valores de ATR dentro dos limites máximos permitido para este trecho (ATR de no máximo 5 mm).

Figura 66 – Afundamento de trilha de roda interno (TRI) e externo (TRE) coletados na primeira (a) e segunda (b) fase de construção.



Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de ATR, de ambas as fases, levantados nas trilhas de roda externa e interna. Pode-se observar que, em geral, os afundamentos nas trilhas de roda externas foram maiores. Isto também foi constatado por Mattos (2014), Bock (2016) e Luz (2017), podendo ter ocorrido devido à declividade da pista, fazendo com que ocorra maior concentração de cargas do tráfego na trilha de roda externa, e o menor confinamento na borda externa da pista.

Tabela 8 – Média dos valores de ATR (mm) obtidos ao longo do monitoramento do trecho.

Dados	Primeira fase		Segunda fase	
	Trilha de roda externa	Trilha de roda interna	Trilha de roda externa	Trilha de roda interna
Média	7,1	2,6	3,1	2,8
Desvio Padrão	0,5	1,0	0,4	1,3
Coefficiente de variação (%)	7,3	37,1	11,8	48,4

Para verificação da micro e macrotextura do revestimento foram realizados ensaios com uso do pêndulo britânico e mancha de areia, respectivamente, nos segmentos de ambas as fases de construção do revestimento. Na Figura 67 estão apresentados os resultados de microtextura superficial e na Figura 68 os valores de altura da mancha de areia, em função dos meses após construção do revestimento do trecho.

Figura 67 – Resultados de pêndulo britânico no trecho.

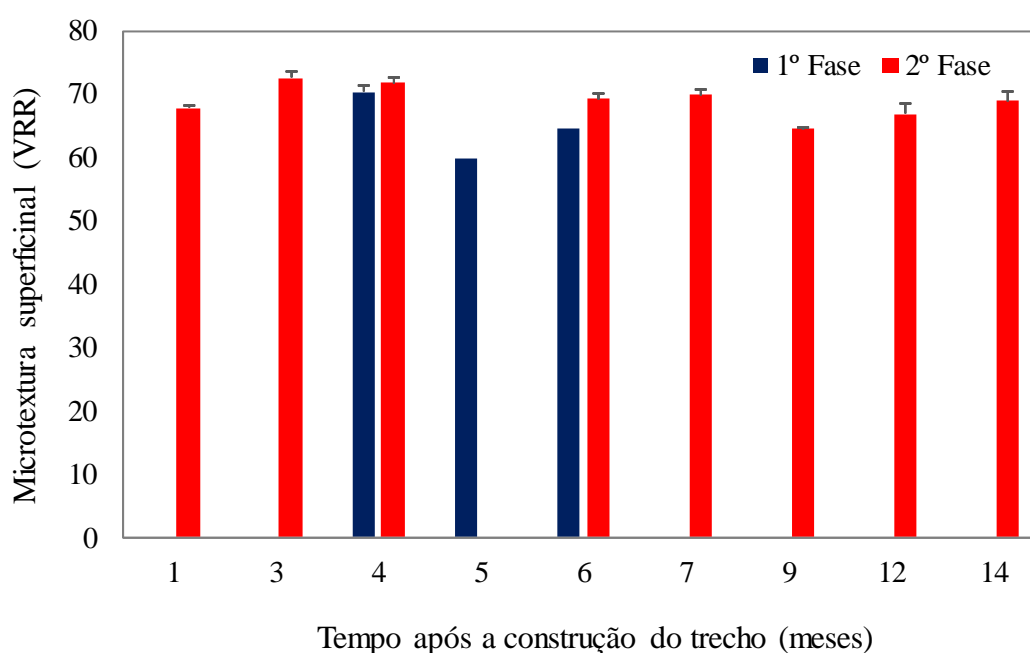
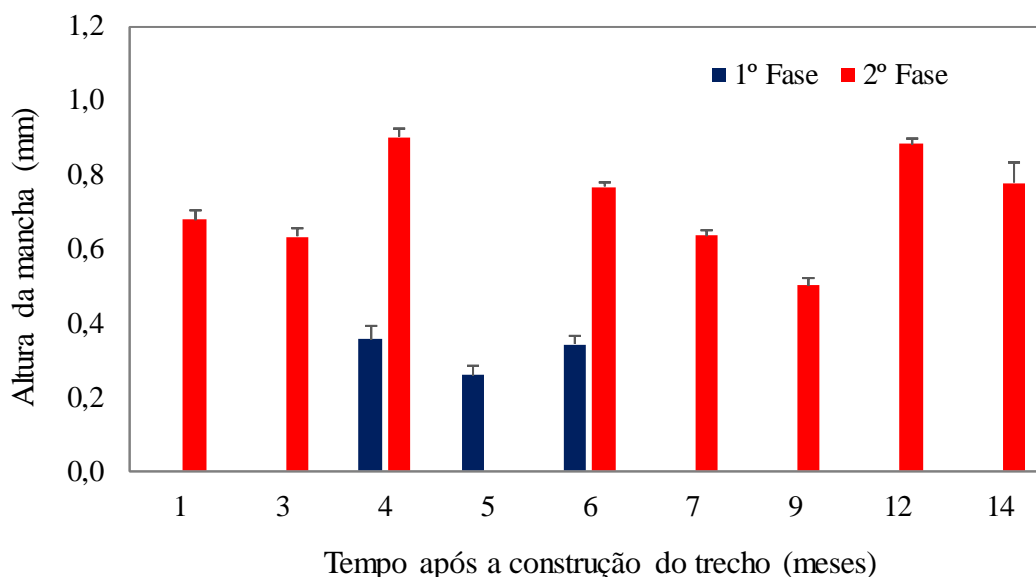


Figura 68 – Resultados de mancha de areia no trecho.

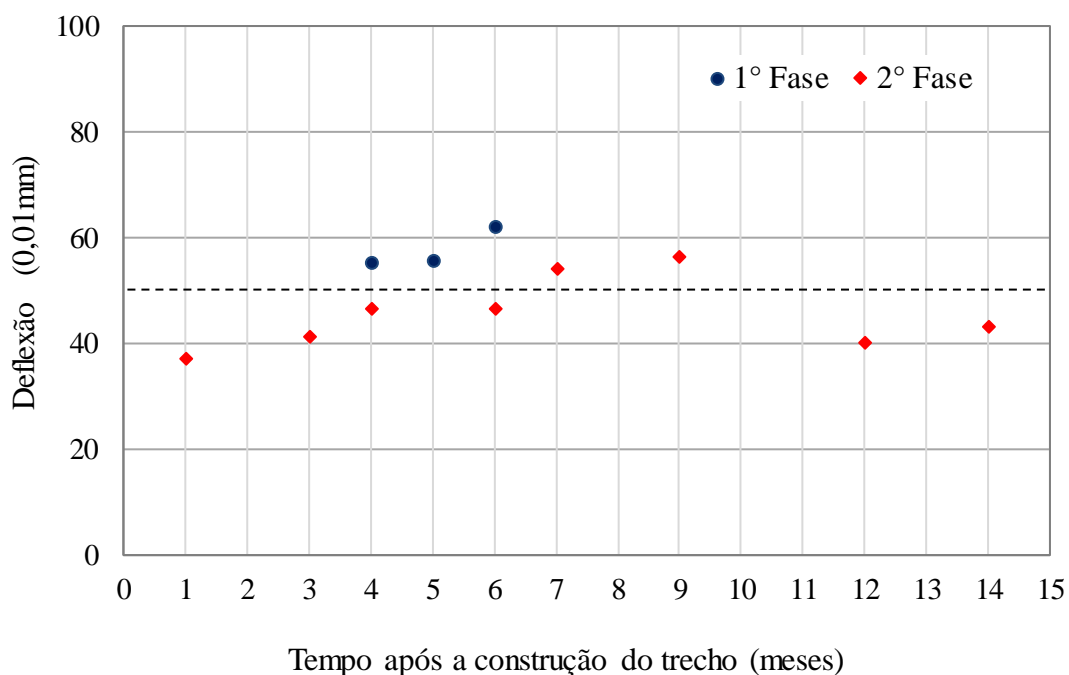


O trecho apresenta microtextura média de aproximadamente 68 VRD, valor dentro do limite recomendado pelo DNIT IPR-720 (2006), e equivalente a uma superfície rugosa, de acordo com esta classificação. Analisando a Figura 67, percebe-se que os resultados de microtextura nas duas fases não apresentaram variações elevadas, mostrando que a superfície, quanto a esse quesito, tem boa homogeneidade. Observa-se também que a aplicação do microrrevestimento entre o 3º e 4º mês da segunda fase não alterou de maneira significativa este parâmetro.

Quanto à macrotextura (Figura 68), o valor médio da altura da mancha para o primeiro segmento foi em torno de 0,30 mm, que equivale a uma superfície fina de acordo com classificação do DNIT IPR-720 (2006), sendo este valor fora dos limites especificados - de 0,6 a 1,2 mm. No segundo segmento, a altura de mancha de areia média foi de 0,70 mm, atendendo as recomendações. A aplicação do microrrevestimento entre o 3º e 4º mês da segunda fase melhorou a condição de macrotextura significativamente, porém, nos meses seguintes, com a ação do tráfego, o valor foi reduzindo, até ocorrer a nova intervenção no pavimento e a altura da mancha aumentar novamente (12º mês).

A avaliação estrutural do pavimento foi monitorada ao longo do trecho utilizando a viga Benkelman. A deflexão máxima média (D_0) foi determinada a partir da média das deflexões entre os quatro pontos levantados da primeira fase e os seis pontos da segunda fase. Os valores de deflexão foram corrigidos para a temperatura de referência de 20°C, usando os fatores de ajuste da AASHTO (1993), e são mostrados na Figura 69.

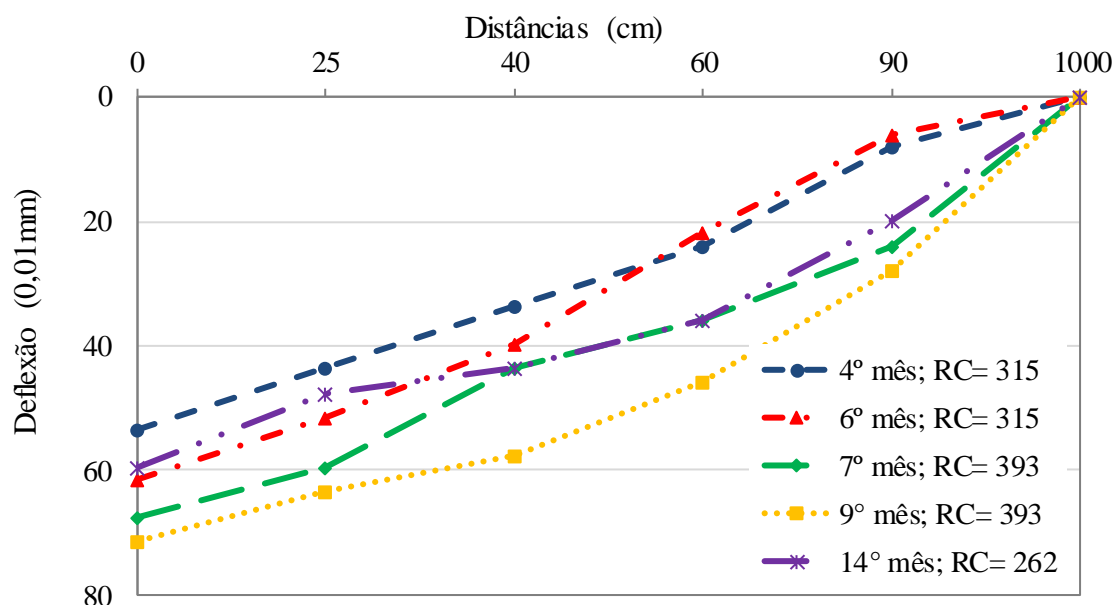
Figura 69 – Evolução das deflexões médias para os segmentos em estudo.



As medidas de deflexão se mostram elevadas, tanto na primeira quanto na segunda fase, com resultados no 4º mês após a construção próximos ao permitido pela fiscalização do trecho (deflexão máxima de 50×10^{-2} mm). Em virtude disso, foram necessárias intervenções no trecho, como microfresagem e aplicação de microrevestimento, entre o 9º mês e o 12º mês da segunda fase, o que prejudicou a continuação dos monitoramentos. Cabe salientar, que as medidas de deflexão realizadas neste estudo foram pontuais nos locais de instalação dos sensores, não sendo uma representação quilométrica do trecho.

Na segunda fase, além dos levantamentos de deflexão máxima (D_0) no segmento, também foram levantadas as bacias de deflexão e calculados os raios de curvatura (RC) nos pontos onde os sensores estavam localizados. As bacias de deflexão são parâmetros importantes para as análises juntamente com os levantamentos pontuais, sendo usadas em retroanálise de estruturas. O raio de curvatura reflete o comportamento da parte superior da estrutura e sua capacidade em distribuir os esforços para as camadas inferiores. A Figura 70 apresenta as bacias deflectométricas, considerando a média entre os dois pontos avaliados (TRI e TRE), no segmento da segunda fase para as idades de 4, 6, 7, 9 e 14 meses.

Figura 70 – Bacias deflectométricas do segmento da segunda fase.



Observa-se na Figura 70 a evolução dos níveis de deflexão ao longo dos meses devido às solicitações do tráfego, com a D_0 média passando de 58×10^{-2} mm no mês 4 para 62×10^{-2} mm no mês 6, 68×10^{-2} mm no mês 7, atingindo 71×10^{-2} mm no mês 9 e necessitando de intervenção. Em função da intervenção no trecho entre o 9º e 12º mês houve uma redução de D_0 no 14º mês.

Os valores de RC apresentam um aumento em função do tempo, o que pode estar associado ao enrijecimento do revestimento por envelhecimento e, também pela densificação da camada nos primeiros meses após a construção. Com a evolução do dano por fadiga na camada de revestimento a tendência é de redução da rigidez e consequente redução do valor de RC. A norma DNIT-PRO 11 (1979) recomenda recomposição da camada caso este valor seja inferior a 100.

5 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO

Neste capítulo estão descritos os procedimentos utilizados na realização dos ensaios em laboratório, contemplando a caracterização de misturas asfálticas produzidas sob diferentes condições, totalizando o estudo de um grupo de cinco misturas. Na sequência são apresentados os resultados obtidos para cada mistura asfáltica avaliada quanto ao desempenho mecânico, em diferentes condições de ensaios.

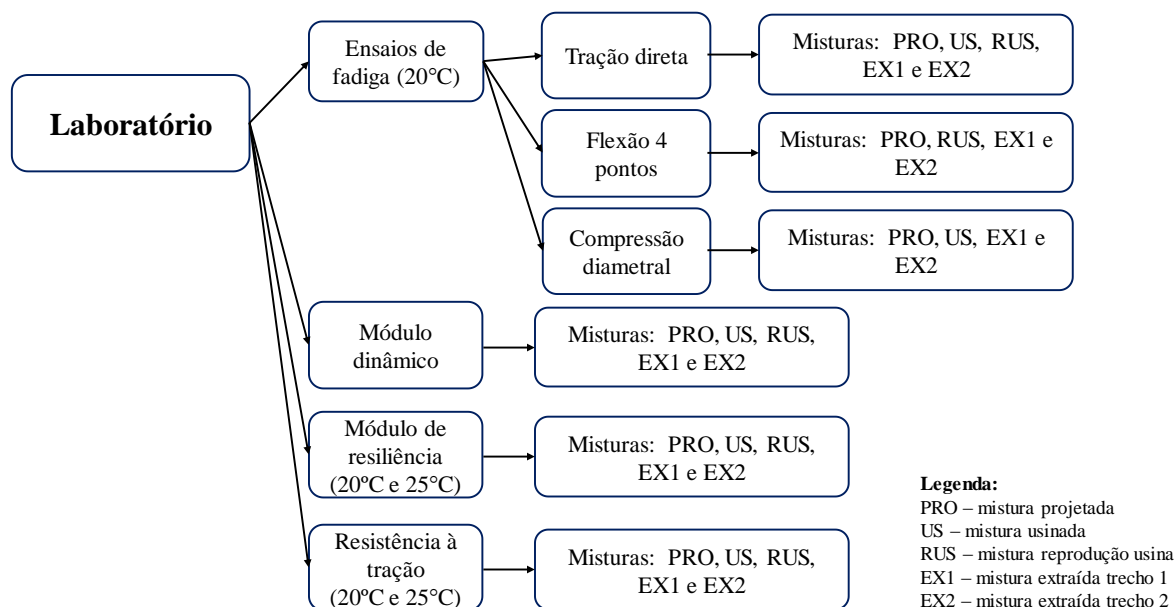
5.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

As atividades desenvolvidas na etapa de laboratório da presente pesquisa são detalhadas e o fluxograma é mostrado na Figura 71:

- a) Caracterização dos materiais utilizados na execução do revestimento asfáltico em campo, como agregados, asfalto modificado por polímero (AMP) e mistura asfáltica;
- b) Ensaios em laboratório para avaliar o comportamento mecânico (resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência) e viscoelástico (módulo dinâmico) da mistura asfáltica em estudo obtida de diferentes formas: mistura projetada (PRO), produzida em laboratório conforme o projeto de dosagem fornecido pela Concessionária administradora da rodovia; mistura usinada (US), produzida em usina, coletada e armazenada em laboratório para realização de ensaios; reprodução usina (RUS), mistura produzida em laboratório seguindo as características de granulometria e teor de ligante determinados para a mistura coletada em usina; extraído trecho 1 (EX1) e extraído trecho 2 (EX2), amostras de mistura asfáltica coletadas do caminhão no dia da execução dos trechos da primeira e segunda fase do trabalho, respectivamente, para ensaios de extração de ligante e granulometria, e corpos de prova/placas extraídos do acostamento executado em conjunto com os trechos para realização de ensaios mecânicos;
- c) Ensaios em laboratório para analisar o desempenho quanto à fadiga das misturas asfálticas: flexão em 4 pontos, tração indireta por compressão diametral e tração direta uniaxial;

- d) Simulação da evolução do dano utilizando os dados do modelo S-VECD, com ensaios de módulo dinâmico e fadiga por tração direta, para as cinco misturas estudadas, no programa FlexPAVE™, detalhado no capítulo 6 deste trabalho.

Figura 71 – Fluxograma das etapas de laboratório.



5.2 MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDADAS

Os agregados utilizados na produção das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa são de origem granítica, provenientes da pedreira Eldorado Mineração, localizada no município de Eldorado do Sul/RS. Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS) e os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos agregados.

Propriedades	Método	Resultados
Densidade real - agregado graúdo	DNER-ME 081/98	2,632
Densidade real - agregado miúdo	DNER-ME 084/95	2,647
Absorção	DNER-ME 081/98	0,9%
Desgaste à abrasão	DNER-ME 035/98	21%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	63%
Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,8%
Durabilidade	DNER-ME 089/94	8,7%

Nas misturas asfálticas foi utilizado o cimento asfáltico modificado por polímero - AMP 60/85, empregado em obras de pavimentação no estado do Rio Grande do Sul, e os resultados de caracterização são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades do ligante asfáltico AMP 60/85.

Ensaio	Método	AMP 60/85
Viscosidade rotacional a 135°C (cP)	NBR 15184	1717
Viscosidade rotacional a 150°C (cP)	NBR 15184	722
Viscosidade rotacional a 177°C (cP)	NBR 15184	303,5
Densidade de materiais betuminosos	NBR 6296	1,013
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	64
Penetração, 25°C, 100g (0,1 mm)	NBR 6576	53
Recuperação elástica, 25°C (%)	NBR 15086	92

Nesta pesquisa foram contemplados o estudo de cinco misturas asfálticas, sendo a principal diferença entre elas a forma de produção, usina ou laboratório, e na Tabela 11 é apresentado um resumo das principais características de cada mistura. As misturas analisadas foram nomeadas da seguinte forma:

- PRO – Mistura projetada: seguindo a características do projeto de dosagem fornecido pela Concessionária administradora da rodovia (Tabela 12);
- US – Mistura usinada: produzida em usina, coletada um mês após a execução do segundo trecho e armazenada em laboratório para realização de ensaios;
- RUS – Reprodução usina: mistura produzida em laboratório seguindo as características de granulometria e teor de ligante determinados para a mistura coletada em usina;
- EX1 – Extraído trecho 1: amostras de mistura asfáltica coletadas do caminhão, no dia da execução do trecho da primeira fase do trabalho, para ensaios de extração de ligante e granulometria, e corpos de prova/placas extraídos do acostamento executado em conjunto com a pista de rolamento, para realização de ensaios mecânicos;
- EX2 – Extraído trecho 2: amostras de mistura asfáltica coletadas do caminhão, no dia da execução do trecho da segunda fase do trabalho, para ensaios de extração de ligante e granulometria, e corpos de prova/placas extraídos do acostamento executado em conjunto com a pista de rolamento, para realização de ensaios mecânicos.

Tabela 11 – Características das misturas estudadas.

Mistura	Teor de ligante médio	Composição granulométrica (25% de 3/4"; 15% de 3/8"; 60% de Pó de pedra)		Densidade máxima teórica (método Rice)	Densidade aparente
Mistura projetada (PRO)	5,2	3/4"	100,0	2,374	2,289
		1/2"	83,9		
		3/8"	75,7		
		n° 4	59,4		
		n° 10	40,2		
		n° 40	14,3		
		n° 80	9,0		
		n° 200	5,8		
Mistura usinada (US)	4,7	3/4"	100,0	2,434	2,335
		1/2"	90,4		
		3/8"	82,1		
		n° 4	62,7		
		n° 10	39,1		
		n° 40	16,3		
		n° 80	10,5		
		n° 200	6,2		
Reprodução Usina (RUS)	4,7	3/4"	100,0	2,426	2,343
		1/2"	90,4		
		3/8"	82,1		
		n° 4	62,7		
		n° 10	39,1		
		n° 40	16,3		
		n° 80	10,5		
		n° 200	6,2		
Extraído trecho 1 (EX1)	5,2	3/4"	100,0	2,455	2,274
		1/2"	93,1		
		3/8"	86,4		
		n° 4	61,9		
		n° 10	37,3		
		n° 40	16,4		
		n° 80	10,2		
		n° 200	6,6		
Extraído trecho 2 (EX2)	5,2	3/4"	100,0	2,420	2,310
		1/2"	96,1		
		3/8"	88,9		
		n° 4	69,6		
		n° 10	41,3		
		n° 40	16,6		
		n° 80	10,0		
		n° 200	6,1		

Tabela 12 – Propriedades da mistura de projeto.

Propriedade	DNIT 031 (2006)	Projeto (Concessionária)
Teor de Betume (%)	--	5,2
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3,57
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	78,2
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	16,3
Massa Esp. Max. Medida (g/cm ³)	--	2,374
Massa Esp. Aparente (g/cm ³)	--	2,289
Estabilidade (kgf)	> 500	1292
Fluência (1/100 in)	8 a 18	11,6

No projeto de dosagem Marshall fornecido pela Concessionária o teor de ligante asfáltico determinado para a mistura projetada foi de 5,2%, podendo apresentar uma variação de 0,3% (4,9% a 5,5%), conforme a norma DNIT 031 (2006). Na Figura 72 são apresentados os teores de ligante obtidos para as diferentes misturadas estudadas. Salienta-se que para as misturas usinada, extraído trecho 1 e extraído trecho 2, o teor de ligante foi determinado a partir da média dos resultados de dois ensaios de extração, utilizando o método do refluxo. Na Figura 73 são apresentadas as curvas granulométricas médias do material granular após ter passado pelo processo de extração, bem como os limites especificados para a Faixa C do DNIT.

Figura 72 – Percentagem do teor de ligante obtido para as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

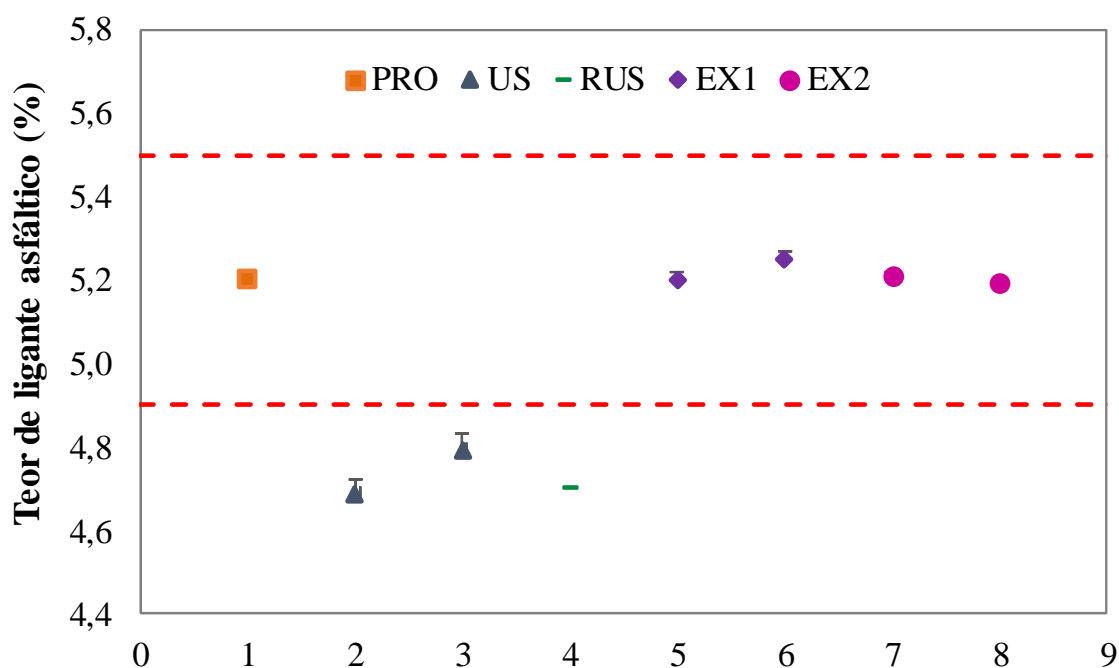
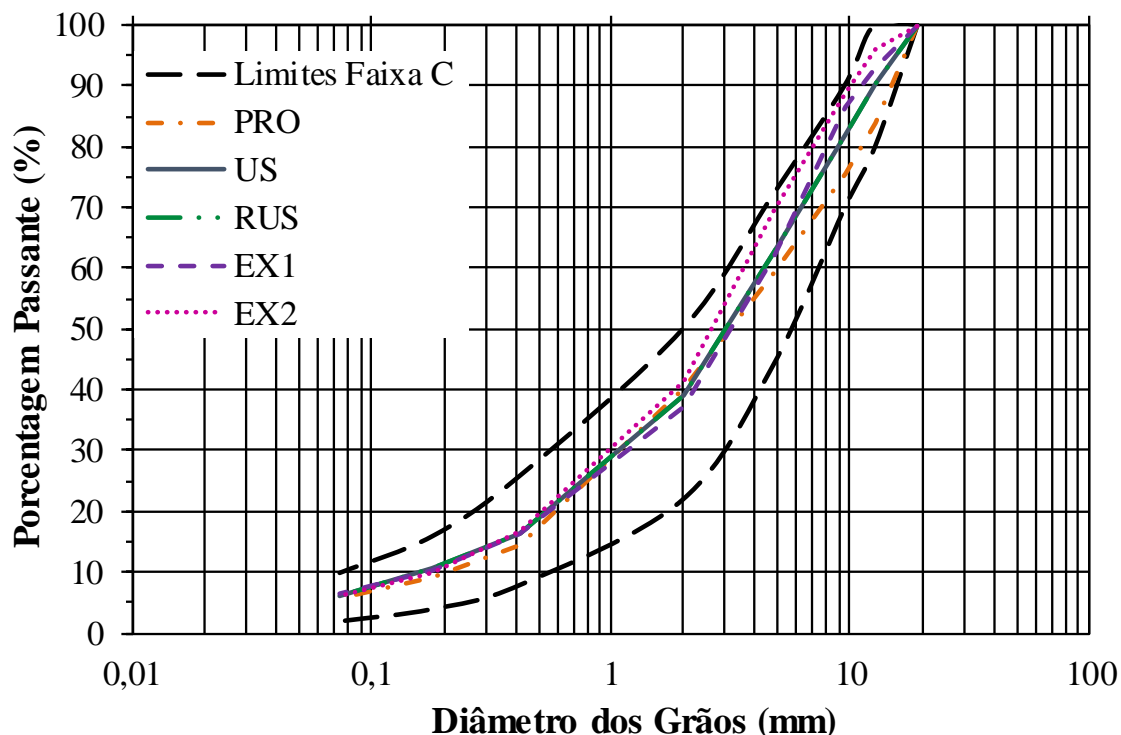


Figura 73 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas.



Pode-se notar que a mistura coletada na usina (mistura usinada - US), um mês após a execução do segundo trecho, apresentou um teor de ligante abaixo do limite permitido pela especificação de concreto asfáltico, e em função desta mistura ter sido reproduzida em laboratório manteve-se o teor de 4,7% para a mistura reprodução usina (RUS). Em relação às curvas granulométricas, todas as misturas apresentaram uma granulometria dentro dos limites estabelecidos para faixa C do DNIT, porém as misturas extraídas de campo e usinada apresentam percentuais de material graúdo menores em relação à mistura projetada.

5.3 EXECUÇÃO DE ACOSTAMENTO PARA EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS

Para extração de amostras utilizadas em ensaios de caracterização mecânica em laboratório foi executado um trecho de revestimento asfáltico no acostamento localizado no km 298+600 da BR-116/RS (sentido Guaíba-Porto Alegre), próximo ao trecho instrumentado. O revestimento do acostamento foi executado no mesmo dia da pista de rolamento, utilizando as mesmas técnicas construtivas. Durante o processo de compactação do trecho do acostamento fez-se o uso de um medidor de densidade do asfalto – densímetro nuclear, buscando monitorar a

densidade, grau de compactação e o volume de vazios do concreto asfáltico durante e após sua compactação. As etapas de execução do acostamento podem ser acompanhadas na Figura 74.

Figura 74 – Etapa de construção do acostamento.



(a) Fresagem e limpeza.



(b) Imprimação da base.



(c) Verificação da temperatura.



(d) Coleta de amostras.



(e) Execução do revestimento.



(f) Compactação do revestimento.



(g) Verificação da densidade.



(h) Finalização do acostamento.

Após a conclusão da execução do acostamento, realizou-se o processo de extração das placas de concreto asfáltico (Figura 75), com dimensões em torno de 45 cm de comprimento, 45 cm de largura e 8 cm de altura, utilizando uma serra de disco. As placas extraídas foram serradas em uma marmoraria para obtenção das amostras prismáticas (vigotas), com dimensões de $38 \pm 0,6$ cm de comprimento, $6,3 \pm 0,2$ cm de largura e $5 \pm 0,2$ cm de altura, conforme critérios estabelecidos pela norma AASHTO T-321 (2017) para ensaios de fadiga em quatro pontos.

Figura 75 – Extração de placas do acostamento.



(a) Processo de corte.



(b) Extração das placas.



(c) Amostras prismáticas serradas.



(d) Amostras prismáticas serradas.

Corpos de prova cilíndricos também foram extraídos do acostamento, com auxílio de uma sonda rotativa (Figura 76), para realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral. Estas amostras apresentaram diâmetro de $10 \pm 0,5$ cm e altura média de 8 cm.

Figura 76 – Extração de corpos de prova cilíndricos do acostamento.



5.4 PROCEDIMENTOS USADOS NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

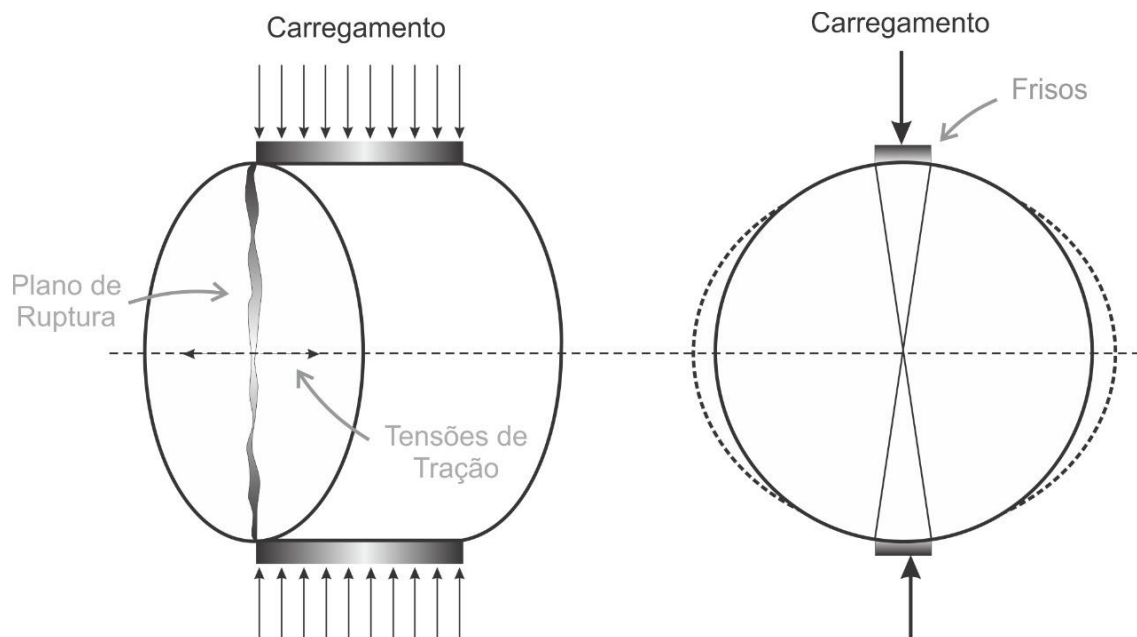
Neste item são apresentados os procedimentos utilizados na realização dos ensaios em laboratório para avaliar a rigidez e o comportamento à fadiga das misturas estudadas. Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e módulo dinâmico são descritos, bem como os ensaios de fadiga por compressão diametral, flexão em quatro pontos e tração direta.

5.4.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral (RT), para todas as misturas, foi obtida por meio de ensaios realizados segundo os procedimentos da norma DNIT 136 (2018).

Este ensaio consiste em aplicar um carregamento estático de compressão distribuído ao longo de dois planos paralelos e diametralmente opostos, conforme mostra Figura 77, com o intuito de obter as tensões de tração no diâmetro horizontal e perpendicular ao carregamento.

Figura 77 – Forma de carregamento e plano de ruptura gerados durante o ensaio de resistência à tração (BRITO, 2006).



A velocidade de avanço da prensa usada no ensaio (Figura 78) foi de $0,8 \pm 0,1$ mm/s e a equação (67) foi empregada para o cálculo da resistência à tração.

Figura 78 – Prensa usada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (67)$$

Onde:

σ_R - resistência à tração na temperatura de ensaio (MPa);

F - carga de ruptura (N);

D - diâmetro do corpo de prova (mm);

H - altura do corpo de prova (mm).

Para as misturas extraídas do trecho 1 (EX1) e extraídas do trecho 2 (EX2) utilizaram-se corpos de prova com diâmetro de $10,0 \pm 0,4$ cm e altura $5,0 \pm 0,4$ cm extraídos com sonda rotativa dos acostamentos construídos durante ambas as fases da pesquisa. Para as demais misturas os corpos de prova, com diâmetro de $10,0 \pm 0,2$ cm e altura de 6,5 cm, foram moldados em laboratório com compactador giratório, seguindo as recomendações da norma DNIT 178 (2018), considerando para as misturas produzidas e compactadas em laboratório (PRO e RUS), o condicionamento em estufa na temperatura de compactação pelo período de duas horas. Já a mistura produzida em usina (US) foi reauecida em estufa, no laboratório, até atingir a temperatura de compactação. Os corpos de prova foram condicionados nas temperaturas de ensaio, 20°C e 25°C, por um período de 4 horas antes do ensaio. Optou-se por realizar o ensaio a 20°C, pois os ensaios de fadiga por compressão diametral foram realizados nesta temperatura, necessitando do valor de RT na mesma condição.

5.4.2 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral

O módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é obtido pela relação entre a tensão horizontal, resultante da carga cíclica aplicada no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica, e a correspondente deformação horizontal, resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente) por ciclo, para uma dada temperatura de ensaio (DNIT 135, 2010).

O procedimento de ensaio adotado foi o especificado no protocolo P07 do LTPP (*Long-Term Pavement Performance Program*), semelhante ao empregado pela norma AASHTO TP-31 (1996) e analisado por Brito *et al.* (2008), aplicando-se uma carga cíclica no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, sendo utilizados carregamentos equivalentes a 15% da resistência à tração por compressão diametral média de cada mistura. A carga aplicada é um pulso com 0,1s de aplicação de carga e 0,9s de repouso, causando um deslocamento horizontal na amostra, o qual é medido por um LVDT.

Os corpos de prova foram previamente condicionados nas temperaturas de ensaio, 20°C e 25°C, por um período de 4 horas. As dimensões e métodos de extração ou moldagem dos corpos de prova seguiram os procedimentos descritos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 79 é apresentado o equipamento utilizado nos ensaios, com a aquisição dos dados realizada pelo sistema SEEPAV 8200.

Figura 79 – Equipamento usado no ensaio de módulo de resiliência.



Após o ensaio, o valor do módulo de resiliência foi determinado pela equação (68).

$$M_R = \frac{P}{\Delta H} (0,27 + \mu) \quad (68)$$

Onde:

M_R - módulo de resiliência (MPa);

P - carga cíclica (N).

Δ – deslocamento horizontal, LVDT externo (mm).

H - altura do corpo de prova (mm).

μ - coeficiente de Poisson (adotado o valor de 0,30).

5.4.3 Ensaio de módulo dinâmico

O módulo complexo (E^*) relaciona a amplitude complexa de uma tensão senoidal aplicada a um material viscoelástico linear, a uma determinada velocidade angular (ω), com a amplitude complexa de uma deformação senoidal (KIM, 2009). O valor absoluto do módulo complexo é

denominado de módulo dinâmico $|E^*|$, o qual é determinado experimentalmente pela aplicação de uma sequência de solicitações senoidais com diferentes frequências, geralmente entre 0,1 Hz e 30 Hz, e diferentes temperaturas, geralmente no intervalo entre -10°C e 54°C , dependendo da metodologia de ensaio utilizada.

O comportamento reológico do concreto asfáltico pode ser representado em função da variação da temperatura e da frequência, da relação entre as partes reais (E_1 - módulo elástico real – representa a energia armazenada no material) e imaginárias (E_2 - módulo de perda – representa a energia dissipada por atrito interno durante um ciclo), do módulo dinâmico e do ângulo de fase (MOMM, 1998). Os resultados destes parâmetros são geralmente apresentados por meio de representações clássicas como as curvas isotérmicas, curvas mestras, curvas isócronas, espaço de Black e Cole-Cole.

O ensaio para determinação do módulo dinâmico e ângulo de fase foi realizado no equipamento MTS 810 e a metodologia utilizada seguiu as recomendações da norma AASHTO R-84 (2017), com duas amostras para cada mistura. Foram utilizados corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura e volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$ moldados no Compactador Giratório Superpave (CGS), conforme recomendações da norma DNIT 178 (2018), para as misturas projetada, usinada e reprodução usina. Já para as misturas extraídas dos trechos 1 e 2, foram utilizados corpos de prova com diâmetro de 38 mm e altura de 110 mm, conforme AASHTO TP-132 (2019), apresentando um volume de vazios de $3,5\% \pm 0,5\%$, pois os corpos de prova foram extraídos de vigotas compactadas para 4% de vazios.

Os ensaios foram realizados empregando um carregamento senoidal sob tensão controlada, de forma que fornecesse deformações na ordem de 50 a 75 microdeformações ($\mu\epsilon$), buscando manter-se no regime de viscoelasticidade linear do material. As frequências utilizadas foram de 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz, sendo aplicadas em ordem decrescente, para três diferentes temperaturas, 4°C , 20°C e 40°C , conforme recomendado pela norma AASHTO R-84 (2017) e a norma DNIT 416 (2019).

As curvas isotermais foram transladadas para a temperatura de referência de 20°C , utilizando o princípio da superposição tempo-temperatura, dando origem às curvas mestras, que foram ajustadas por uma função sigmoideal apresentada na equação (42). Os resultados de módulo dinâmico foram utilizados nas análises do dano contínuo viscoelástico das misturas estudadas.

5.4.4 Ensaio de fadiga à tração indireta por compressão diametral

O ensaio de tração indireta por compressão diametral é realizado em um equipamento pneumático, com um pistão que proporciona um carregamento repetitivo, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz, localizado dentro de uma câmara com temperatura controlada, permitindo a realização de ensaios em temperaturas distintas. Ao aplicar o carregamento, com tempo de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, as quais são medidas por um LVDT.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de $10,0 \pm 0,4$ cm e altura $5,0 \pm 0,4$ cm extraídos com sonda rotativa do acostamento do trecho em ambas as fases da pesquisa (extraído trecho 1 (EX1) e extraído trecho 2 (EX2)). Para as demais misturas os corpos de prova, com diâmetro de $10,0 \pm 0,2$ cm e altura de 6,5 cm, foram moldados em laboratório com compactador giratório, seguindo as recomendações da norma DNIT 178 (2018). As amostras ensaiadas apresentaram um volume de vazios de $4,5\% \pm 0,5\%$.

Os corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensão, proporcionais à resistência à tração (RT) estática, sendo 10%, 20%, 30%, 40% e 50% da RT. A forma de carregamento empregada foi semi-seno-verso (haversine), com temperatura de 20°C. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30, conforme recomendação da norma NBR 16018 (2012). O sistema de aquisição e controle de dados SEEPAV 8200 foi utilizado para aquisição da carga, deslocamento e módulo de resiliência ao longo de todo o ensaio. O critério adotado para finalização do ensaio foi a ruptura total do corpo de prova (DNIT 183, 2018).

De acordo com as recomendações da norma DNIT 183 (2018), a tensão de tração foi determinada conforme expresso na equação (69) e as deformações foram obtidas a partir dos deslocamentos medidos pelo LVDT.

$$\sigma_t = \frac{2xF}{1000x\pi xDxH} \quad (69)$$

Onde:

σ_t – tensão de tração, à temperatura de ensaio (kPa);

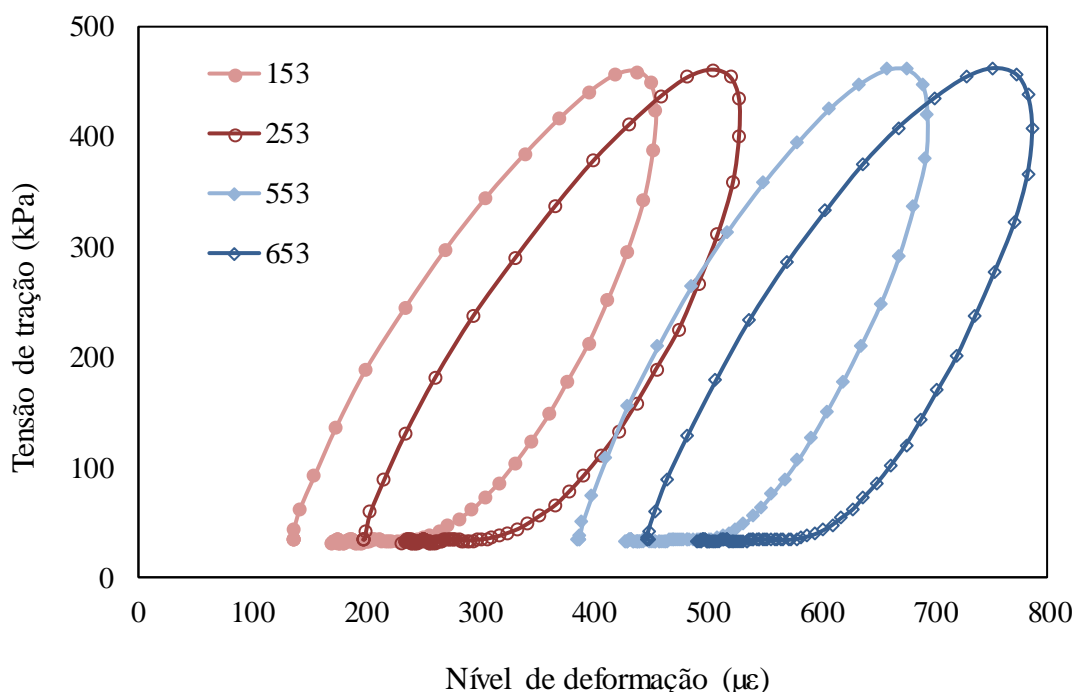
F - carga aplicada (N);

D - diâmetro do corpo de prova (m);

H - altura do corpo de prova (m).

A energia dissipada (*dissipated energy* - DE) em cada ciclo foi calculada a partir dos laços de histerese. Na Figura 80 são apresentados os laços de histerese dos ciclos 153, 253, 553 e 653 obtidos no ensaio de fadiga diametral para um corpo de prova da mistura EX1, submetido à 20% da resistência à tração por compressão diametral. O deslocamento no eixo horizontal corresponde à deformação permanente entre os ciclos, salientando que as alturas constantes das curvas ocorrem devido ao ensaio ser realizado sob tensão controlada. A degradação associada à fadiga é evidenciada pelo incremento da área do laço, correspondendo ao aumento da energia dissipada durante o ensaio.

Figura 80 – Exemplos de laços de histerese dos ciclos 153, 253, 553 e 653.



A energia dissipada em cada ciclo foi então determinada a partir da área do laço de histerese, calculada por integração numérica (método do trapézio) de cada um dos pontos de leitura ao longo do ensaio, utilizando a equação (70).

$$DE_N = \sum_{j=0}^{j=199} \left(\frac{(\varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}) * (\sigma_j + \sigma_{j-1})}{2} \right) \quad (70)$$

Onde:

DE_N – energia dissipada no ciclo N (kJ/m^3);

ε_j - deformação no ponto j ($\mu\epsilon$);

σ_j - tensão de tração no ponto j (kPa).

5.4.5 Ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos

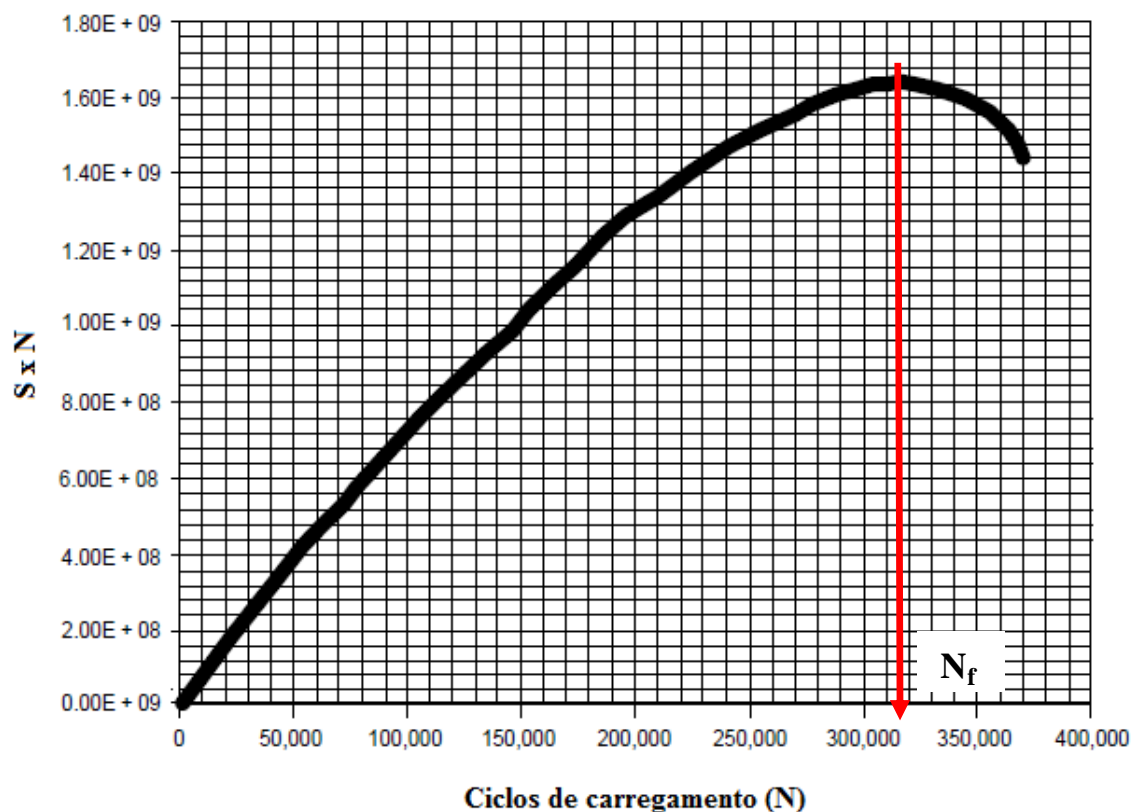
Os ensaios de fadiga à flexão foram realizados no equipamento de flexão em quatro pontos da IPC Global, modelo CS 7800, conforme mostra a Figura 81. O equipamento fica posicionado dentro de uma câmara climática, devido a necessidade de manter a temperatura constante durante todo o período de realização dos ensaios. Os resultados dos ensaios são obtidos pelo programa computacional UTS015.

Figura 81 – Equipamento para ensaio de flexão em quatro pontos.



Os ensaios foram conduzidos sob deformação controlada, com temperatura de 20°C, frequência de 10 Hz e forma de carregamento senoidal, conforme especificado na norma da AASHTO T-321 (2017), pois ainda não se tem uma normatização brasileira para este tipo de ensaio. Como critério de ruptura, utilizou-se o ponto em que o produto da rigidez (S) e o ciclo de carregamento (N) da amostra é máximo, sugerido pela norma AASHTO T-321 (2017) e apresentado na Figura 82.

Figura 82 – Critério de ruptura adotado para o ensaio de flexão em quatro pontos (adaptado de AASHTO T-321, 2017).



Os níveis de deformação empregados variam de $300\mu\epsilon$ a $600\mu\epsilon$, dentro dos procedimentos usuais, porém superiores às deformações observadas em campo e nas simulações, em torno de $100\mu\epsilon$ a $200\mu\epsilon$, necessitando de extrapolação dos resultados ao usar os modelos obtidos. Para cada nível foram ensaiadas, em média, três amostras prismáticas (vigotas) com dimensões de 380 ± 6 mm de comprimento, 50 ± 6 mm de altura e 63 ± 6 mm de largura, serradas de placas extraídas do acostamento dos trechos experimentais (misturas EX1 e EX2) e de placas moldadas em laboratório (misturas projetada e reprodução usina). O procedimento de corte das amostras foi realizado em uma marmoraria especializada, buscando dimensões precisas e amostras sem imperfeições nas faces.

A tensão e deformação de tração máxima obtidas nos ensaios foram determinadas pelas equações (71) e (72), enquanto a rigidez na flexão e o ângulo de fase pelas equações (73) e (74), conforme AASHTO T-321 (2017). A energia dissipada, em cada ciclo, foi determinada a partir da área do laço de histerese, obtida pela equação (70).

$$\sigma_t = \frac{PxLx1000000}{bxh^2} \quad (71)$$

$$\varepsilon_t = \frac{12x\delta xh}{3xL^2 - 4xa^2} \quad (72)$$

$$S = \frac{1000x\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (73)$$

$$\varphi = 360 \times f \times s \quad (74)$$

Onde:

σ_t – amplitude de tensão de tração (kPa);

P - carga vertical total aplicada (kN);

L - comprimento da amostra entre os fixadores externos (mm);

b - largura média da amostra (mm);

h - altura média da amostra (mm);

ε_t – amplitude de deformação de tração ($\mu\varepsilon$);

δ – pico de deslocamento no centro da amostra (mm);

a - espaçamento entre os fixadores internos (mm);

S - rigidez na flexão (MPa);

φ - ângulo de fase ($^\circ$);

f - frequência de aplicação da carga (Hz);

s - tempo de defasagem entre a aplicação da carga P e o deslocamento δ (segundos).

Em laboratório, foram realizados ensaios para determinação da densidade aparente dos corpos de prova prismáticos, seguindo os procedimentos preconizados pela norma NBR 15573 (ABNT, 2012). Também, determinou-se a percentagem de volume de vazios (VV) e o grau de compactação (GC) destas amostras.

5.4.6 Ensaio de fadiga a tração direta

Os ensaios de fadiga por tração direta uniaxial cíclico foram realizados em uma prensa universal MTS 810, usando o sistema de aparatos desenvolvido por Mocelin (2018). O procedimento de ensaio adotado seguiu as recomendações da norma AASHTO TP-107 (2014) e AASHTO TP-133 (2019).

Os corpos de prova das misturas projetada, usinada e reprodução usina foram moldados no compactador giratório com as dimensões de 100 mm de diâmetro e 170 mm de altura, após foram serrados 20 mm do topo e 20 mm da base, ficando com as dimensões finais de 100 mm x 130 mm e volume de vazios em torno de $4,0\% \pm 0,5\%$. Este procedimento de corte foi realizado conforme recomendações de Chehab *et al.* (2000) e Nascimento (2015), com o objetivo de contornar os problemas de não homogeneidade do volume de vazios (VV) nas regiões próximas à base e topo de corpos de prova moldados no compactador giratório. Já para as misturas extraído trecho 1 e 2, foram utilizados corpos de prova com diâmetro de 38 mm e altura de 110 mm extraídos de vigotas, como os utilizados nos ensaios de módulo dinâmico, apresentando um volume de vazios de $3,5\% \pm 0,5\%$.

O ensaio de tração direta foi sob deformação controlada, aplicando uma onda senoidal, e o controle dessa deformação imposta foi realizado *on-specimen* para as amostras com diâmetro de 100 mm, utilizando os extensômetros da MTS. Este método é considerado mais preciso, pois além de corrigir possíveis problemas de ressonância ou deformação dos prolongadores, garante o nível de deformação constante do corpo de prova ao longo de todo o ensaio. Já para as amostras com 38 mm de diâmetro, o controle da deformação foi realizado pelo atuador, e a leitura das deformações por LVDTs, conforme AASHTO TP-133 (2019).

Os ensaios foram realizados à temperatura controlada de 20°C e frequência de 10 Hz. Para cada uma das misturas avaliadas foram ensaiados três corpos de prova, em diferentes níveis de deformação, seguindo as recomendações das normas AASHTO TP-107 (2014) e AASHTO TP-133 (2019).

Cabe salientar que, antes da realização do ensaio de fadiga por tração direta, cada amostra deve ser submetida a um ensaio cíclico, denominado *fingerprint*, na frequência de 10 Hz. Neste ensaio, o carregamento ocorre sob tensão controlada, com uma amplitude de carga que mantenha a amostra com deformação entre $50 \mu\epsilon$ e $75 \mu\epsilon$, buscando mantê-la no regime linear viscoelástico, sem sofrer dano. Durante o ensaio de *fingerprint* mede-se o módulo dinâmico ($|E^*|_{fingerprint}$), utilizado na modelagem do S-VECD.

Os resultados obtidos neste ensaio foram utilizados para gerar as curvas características de dano empregando a rotina de cálculo presente na planilha eletrônica FlexMAT, cedida pelo Prof. Richard Kim da *North Carolina State University* (NCSU), a qual é baseada no procedimento descrito na norma AASHTO TP-107 (2014).

5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

No laboratório buscou-se verificar o desempenho das misturas asfálticas a partir de ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR) por compressão diametral nas temperaturas de 20°C e 25°C, ensaios de fadiga na temperatura de 20°C, usando três métodos distintos (tração indireta por compressão diametral – FCD, flexão em quatro pontos – F4P e tração direta - FTD), e ensaios de módulo dinâmico (MD). A Tabela 13 apresenta o quantitativo de amostras ensaiadas correspondente apenas aos ensaios validados.

Tabela 13 – Quantitativo de amostras ensaiadas em laboratório.

Mistura	RT	MR	FCD	FTD	F4P	MD
Projetada (PRO)	5	4	9	3	8	2
Usinada (US)	6	5	5	3	-	2
R. Usina (RUS)	6	5	-	3	8	2
EX1	6	4	10	3	9	2
EX2	5	4	9	3	9	2
Total por ensaio	28	22	33	15	34	10
Total	142					

5.5.1 Resistência à tração por compressão diametral

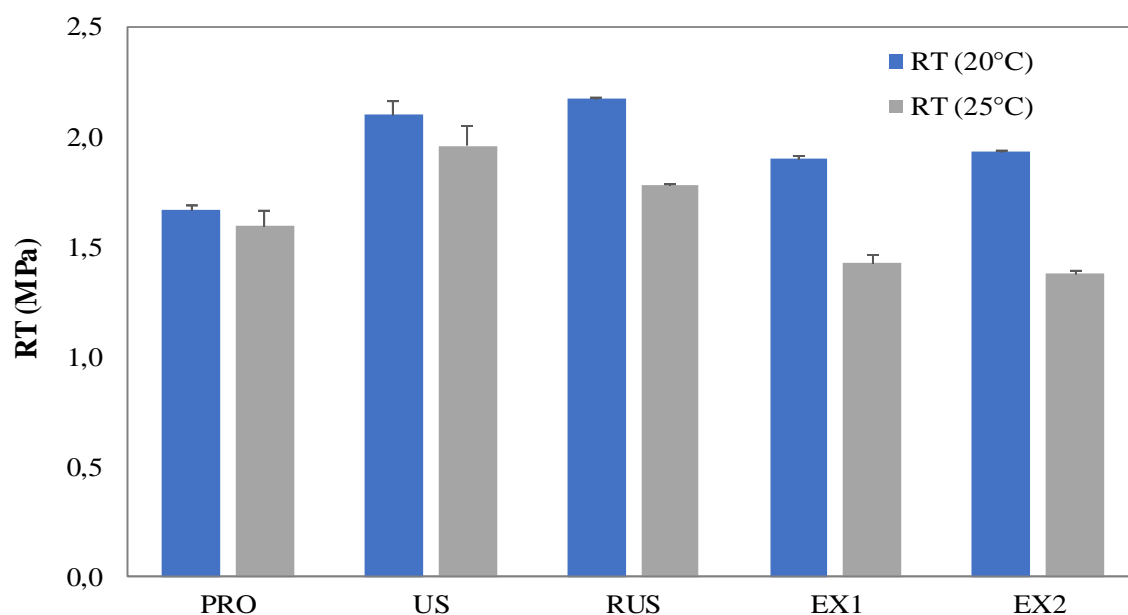
Na Tabela 14 e Figura 83 constam os resultados de resistência à tração por compressão diametral determinados para cada mistura estudada. Conforme os resultados obtidos, todas as misturas apresentaram valores superiores ao intervalo de 0,7 MPa a 1,2 MPa, à temperatura de 25°C, estabelecido pela norma DNER-ES 385 (1999) para concretos asfálticos com ligantes modificados por polímero, o que vem sendo prática no cenário nacional, como mostram os estudos desenvolvidos por Vasconcelos (2015), Almeida Junior (2016) e Faccin (2018).

Tabela 14 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Mistura	RT (20°C)			RT (25°C)		
	RT (MPa)	Média	CV (%)	RT (MPa)	Média	CV (%)
Mistura projetada (PRO)	1,66 1,63 1,71	1,67	2,4	1,66 1,44 1,68	1,60	8,3
Mistura usinada (US)	2,02 2,19 *	2,10	5,6	1,83 2,09 *	1,96	9,5
Reprodução Usina (RUS)	2,19 2,16 2,16	2,17	0,8	1,79 * 1,78	1,78	0,5
Extraído trecho 1 (EX1)	1,88 1,92 1,90	1,90	1,1	1,36 1,41 1,51	1,43	5,4
Extraído trecho 2 (EX2)	1,94 1,93 1,93	1,93	0,4	1,35 1,40 *	1,38	2,4

* Valores retirados por excederem à máxima variação admissível pela norma DNIT 136 (2018).

Figura 83 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas estudadas.



A mistura reprodução usina e mistura usinada apresentaram maior valor de RT em relação as demais, para ambas as temperaturas verificadas, com um acréscimo na rigidez em torno de 30% em relação a mistura projetada, para temperatura de 20°C. Para a mistura usinada, isto deve-se ao processo de envelhecimento pelo qual passou, pois após a coleta a mesma ficou armazenada em laboratório por um período de um mês antes do início da realização dos ensaios. Os valores de RT da mistura reprodução usina, em ambas as temperaturas, ficaram próximos dos obtidos para mistura usinada, assim, para este parâmetro, foi válido o procedimento de envelhecimento em estufa por um período de 2 horas na temperatura de compactação. Já os valores de RT das misturas extraídas do trecho 1 e 2 ficaram semelhantes, mesmo sendo executadas em períodos distintos, com valores próximos aos obtidos para a mistura projetada. Como esperado, para todos os casos, os valores de resistência à tração diminuem em função do aumento da temperatura.

5.5.2 Módulo de resiliência por compressão diametral

Na Tabela 15 constam os resultados de módulo de resiliência (Figura 84) e a relação MR/RT (Figura 85) obtidos para as misturas nas temperaturas de 20°C e 25°C.

Tabela 15 – Resultados de módulo de resiliência por compressão diametral.

Mistura	MR (20°C)			MR (25°C)			MR/RT (20°C)	MR/RT (25°C)
	MR (MPa)	Média	CV (%)	MR (MPa)	Média	CV (%)		
Mistura projetada (PRO)	6377 6216 *	6297	1,8	5934 4808 *	5371	14,8	3778	3365
Mistura usinada (US)	12010 11904 11203	11705	3,7	8110 8014 *	8062	0,8	5565	4114
Reprodução Usina (RUS)	11393 9741 10255	10463	8,1	5937 6305 *	6121	4,2	4814	3432
Extraído trecho 1 (EX1)	10626 11934 *	11280	8,2	8616 7841 *	8229	6,7	5935	5771
Extraído trecho 2 (EX2)	10084 12835 *	11459	17,0	6091 7652 *	6871	16,1	5924	4987

* Não foi possível realizar o ensaio devido a problemas com as amostras.

Figura 84 – Módulo de resiliência por compressão diametral das misturas asfálticas estudadas.

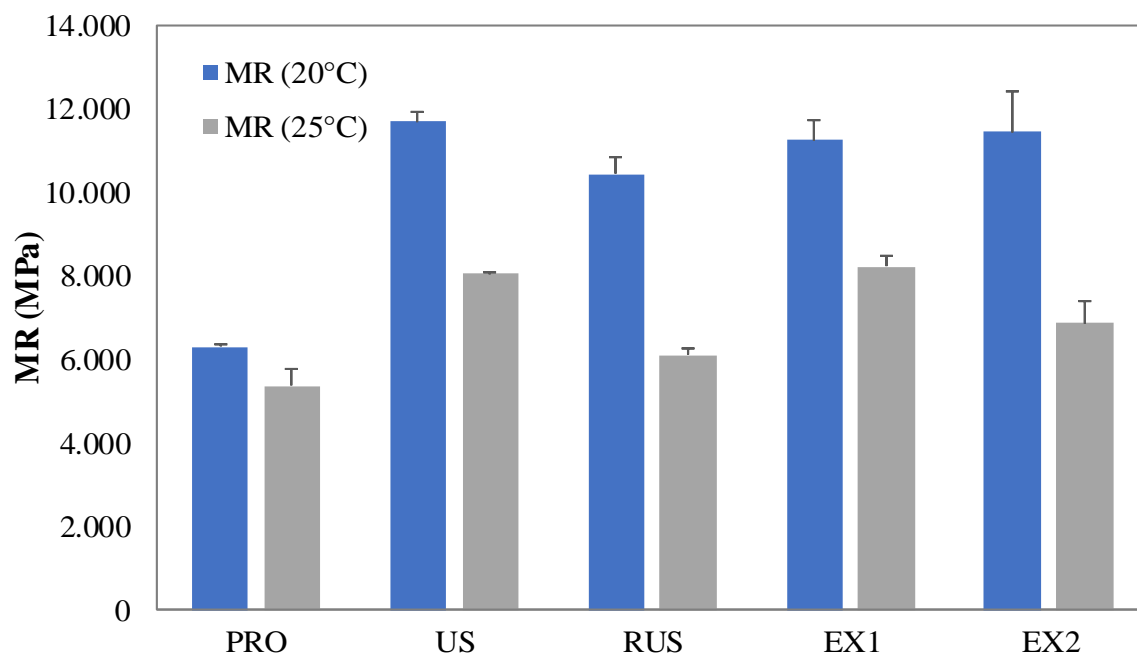
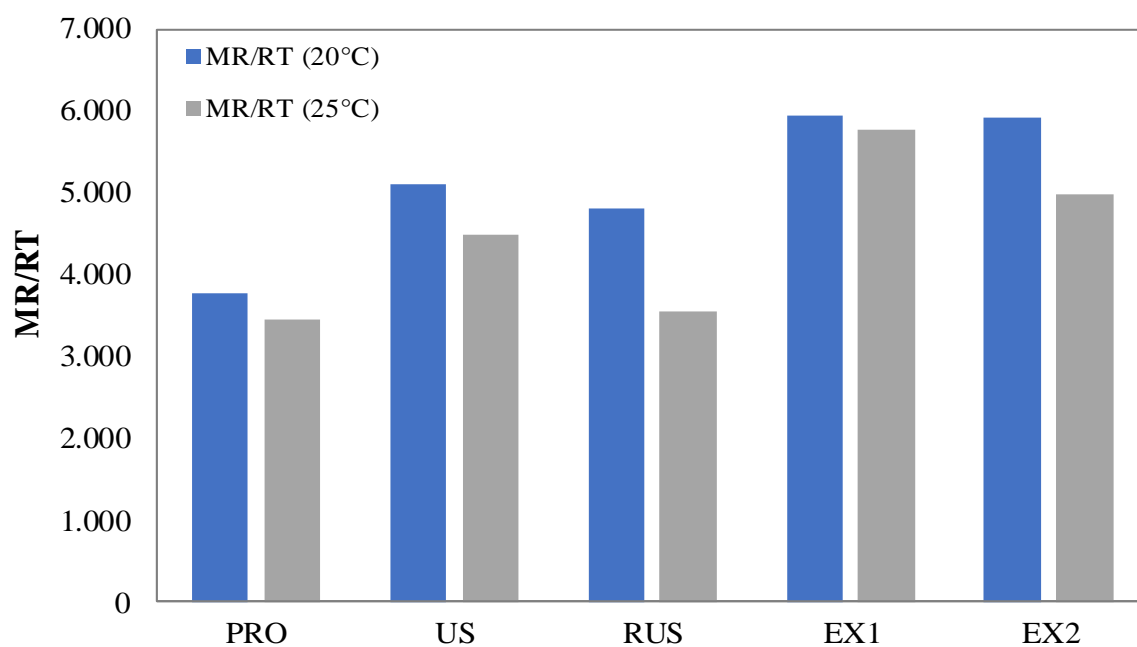


Figura 85 – Relação MR/RT das misturas asfálticas estudadas.



Em relação aos resultados obtidos de módulo de resiliência, a mistura usinada apresentou maiores valores para a temperatura de 20°C, cerca de 86% superior ao valor do módulo da

mistura projetada. Isto pode ter ocorrido pelo fato de a mistura usinada ter menor teor de ligante asfáltico e, também, em função do envelhecimento devido ao processo de produção em usina e ao tempo de armazenamento, o que ocasiona o enrijecimento do ligante asfáltico e, conseqüentemente, da mistura. Faccin (2018) estudou a mesma mistura usinada usada nesta pesquisa e encontrou um valor médio de módulo de 7406 MPa, para temperatura de 25°C, semelhante ao obtido neste estudo.

As misturas extraídas apresentaram módulos significativamente superiores aos da mistura projetada, principalmente na temperatura de 20°C. O coeficiente de variação também é superior, possivelmente pelo fato de os corpos de prova serem extraídos de campo, com sonda rotativa, o que pode gerar maior variabilidade nos dados devido a irregularidade das amostras.

A razão entre o módulo de resiliência e a resistência à tração agrega informações de rigidez e resistência, sendo desejável menores valores desta razão, buscando menor rigidez para evitar elevada absorção de tensões, que induzem ao trincamento precoce do revestimento, e maior resistência na ruptura. Neste contexto, a mistura projetada foi a que apresentou menor razão MR/RT.

5.5.3 Módulo dinâmico

Para as análises utilizando o modelo de dano contínuo viscoelástico, é necessária a caracterização viscoelástica linear dos materiais, obtida pelo ensaio de módulo dinâmico. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C e as curvas isotermas foram transladadas para uma temperatura de referência, dando origem às curvas mestras, ajustadas por uma função sigmoïdal (equação (42)). Os coeficientes obtidos nos ajustes das funções sigmoïdais de todas as misturas são apresentados na Tabela 16. As curvas mestras ajustadas do módulo dinâmico, juntamente com as curvas dos fatores de deslocamento, são apresentadas na Figura 86 e na Figura 87 para as escalas semi-log e log-log, respectivamente. Na Figura 88 são apresentadas as curvas mestras para o ângulo de fase, também ajustadas pela função sigmoïdal. As frequências foram reduzidas para temperatura de referência de 20°C, conforme descrito no item 2.5.

Tabela 16 – Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal usado para determinação do módulo dinâmico.

Mistura	E_0	E_∞	Coeficientes do modelo sigmoidal			
			δ	α	β	γ
Projetada (PRO)	26,2	32426	4,51	-3,09	1,06	0,55
Usinada (US)	74,4	33932	4,53	-2,66	1,10	0,63
Reprodução Usina (RUS)	23,5	35370	4,55	-3,18	1,02	0,54
Extraído trecho 1 (EX1)	29,8	23336	4,37	-2,89	1,20	0,65
Extraído trecho 2 (EX2)	21,9	27353	4,44	-3,10	1,17	0,61

Figura 86 – Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala semi-log.

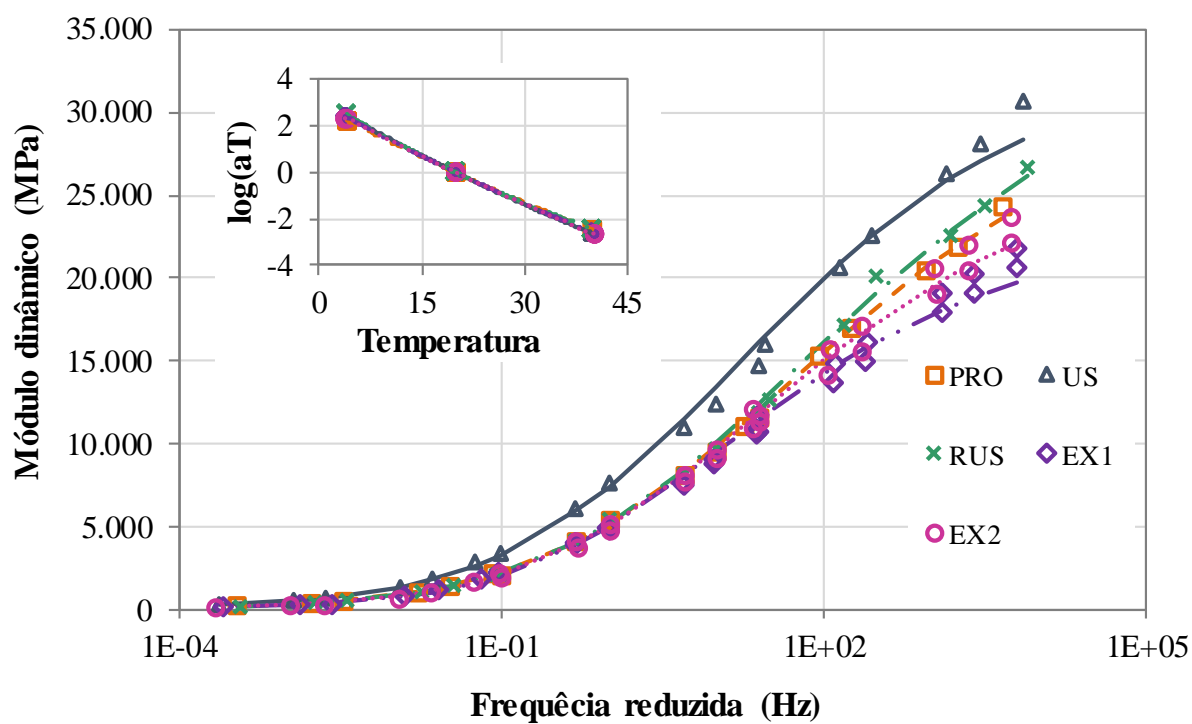


Figura 87 – Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log.

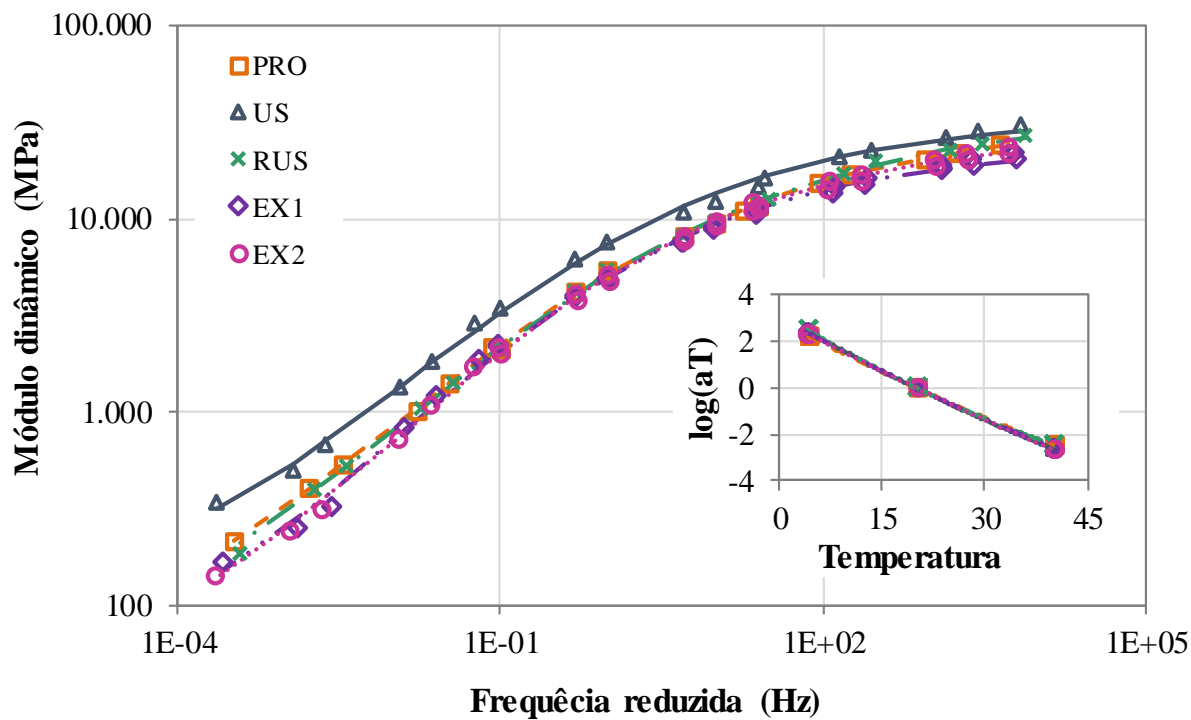
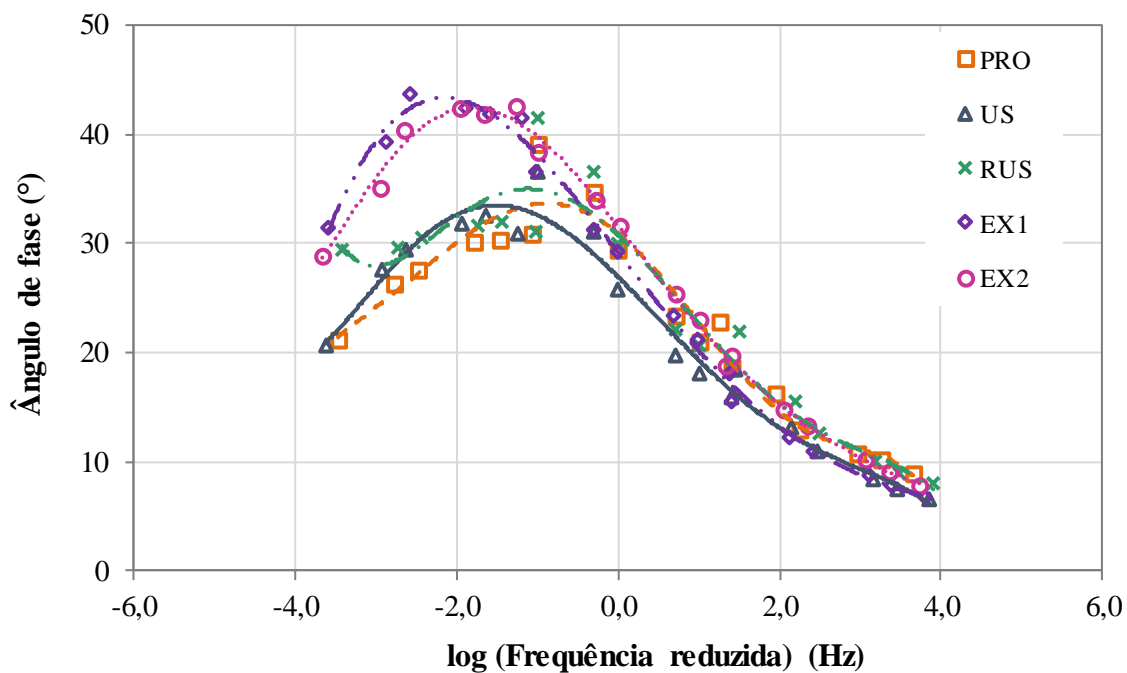


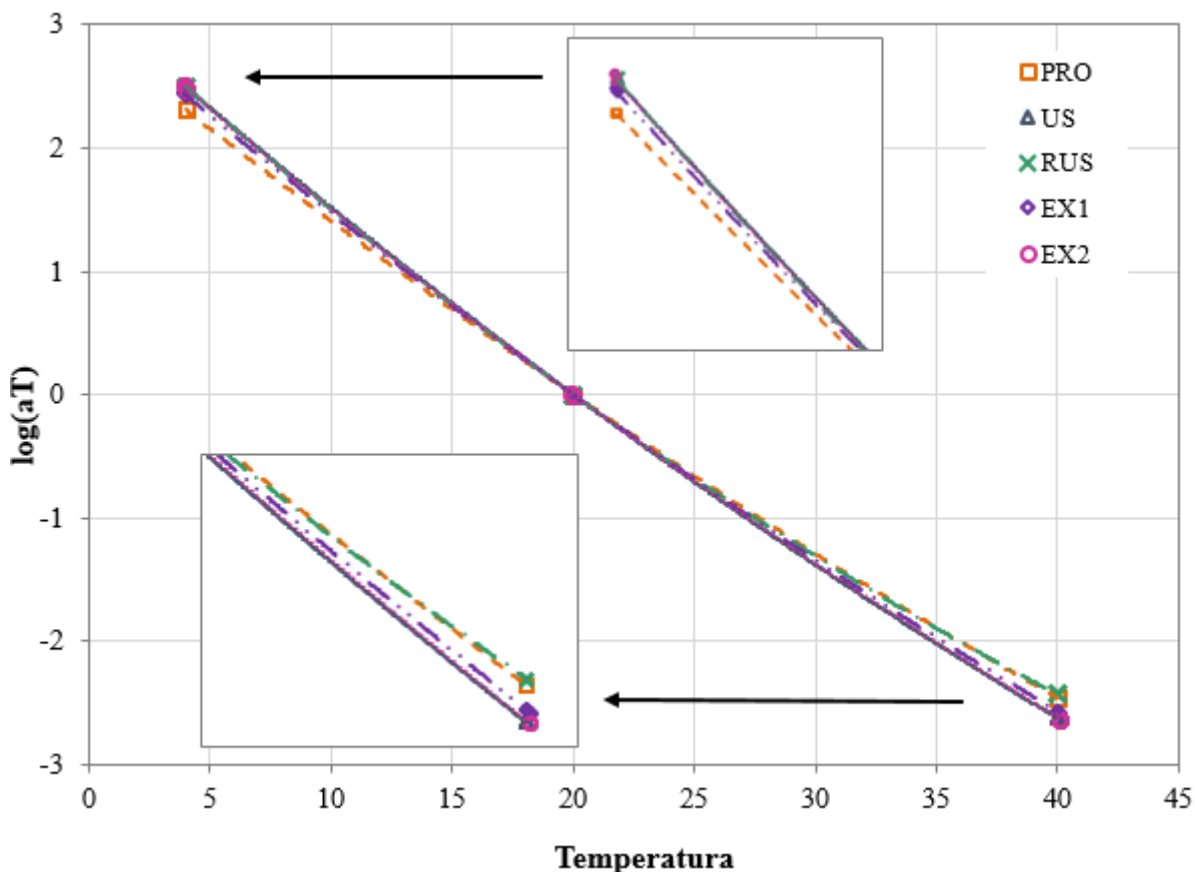
Figura 88 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas estudadas.



Estes resultados indicam que as respostas viscoelásticas das misturas variam quando ocorre mudança na forma de produção das mesmas, usina e laboratório, bem como alteração no teor de ligante. A mistura usinada (US) apresentou maiores valores de módulo dinâmico tanto para altas frequências (baixas temperaturas) quanto para baixas frequências (altas temperaturas), o que pode estar relacionado ao processo de envelhecimento da mistura em usina que, neste caso, parece ser mais severo que o simulado no laboratório em estufa por um período de duas horas. A mistura reprodução usina, que apresenta um teor de ligante de 4,7%, é mais rígida que a mistura projetada, com teor de ligante de 5,2%, para altas frequências (baixas temperaturas), enquanto em baixas frequências (altas temperaturas) os valores de módulo são semelhantes, pois em altas temperaturas os agregados exercem um papel mais importante que o ligante asfáltico.

Além disso, os fatores de deslocamento ($\log(aT)$), mostrados de forma detalhada na Figura 89, indicam que as misturas usinada e extraído trecho 2 são menos estáveis e mais suscetíveis as mudanças de temperatura, quando comparadas com as outras misturas avaliadas.

Figura 89 – Curvas $\log(aT)$ para as misturas estudadas (20°C temperatura de referência).



O ângulo de fase está relacionado com as propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos. A Figura 88 indica que as misturas possuem propriedades viscoelásticas semelhantes nas frequências mais altas (baixas temperaturas), enquanto diferenças significativas foram observadas em frequências mais baixas (altas temperaturas) para as misturas extraídas (EX1 e EX2), indicando uma menor elasticidade nesta condição. Cabe salientar, que as misturas extraídas foram ensaiadas com amostras menores, 38 mm de diâmetro e 110 mm de altura extraídas de vigotas, apresentando volume de vazios inferiores aos das demais misturas.

Para análise do modelo S-VECD, a parcela do módulo dinâmico correspondente ao módulo de armazenamento (E') foi interconvertido para módulo de relaxação, utilizando as séries de Prony. Os valores de E' de cada mistura foram ajustados pela função sigmoideal da equação (47) e os coeficientes de ajuste são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes obtidos do ajuste sigmoideal do módulo de armazenamento.

Mistura	Coeficientes de ajuste			
	max E'	k	δ	γ
Projetada	2,32E+07	4,94	-0,86	-0,76
Usinada	2,35E+07	5,19	-1,11	-0,84
Reprodução Usina	2,35E+07	4,84	-0,91	-0,77
Extraído trecho 1	2,32E+07	4,48	-1,09	-0,66
Extraído trecho 2	2,32E+07	4,60	-1,02	-0,72

Os ajustes das séries de Prony para o E' e para o módulo de relaxação foram realizados usando o método da colocação, sendo as séries descritas com 17 termos alterando os tempos de relaxação entre $2,0 \times 10^8$ e $2,0 \times 10^{-8}$, em intervalos de uma década. Assim, os ajustes obtidos para ρ_i e E_i são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony.

ρ_i	E_i				
	PRO	US	RUS	EX1	EX2
2,0E+08	1681	1672	1451	2197	1591
2,0E+07	1499	1784	1305	1554	1281
2,0E+06	3829	4743	3343	3919	3244
2,0E+05	8369	11157	7358	8170	6951
2,0E+04	19367	27453	17211	18883	16181
2,0E+03	48070	71926	43513	48940	41692
2,0E+02	134211	211015	125210	146632	124709
2,0E+01	430307	708409	418767	485984	429266
2,0E+00	1418227	2315830	1436801	1491194	1440529
2,0E-01	3588958	5108861	3699608	3339685	3520337
2,0E-02	5501554	6139586	5643970	4822226	5241260
2,0E-03	5083846	4382893	5146115	4653187	4900978
2,0E-04	3329318	2353604	3331763	3395827	3353322
2,0E-05	1826810	1117181	1814202	2108878	1939906
2,0E-06	919860	501374	908540	1199913	1030375
2,0E-07	444589	219781	437301	651507	524330
2,0E-08	216047	97490	211744	354893	268123

5.5.4 Ensaio de fadiga à tração indireta por compressão diametral

Os ensaios de fadiga à tração indireta por compressão diametral (FCD), sob tensão controlada, foram realizados para as misturas projetada (PRO), usinada (US) e extraído trecho 1 (EX1) e 2 (EX2), na temperatura de 20°C. Para a mistura usinada foi possível ensaiar somente cinco amostras, devido à dificuldade em realizar os ensaios, necessitando de cargas muito altas em função da elevada resistência da mistura. Já para a mistura reprodução usina, os ensaios não puderam ser realizados devido a problemas técnicos no equipamento. No Apêndice A são apresentados os resultados detalhados para cada uma das misturas avaliadas.

Os resultados de fadiga por compressão diametral foram modelados usando a tensão de tração (Tabela 19), a deformação específica inicial (Tabela 20) e a energia dissipada inicial (Tabela 21). As curvas de fadiga determinadas considerando a tensão de tração, a deformação específica inicial e energia dissipada inicial são mostradas na Figura 90, Figura 91 e Figura 92, respectivamente.

Tabela 19 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para tensão de tração.

Parâmetros	$N = a \times \sigma^{-b}$			
	PRO	US	EX1	EX2
a	2,23E+16	8,95E+27	5,78E+14	1,67E+12
b	4,71	8,35	4,47	3,41
R ²	0,98	0,90	0,99	0,99

Tabela 20 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para deformação específica inicial.

Parâmetros	$N = c \times \epsilon_i^{-d}$			
	PRO	US	EX1	EX2
c	1,81E-12	1,04E-16	1,23E-09	2,57E-09
d	3,86	5,01	2,90	2,89
R ²	0,74	0,86	0,95	0,93

Tabela 21 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FCD para energia dissipada inicial.

Parâmetros	$N = e \times DE_i^{-f}$			
	PRO	US	EX1	EX2
e	3,77E+07	3,57E+09	3,44E+05	3,52E+05
f	2,13	3,01	1,64	1,47
R ²	0,92	0,80	0,98	0,96

Figura 90 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio por compressão diametral considerando a tensão de tração.

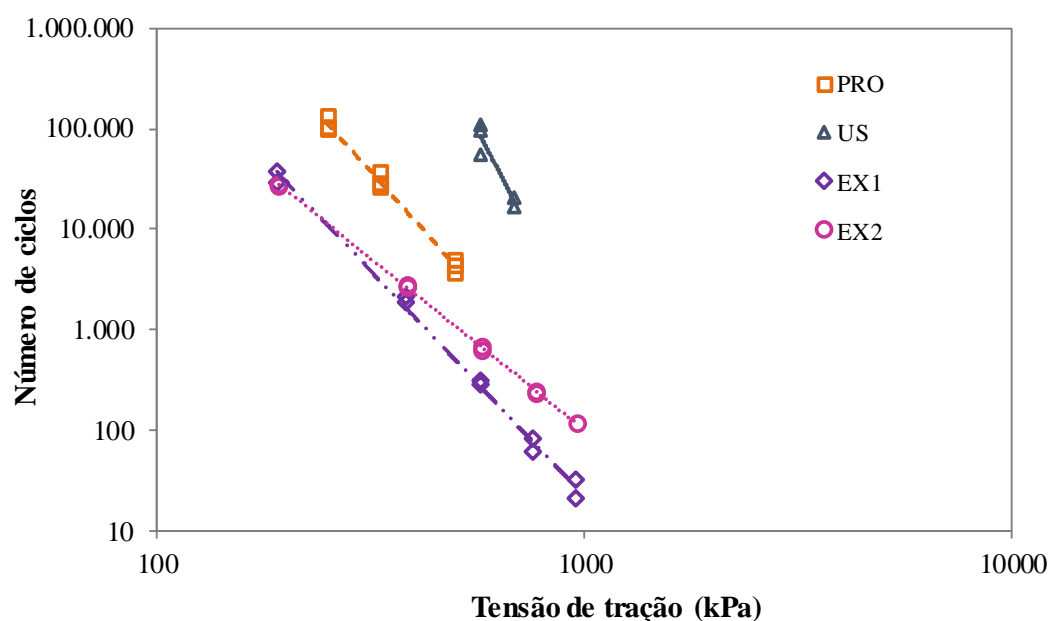


Figura 91 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio de compressão diametral considerando a deformação específica inicial.

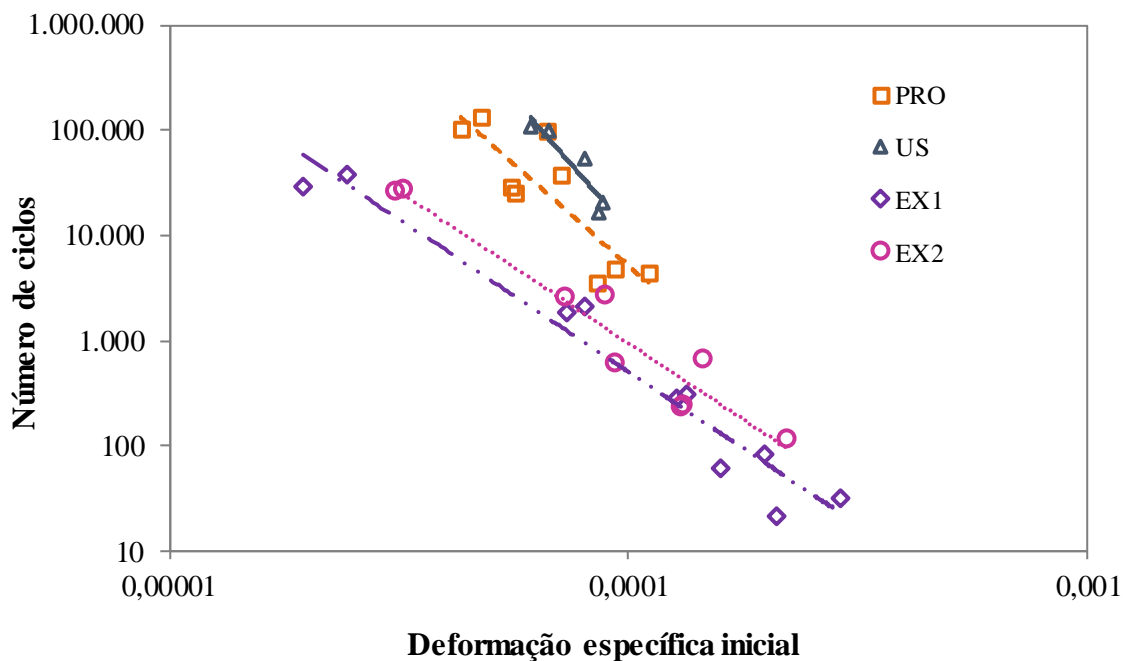
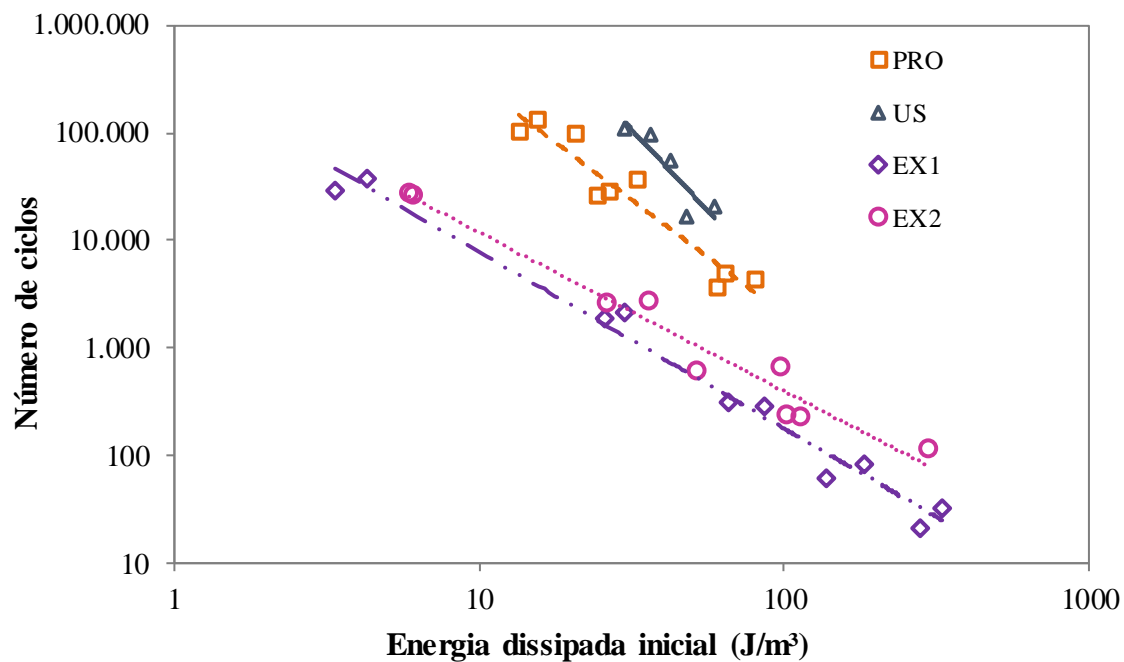


Figura 92 – Curvas de fadiga obtidas no ensaio de compressão diametral considerando a energia dissipada inicial.

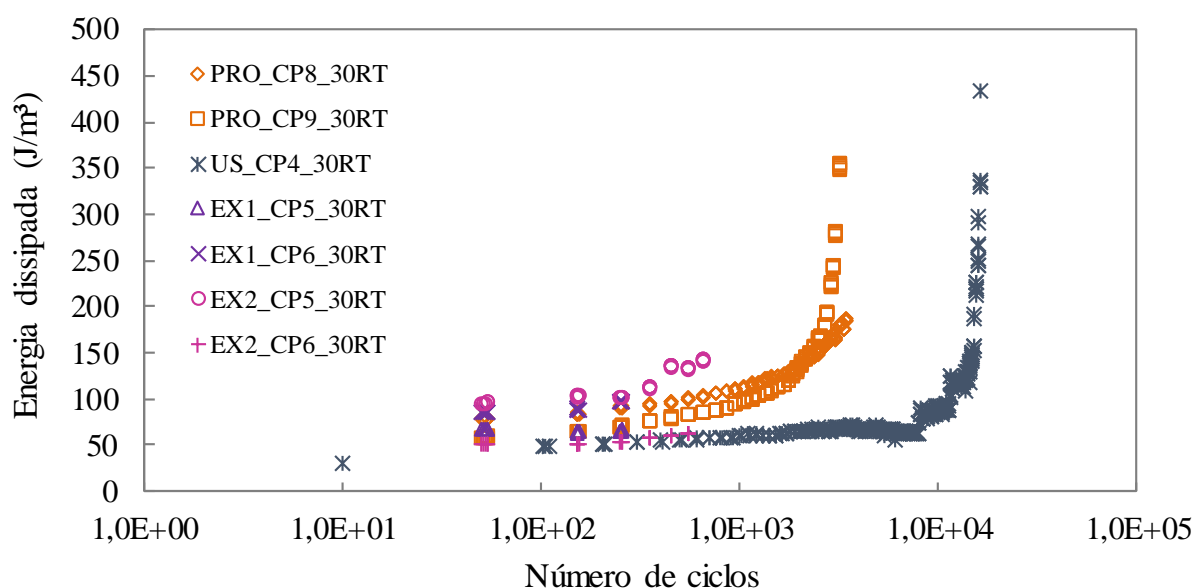


Para todas as condições analisadas as curvas de fadiga das misturas estudadas apresentaram uma boa correlação, com R^2 variando de 0,74 a 0,99, e a maior dispersão de resultados foi para

a mistura projetada, considerando o número de ciclos em função da deformação específica inicial. Comumente a interpretação dessas curvas de fadiga está relacionada a declividade das retas e a posição das mesmas, assim, quanto menor a declividade e mais acima no gráfico encontra-se a linha de tendência do modelo, melhor o desempenho da mistura quanto à fadiga. No entanto, salienta-se que a análise direta dos modelos ou das curvas geradas a partir dos resultados de ensaios laboratoriais, para comparar a vida de fadiga, podem levar a conclusões equivocadas, pois cada mistura possui rigidez diferente, apresentando respostas estruturais diferenciadas.

Pode-se observar a semelhança das curvas obtidas para a energia dissipada com as curvas em função da deformação específica inicial. Estes resultados indicam a correlação entre a deformação de tração e o fenômeno de dissipação de energia, e como mostra a Figura 93, a mistura usinada, mais rígida, apresentou uma maior dissipação de energia ao longo do ensaio.

Figura 93 – Evolução da energia dissipada ao longo do ensaio de compressão diametral, para a percentagem de 30% de resistência à tração por compressão diametral.



Para analisar o desempenho à fadiga das misturas em conjunto com as respectivas rigidezes, foi utilizado o programa FlexPAVE™ para obtenção das tensões e deformações de tração na base da camada de revestimento, considerando a estrutura do pavimento da BR-116/RS. Os dados da estrutura foram apresentados na Figura 41 e o carregamento empregado foi de um eixo simples de rodas duplas, com carga por roda de 20 kN, pressão de inflação dos pneus de 560

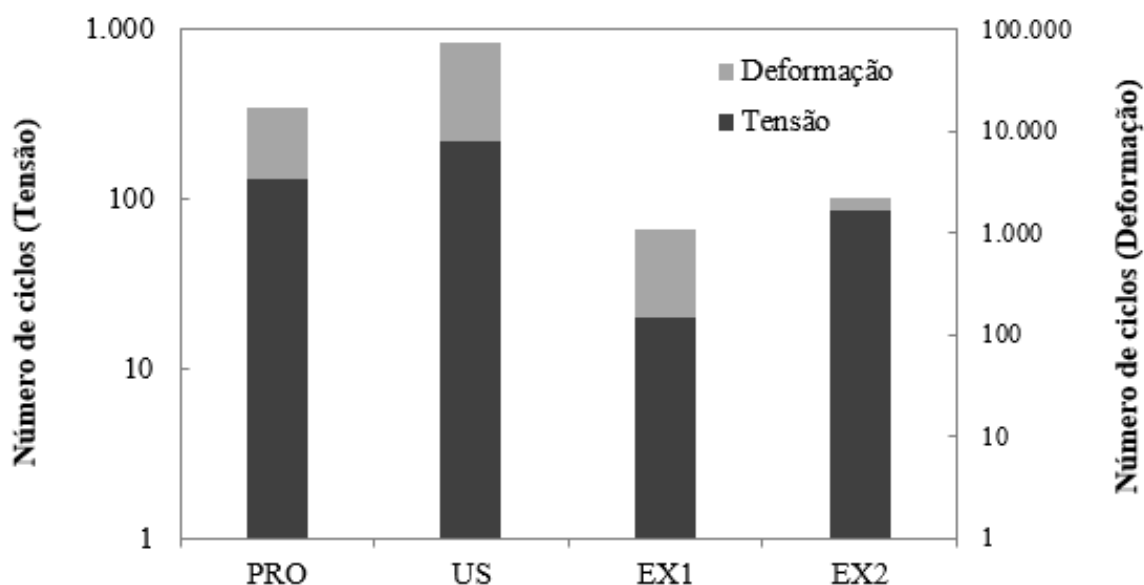
kPa e a temperatura considerada foi de 20°C para análise do comportamento viscoelástico da camada de revestimento, uma vez que esta foi a temperatura utilizada nos ensaios FCD.

A Tabela 22 apresenta os valores de tensão e deformação determinados pelo FlexPAVE™ e o número de ciclos para cada mistura, a partir da aplicação dos modelos gerados em laboratório. Conforme a Figura 94, é possível notar que mistura usinada indicou uma maior vida de fadiga (N_f) em relação as demais misturas, tanto para o critério de deformação de tração quanto para o de tensão de tração. Para as condições analisadas percebe-se que a consideração da tensão de tração é mais severa. Salienta-se que não foram aplicados fatores de correlação laboratório-campo ou função de transferência nos dados de N_f obtidos nos modelos, fazendo com que os valores de N_f apresentados sejam baixos. Além disto, esta análise pode ser modificada, caso novas espessuras ou novos valores de módulo sejam adotados.

Tabela 22 – Valores de tensão, deformação e número de ciclos (N_f) para fadiga calculados.

Mistura	Tensão de tração		Deformação de tração	
	Tensão (kPa)	N_f	Deformação (cm/cm)	N_f
PRO	1050	131	0,000073	16671
US	1167	220	0,000069	73688
EX1	1024	20	0,000077	1060
EX2	1039	86	0,000074	2202

Figura 94 – Vida de fadiga calculada para a estrutura analisada usando os modelos gerados no ensaio de compressão diametral.



5.5.5 Fadiga à flexão em quatro pontos

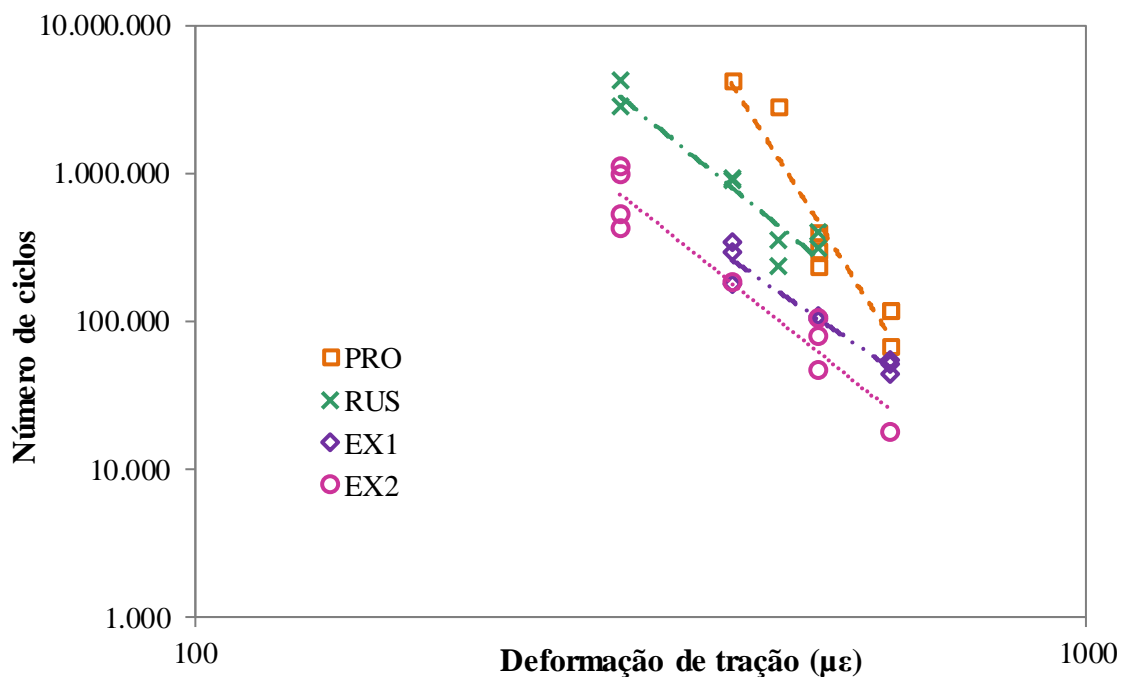
Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (F4P), sob deformação controlada, foram realizados para as misturas projetada, reprodução usina e extraído trecho 1 e 2. Salienta-se que não foi possível realizar este tipo de ensaio para a mistura usinada devido à grande quantidade de material necessário para a moldagem das placas. No Apêndice B são apresentados os resultados detalhados para cada uma das misturas avaliadas.

Os parâmetros obtidos para os modelos de fadiga das misturas, em função da deformação de tração, são apresentados na Tabela 23, e as curvas de fadiga das misturas são mostradas na Figura 95. Pode-se verificar que a declividade da linha de tendência do modelo obtido para a mistura projetada apresentou maior valor, indicando que esta mistura é mais suscetível a variação dos níveis de deformação.

Tabela 23 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio F4P para deformação.

Parâmetros	$N = g \times \epsilon^{-h}$			
	PRO	RUS	EX1	EX2
g	3,77E+31	4,96E+18	1,15E+16	6,21E+17
h	9,57	4,92	4,09	4,82
R ²	0,90	0,90	0,94	0,92

Figura 95 – Curvas de fadiga obtidas para os ensaios de flexão em quatro pontos em função da deformação de tração.



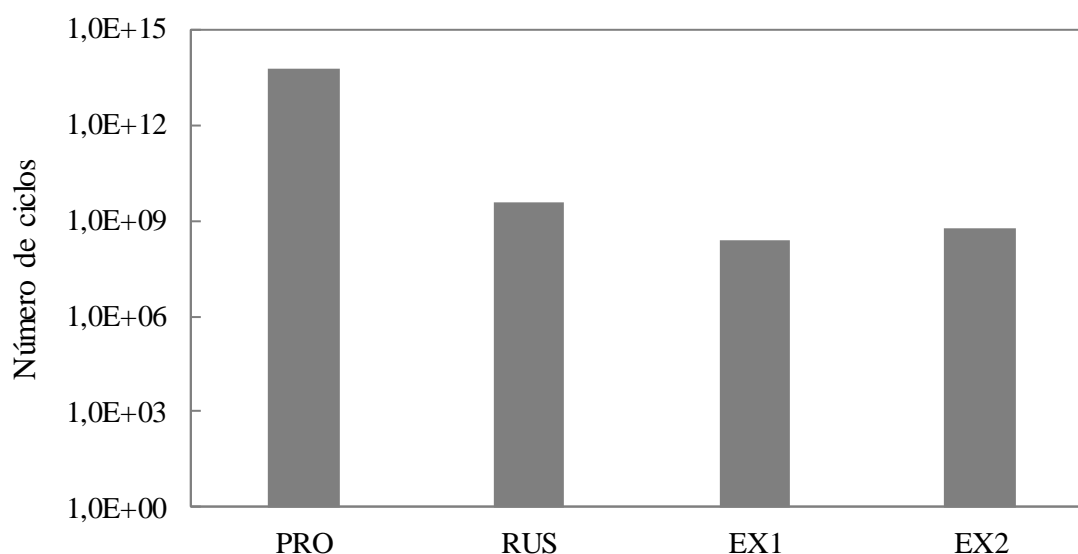
Assim como realizado com os dados dos ensaios de compressão diametral, também, foi analisado o desempenho à fadiga das misturas utilizando os modelos obtidos com os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos, empregando as deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento determinadas no programa FlexPAVETM para a estrutura do pavimento da BR-116/RS.

A Tabela 24 apresenta os valores de deformação de tração determinados no FlexPAVETM e o número de ciclos (N_f) para cada mistura, calculados com os modelos gerados em laboratório, enfatizando que não foram aplicados fatores de correlação laboratório-campo ou função de transferência nos dados de N_f . Como mostra a Figura 96, a mistura projetada (PRO) apresentou uma vida de fadiga (N_f) consideravelmente superior às demais misturas, fato este que pode estar relacionado ao baixo nível de deformação empregado na análise. Além disso, a mistura projetada apresentou menor rigidez para a temperatura de 20°C, usada como referência para o valor de módulo, e a tendência nesta configuração de ensaio, sob deformação controlada, é que misturas menos rígidas tenham um melhor desempenho à fadiga. Salienta-se que esta análise pode ser alterada, caso uma nova estrutura ou novos valores de módulo sejam adotados.

Tabela 24 – Valores de deformação e número de ciclos (N_f) para fadiga calculados.

Mistura	Deformação de tração	
	Deformação ($\mu\epsilon$)	N_f
PRO	73,1	5,47E+13
RUS	72,6	3,54E+09
EX1	76,6	2,25E+08
EX2	74,3	6,03E+08

Figura 96 – Vida de fadiga calculada para a estrutura analisada usando os modelos gerados no ensaio de flexão em quatro pontos.



Em relação à energia dissipada avaliada no ensaio de flexão em quatro pontos, os parâmetros obtidos para os modelos de fadiga das misturas são apresentados na Tabela 25, e as curvas de fadiga das misturas estudadas são mostradas na Figura 97. Na Figura 98 é apresentada a evolução da energia dissipada ao longo do ensaio, para um nível de deformação de $500 \mu\epsilon$, podendo-se constatar que a mistura extraída do trecho (EX2), com maior valor de rigidez inicial na flexão conforme dados da Figura 99, apresentou uma maior dissipação de energia inicial. Além disso, a taxa de queda da dissipação de energia, que é proporcional a redução da tensão aplicada para manutenção da mesma deformação, para as misturas com maior rigidez na flexão, extraído trecho 2 (EX2) e extraído trecho 1 (EX1), é mais acentuada em relação as misturas menos rígidas, projetada (PRO) e reprodução usina (RUS). Assim, para as misturas EX2 e EX1 verificou-se um colapso abrupto em direção ao fim da vida de fadiga, enquanto para a mistura

projetada a taxa de redução da energia dissipada manteve-se constante, sem apresentar indícios do processo de falha, há somente uma contínua tendência de redução da energia.

Tabela 25 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio F4P considerando a energia dissipada inicial.

Parâmetros	$N = i \times DE_i^j$			
	PRO	RUS	EX1	EX2
i	2,00E+19	1,45E+11	3,89E+10	5,05E+11
j	5,06	2,07	2,00	2,42
R ²	0,91	0,89	0,93	0,91

Figura 97 – Curvas de fadiga obtidas para os ensaios de flexão em quatro pontos em função da energia dissipada inicial.

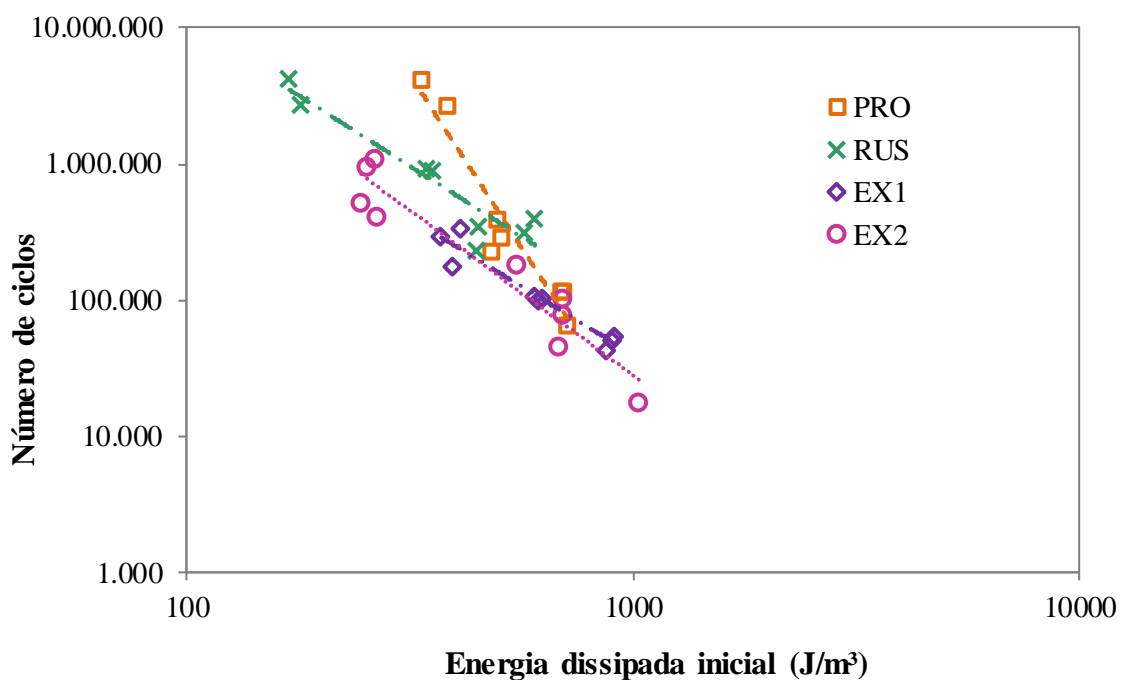


Figura 98 – Evolução da energia dissipada ao longo do ensaio de flexão em quatro pontos, para o nível de deformação de $500\mu\epsilon$.

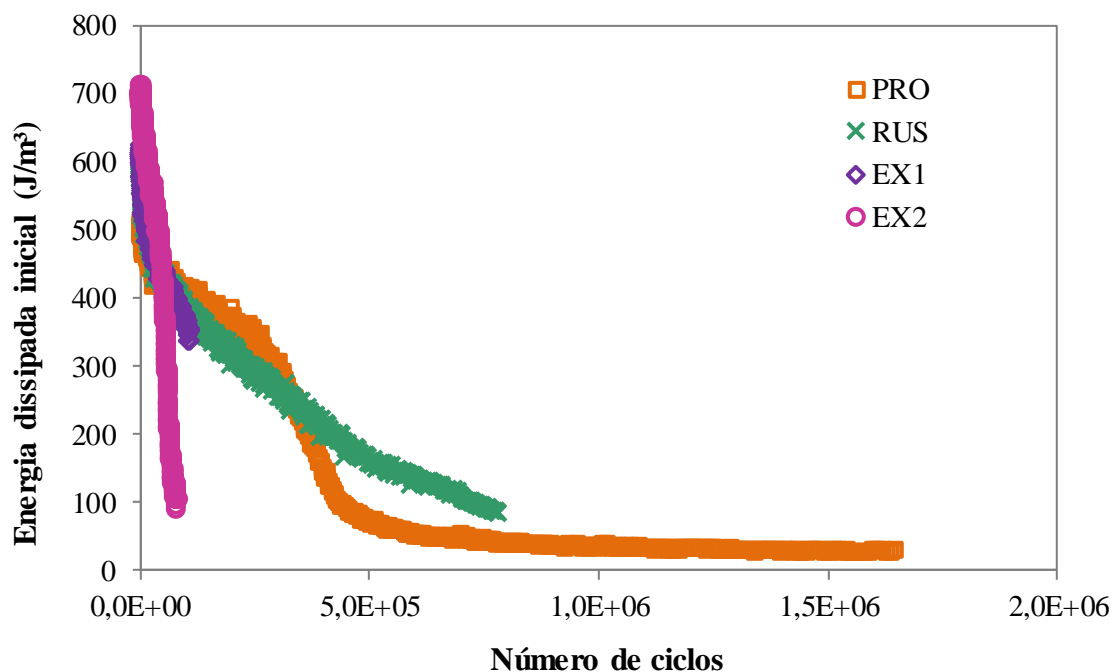
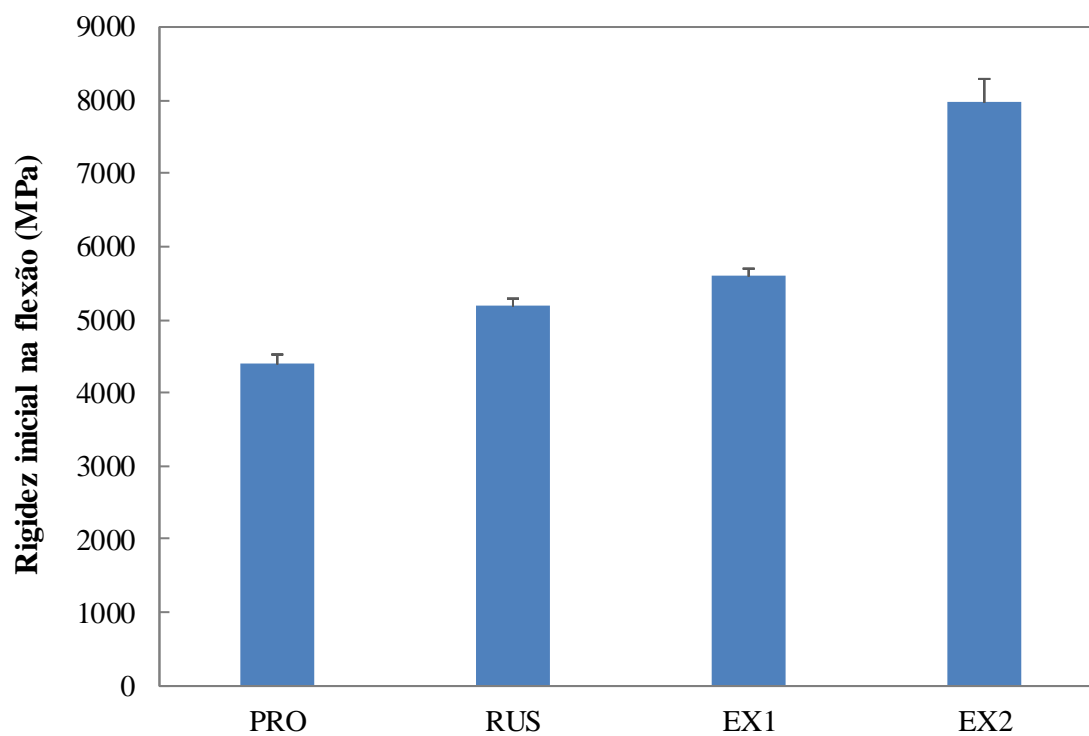


Figura 99 – Rigidez inicial na flexão das misturas para temperatura de 20°C .



5.5.6 Fadiga a tração direta

As análises e geração das curvas características de dano foram realizadas seguindo os equacionamentos e metodologias do modelo S-VECD, detalhado no item 2.5 deste trabalho. Na Tabela 26 é apresentado um resumo dos principais parâmetros que foram usados para analisar o comportamento à fadiga das misturas asfálticas estudadas empregando os dados obtidos dos ensaios de fadiga por tração direta, bem como a avaliação realizada usando cada parâmetro.

Tabela 26 – Resumo dos principais parâmetros avaliados a partir dos dados do ensaio de fadiga por tração direta.

Parâmetro		Curva de obtenção	Avaliação
C x S	Comportamento do dano contínuo	Integridade (C) x Dano (S)	Maior perda de integridade para o mesmo dano – Pior
			Ruptura com maior integridade – Pior
G ^R	Critério de ruptura	Log (G ^R) x Log (N _f)	Menor inclinação (Δ) – Melhor
D ^R	Critério de ruptura	(1-C) x N _f	Maior D ^R – Melhor
S _{app}	Indicador de capacidade de dano	função de D ^R	Maior S _{app} – Melhor
FAF	Fator de área de fadiga	Área [log (N _f) x Log (ε)]	Maior FAF – Melhor

Para os ensaios de fadiga por tração direta foram utilizadas três amostras de cada mistura, cujas características volumétricas e tamanhos das amostras são apresentados na Tabela 27. Cabe salientar que o volume de vazios (VV) das amostras compactadas em laboratório está dentro do valor alvo de 4,0% ± 0,5%, enquanto as amostras extraídas apresentaram valores inferiores, devido à extração de vigotas.

Tabela 27 – Parâmetros volumétricos das amostras ensaiadas à fadiga por tração direta.

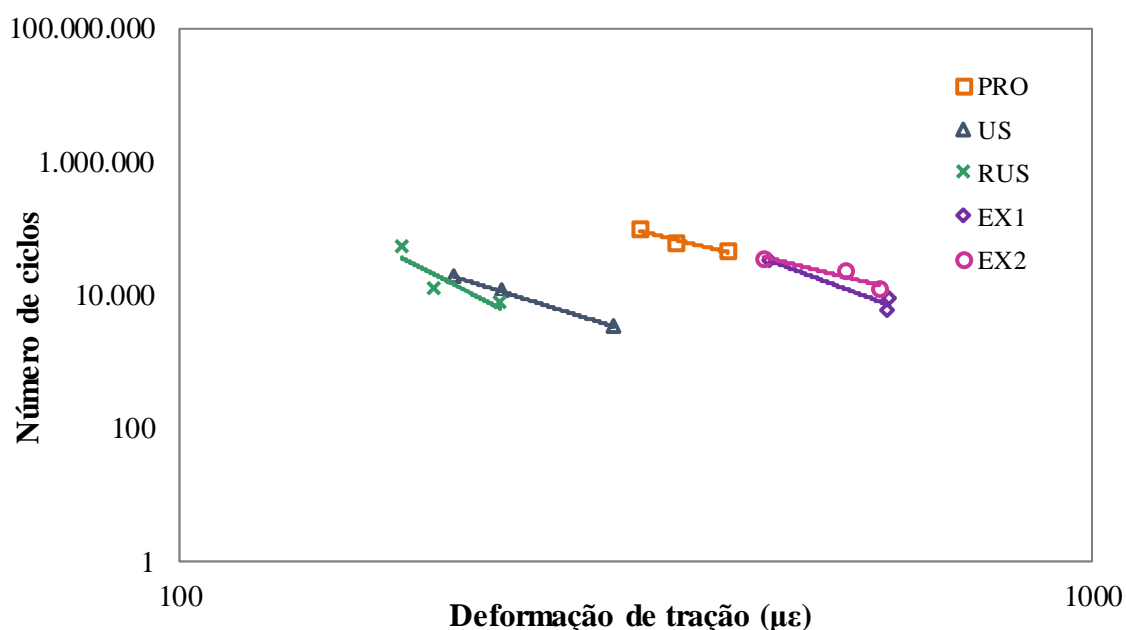
Mistura	Amostra	VV (%)	VV _{médio} (%)	CV (%)
Projetada – PRO (10 cm x 13 cm)	1	3,8	3,8	3,2
	2	3,9		
	3	3,7		
Usinada – US (10 cm x 13 cm)	1	4,1	4,2	2,8
	2	4,1		
	3	4,3		
R. Usina – RUS (10 cm x 13 cm)	1	4,1	4,1	1,4
	2	4,1		
	3	4,2		
Extraído trecho 1 – EX1 (3,8 cm x 11 cm)	1	3,3	3,3	0,0
	2	3,3		
	3	3,3		
Extraído trecho 2 – EX2 (3,8 cm x 11 cm)	1	3,1	3,4	7,5
	2	3,6		
	3	3,4		

A Tabela 28 apresenta os parâmetros obtidos para os modelos de fadiga das misturas, em função da deformação, determinados a partir dos dados experimentais do ensaio FTD, e na Figura 100 as curvas de fadiga das misturas.

Tabela 28 – Parâmetros dos modelos de fadiga do ensaio FTD considerando a deformação.

Parâmetros	$N = k \times \epsilon^{-1}$				
	PRO	US	RUS	EX1	EX2
k	1,73E+13	1,33E+14	1,31E+20	1,08E+18	2,67E+13
l	3,30	4,28	6,94	5,11	3,35
R ²	0,89	0,99	0,78	0,94	0,90

Figura 100 – Curvas de fadiga das misturas estudadas determinadas com os dados experimentais obtidos no ensaio FTD (20°C).



Com os dados das curvas de fadiga obtidos com os resultados do ensaio FTD foram calculados, para cada mistura, o fator de área de fadiga (FAF), proposto por Nascimento (2015), para classificar as misturas asfálticas quanto a resistência à fadiga. Este fator corresponde a área sob a curva de fadiga (curva de Wöhler), no espaço log-log. Neste trabalho, utilizou-se um intervalo de deformação fixo entre 100 $\mu\epsilon$ e 200 $\mu\epsilon$, visto estar próximo das deformações encontradas na fibra inferior do revestimento em campo e nas simulações pelo FlexPAVETM. De maneira simplificada, quanto maior o FAF, melhor a resistência à fadiga da mistura, pois áreas maiores sob as curvas são ocasionadas pelo aumento do número de ciclos de falha (N_f) e, também, pela menor inclinação das curvas gerada por N_f maiores para deformações mais altas. Na Tabela 29 são apresentados os valores de FAF calculados para cada mistura, bem como a classificação ordenada da melhor a pior mistura, de acordo com este critério.

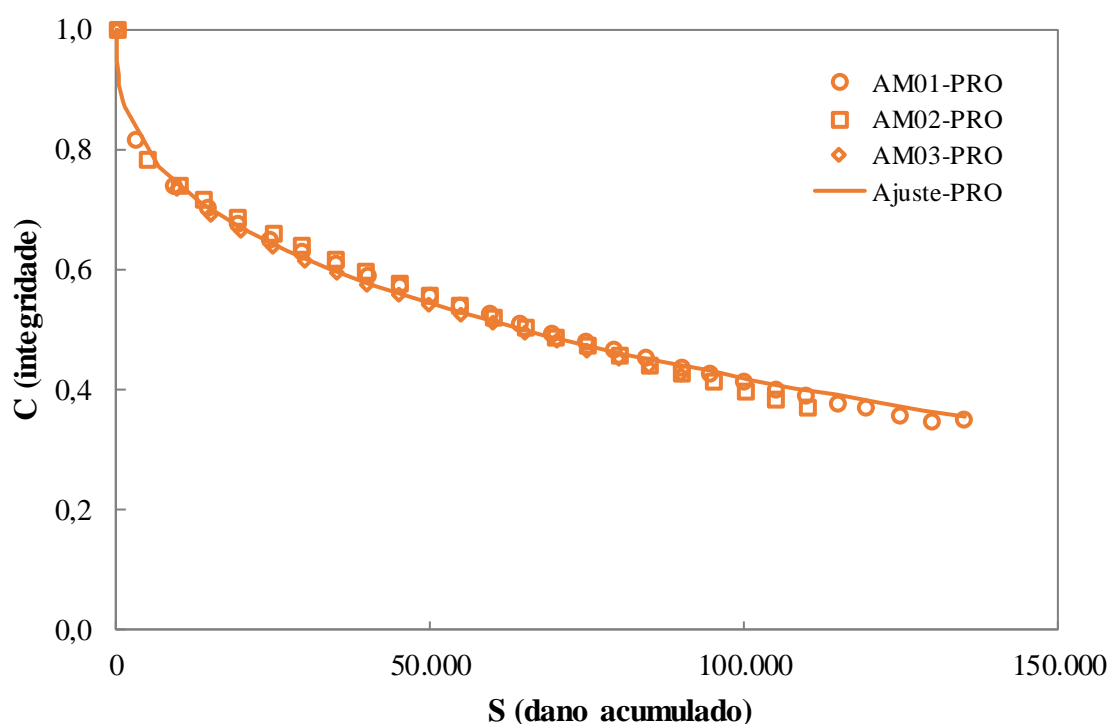
Tabela 29 – Classificação das misturas asfálticas pelo FAF.

Ranqueamento	Mistura	FAF
1	Extraído trecho 1 (EX1)	3,80
2	Extraído trecho 2 (EX2)	2,71
3	Projetada (PRO)	2,58
4	Reprodução usina (RUS)	2,53
5	Usinada (US)	1,30

Cabe salientar que, a classificação obtida pelo FAF com os dados experimentais não considera: a rigidez das misturas; o seu comportamento em temperaturas diferentes da utilizada no ensaio FTD; e, a combinação das propriedades das misturas com a estrutura do pavimento, o clima e a carga de tráfego. Isto pode afetar o desempenho em campo das misturas asfálticas, especialmente por apresentarem propriedades viscoelásticas diferentes. Além disso, os valores de FAF são sensíveis às condições estabelecidas de ensaio.

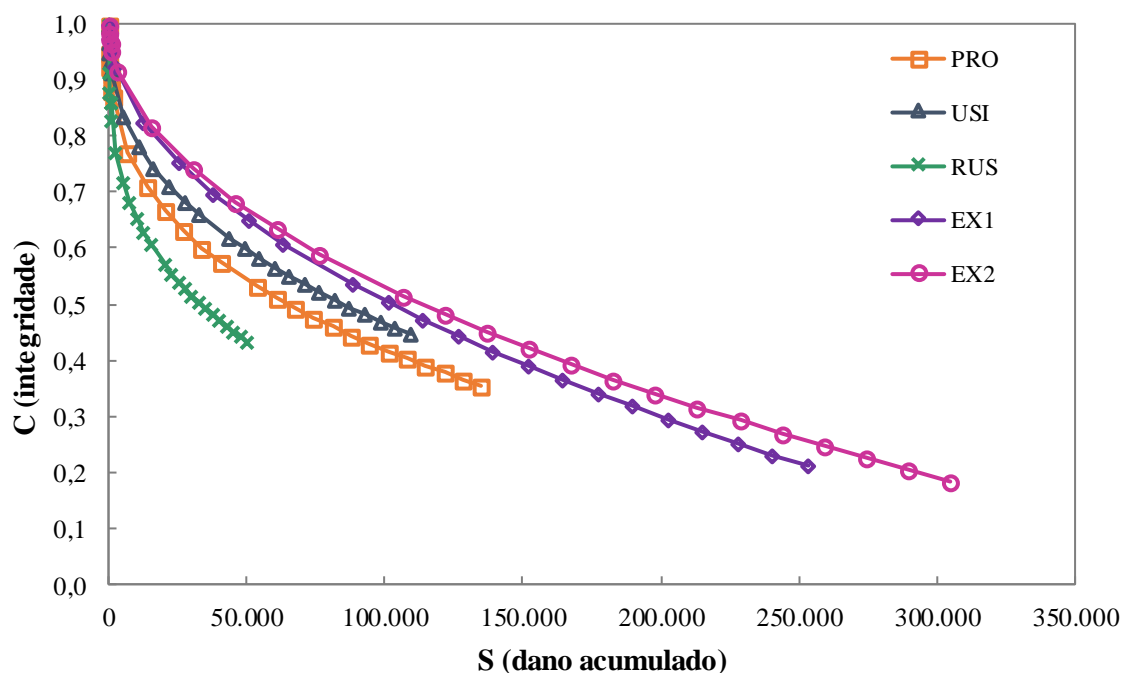
As curvas características de dano (C vs S) foram geradas a partir de um ajuste (função potência, conforme equação (39)) realizado para três amostras de cada mistura. A Figura 101 apresenta um exemplo de três amostras utilizadas para a determinação da curva C vs S gerada para a mistura projetada, as demais estão anotadas no Apêndice C.

Figura 101 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura projetada na temperatura de 20°C.



Na Figura 102 constam as curvas características de dano ajustadas para todas as misturas estudadas nesta pesquisa.

Figura 102 – Curvas características de dano de todas as misturas estudadas para a temperatura de 20°C.



Para uma melhor análise do desempenho das misturas quanto à fadiga é importante utilizar os dados das curvas características de dano em conjunto com as envoltórias de ruptura e as simulações, considerando as características da estrutura, tráfego e clima. No entanto, algumas observações podem ser feitas a partir das curvas C vs S , verificando-se a diferença significativa entre elas quanto ao acúmulo do dano.

As misturas usinada (US) e reprodução usina (RUS) rompem com maior integridade, apresentando menor tolerância ao acúmulo de dano, enquanto as misturas extraídas atingem a ruptura com menor nível de integridade e maior tolerância ao dano acumulado. Esta tendência também foi observada por Babadopulos *et al.* (2018) ao avaliar o comportamento de misturas asfálticas, com ligante asfáltico convencional, quando submetidas a diferentes períodos de envelhecimento. A mistura projetada (PRO) corresponde ao nível intermediário de integridade em relação às demais.

Pode-se observar, também, que a mistura reproduzida (RUS) em laboratório, mantendo a composição granulométrica e teor de ligante da mistura usinada (US), perde mais integridade para um mesmo nível de dano. Isto pode ser atribuído à condição de envelhecimento a curto prazo em laboratório, mantendo a mistura em estufa na temperatura de compactação por um período de duas horas. As misturas extraídas mantêm mais integridade mesmo quando

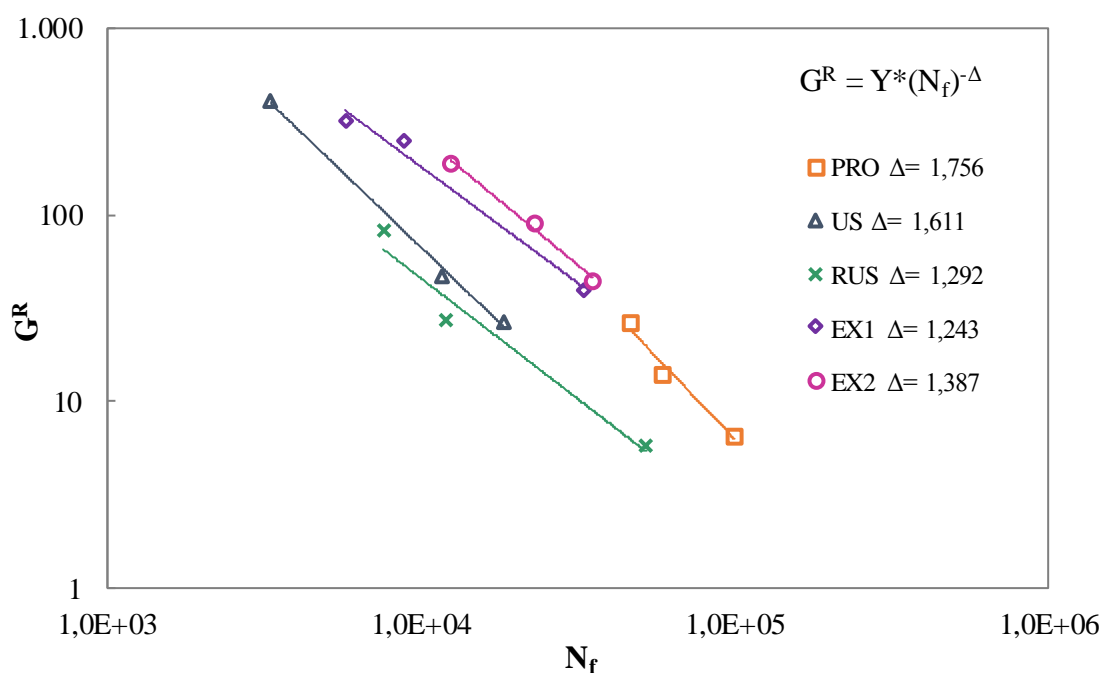
submetidas à uma quantidade significativa de dano, ou seja, são mais tolerantes ao dano, porém isto também pode estar vinculado ao menor volume de vazios.

Os parâmetros da função potência ajustada para as curvas C vs S são apresentados na Tabela 30, bem como os coeficientes de regressão das envoltórias de ruptura do G^R (Figura 103), os valores obtidos de D^R e o indicativo de capacidade de dano (S_{app}). Os valores de R^2 das envoltórias de ruptura do G^R e os desvios padrões do critério de ruptura do D^R demonstram uma baixa variabilidade experimental dos ensaios.

Tabela 30 – Parâmetros de ajuste da função potência para as curvas C vs S, coeficientes de regressão do critério de ruptura G^R e valores de D^R e S_{app} .

Mistura	Modelo C vs S		Critério de ruptura G^R			Critério de ruptura D^R		S_{app}
	C_{11}	C_{12}	Y	Δ	R^2	D^R	Desvio padrão	
Projetada	1,06E-02	0,348	3,82E+09	-1,756	0,97	0,54	0,04	13
Usinada	5,29E-03	0,401	1,87E+08	-1,611	0,99	0,38	0,07	6
Reprodução Usina	2,15E-02	0,302	6,80E+06	-1,292	0,96	0,43	0,04	4
Extraído trecho 1	1,49E-03	0,504	1,71E+07	-1,243	0,98	0,50	0,01	19
Extraído trecho 2	1,50E-03	0,499	1,71E+07	-1,387	0,99	0,52	0,02	22

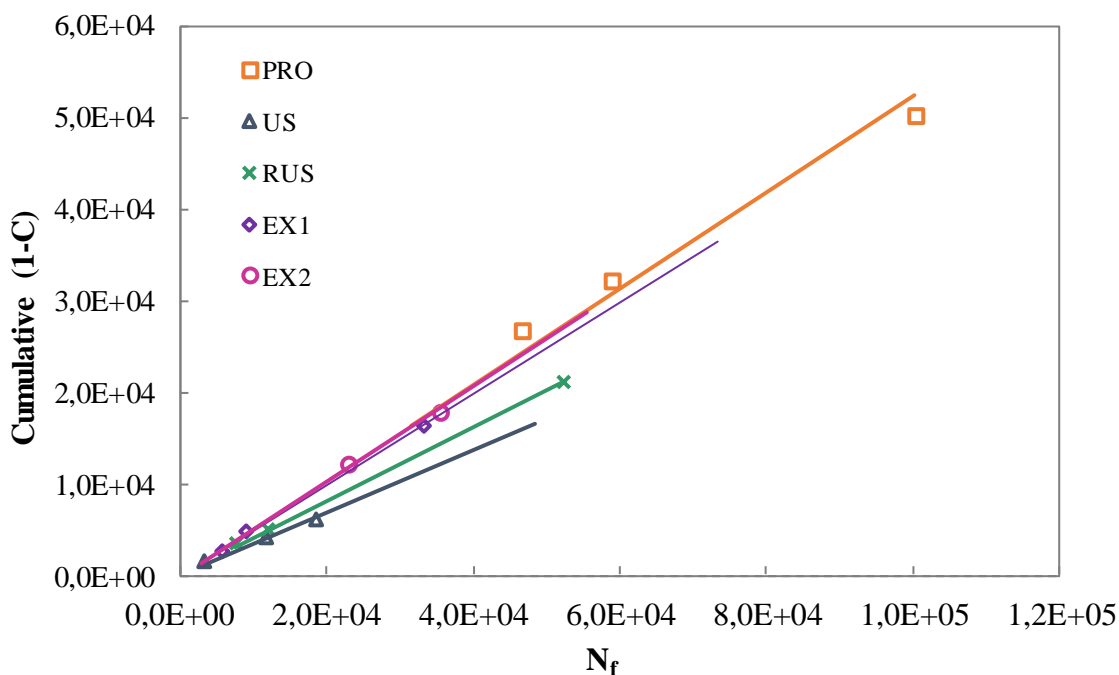
Figura 103 – Envoltórias de ruptura baseadas no G^R para as misturas estudadas.



De acordo com Sabouri *et al.* (2015), misturas com melhor desempenho à fadiga apresentam envoltórias com inclinações menores, pois para um mesmo valor de G^R , estas misturas apresentam um N_f superior. Assim, observa-se que a mistura EX1 apresenta menor inclinação em relação às demais misturas, enquanto a mistura PRO apresenta maior inclinação, para as envoltórias de ruptura do G^R .

As envoltórias de ruptura do D^R estão apresentadas na Figura 104, as quais devem ser lineares na escala aritmética. Pode-se observar que a mistura projetada apresentou maior inclinação da envoltória de ruptura D^R . Um maior valor de D^R está associado à uma maior capacidade de acúmulo de dano nas misturas, ou capacidade de dissipar energia até o momento da ruptura, nesta condição a mistura projetada apresenta maior D^R , enquanto a mistura usinada apresenta menor valor. Os valores de D^R obtidos para as misturas extraídas estão próximos da mistura projetada.

Figura 104 – Envoltórias de ruptura baseadas no D^R para as misturas estudadas.



Nota-se que as misturas apresentaram classificações diferentes quanto ao desempenho à fadiga considerando o critério de ruptura do G^R e do D^R . Isto pode estar relacionado ao fato do número de falha (N_f) obtido pelo critério do G^R ser determinado por uma função potência, em escala logarítmica, enquanto os valores de N_f obtidos pelo D^R são definidos por uma função linear em escala aritmética, sendo menos sensíveis à variações experimentais.

Considerando o parâmetro S_{app} , que usa o critério de ruptura do D^R na análise, os valores obtidos para as misturas foram significativamente diferentes. Um maior valor deste parâmetro representa melhor desempenho à fadiga. A mistura extraída trecho 2 (EX2) apresentou o maior valor, ranqueada por este critério como melhor no desempenho à fadiga, seguida da mistura extraída do trecho 1 (EX1), projetada (PRO), usinada (US) e reprodução usina (RUS). Na determinação do S_{app} , além do D^R , é considerada a rigidez das misturas, utilizando os dados de módulo dinâmico, assim, as misturas mais rígidas apresentaram um desempenho inferior à fadiga. A Tabela 31 mostra o resumo dos principais parâmetros obtidos no ensaio FTD e usados para avaliar o comportamento das misturas asfálticas quanto à fadiga.

Tabela 31 – Resumo dos principais parâmetros obtidos com o ensaio de fadiga por tração direta.

Misturas	Teor de ligante (%)	Volume vazios (%)	FAF	G^R (Δ)	D^R	S_{app}
Projetada (PRO)	5,2	3,8	2,58	-1,7558	0,54	13
Usinada (US)	4,7	4,2	1,30	-1,6111	0,38	6
Reprodução usina (RUS)	4,7	4,1	2,53	-1,2924	0,43	4
Extraído trecho 1 (EX1)	5,2	3,3	3,80	-1,2431	0,50	19
Extraído trecho 2 (EX2)	5,2	3,4	2,71	-1,3865	0,52	22

As curvas características de dano são independentes das condições de ensaio, podendo-se obter o comportamento das misturas para diversas condições, necessitando, contudo, a definição de um critério de ruptura. Neste trabalho, utilizaram-se os critérios de ruptura do G^R e do D^R .

Uma verificação da capacidade de previsão do comportamento à fadiga para cada um dos critérios de ruptura, G^R e D^R , foi realizada, e é apresentada na Figura 105 e Figura 106, respectivamente. Os marcadores representam os dados experimentais e as linhas representam os resultados previstos pelo modelo, para os mesmos níveis de deformação.

Figura 105 – Comparação dos dados experimentais com os dados simulados utilizando o critério de ruptura do G^R .

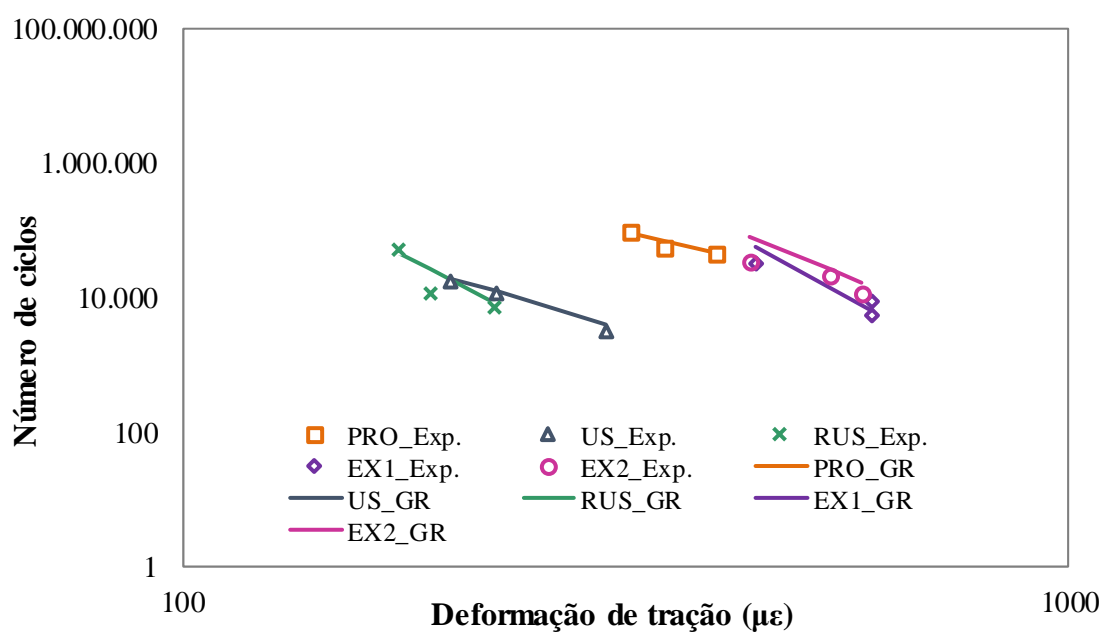
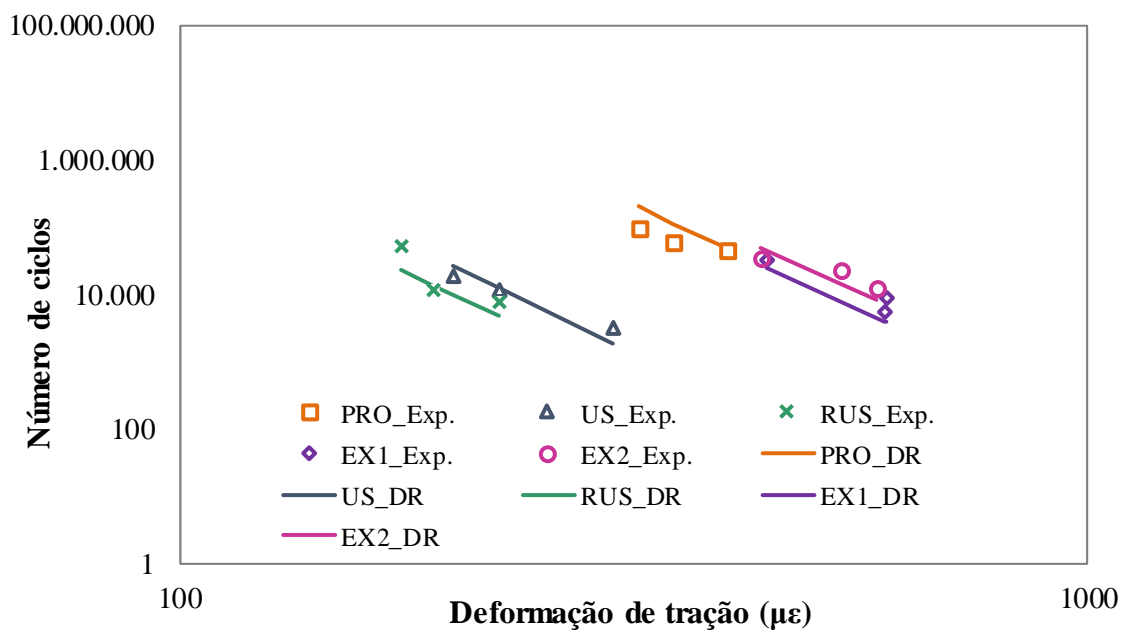
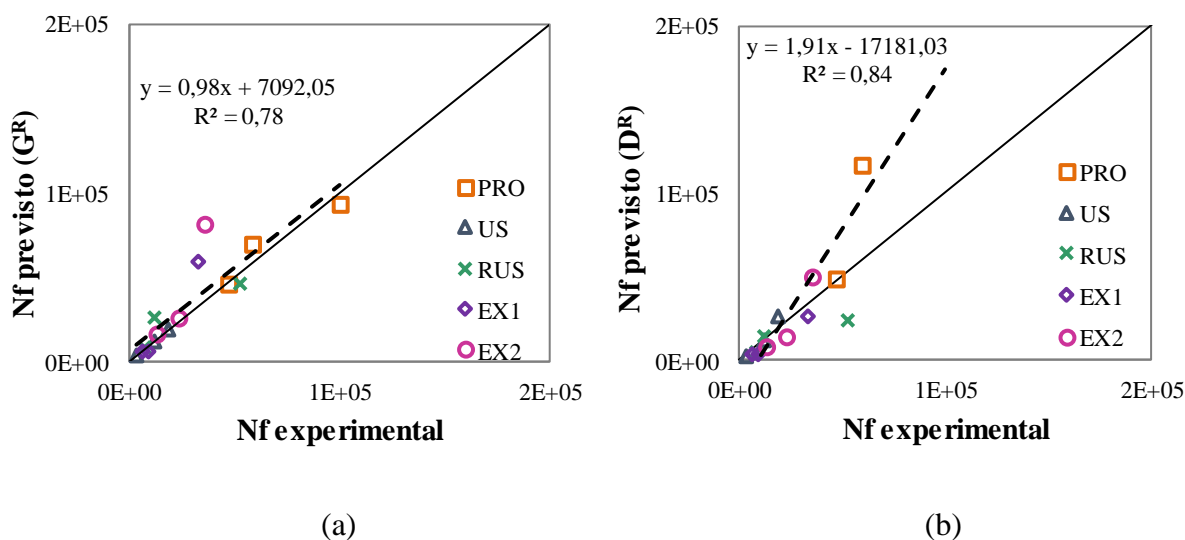


Figura 106 – Comparação dos dados experimentais com os dados simulados utilizando o critério de ruptura do D^R .



Na Figura 107 verifica-se a relação entre o N_f experimental, determinado pelo ensaio de fadiga tração direta, e o N_f previsto, utilizando o critério de ruptura do G^R e do D^R , plotados com a linha de igualdade.

Figura 107 – Relação entre o N_f experimental e o N_f previsto usando o critério de ruptura do G^R (a) e do D^R (b).



Os resultados de N_f obtidos com o critério do G^R apresentaram menor dispersão e a linha de tendência ficou mais próxima da linha de igualdade, mostrando boa correlação entre os dados experimentais e previstos por este critério de ruptura. Já os resultados de N_f determinados pelo critério do D^R apresentaram maior dispersão, ficando a linha de tendência superior à linha de igualdade. Assim, a tendência é prever número de ciclos até a ruptura superiores pelo critério do D^R em relação aos dados experimentais. Nota-se que a regressão linear obtida para os valores de N_f previsto pelo D^R apresentou um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,84, superior à obtida para os valores de N_f previstos pelo G^R , cujo R^2 foi igual a 0,78. Porém, verificou-se que a linha de igualdade considerando o critério do G^R apresentou um R^2 igual a 0,73, enquanto a linha de igualdade obtida para o critério do D^R apresentou R^2 igual a 0,63, constatando uma melhor correlação do N_f experimental das misturas estudadas com o N_f previsto pelo critério do G^R .

As curvas de fadiga (curvas de Wöhler) foram então modeladas para as temperaturas de 7°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C e 30°C (Figuras 108 a 113) adotando-se o critério de ruptura do G^R . Os níveis de deformação apresentados variam de 200 $\mu\epsilon$ à 400 $\mu\epsilon$, em intervalos de 50 $\mu\epsilon$, buscando compatibilizar com os dados obtidos em campo pela instrumentação e com as

temperaturas mínimas e máximas, relevantes para a fadiga, obtidas no banco de dados climáticos do MERRA. Também foram geradas as curvas de Wöhler para as mesmas temperaturas e níveis de deformação, conforme apresentado nas Figuras 114 a 119, adotando o critério de ruptura do D^R .

Figura 108 – Curvas de fadiga para temperatura de 7°C considerando o critério de ruptura do G^R .

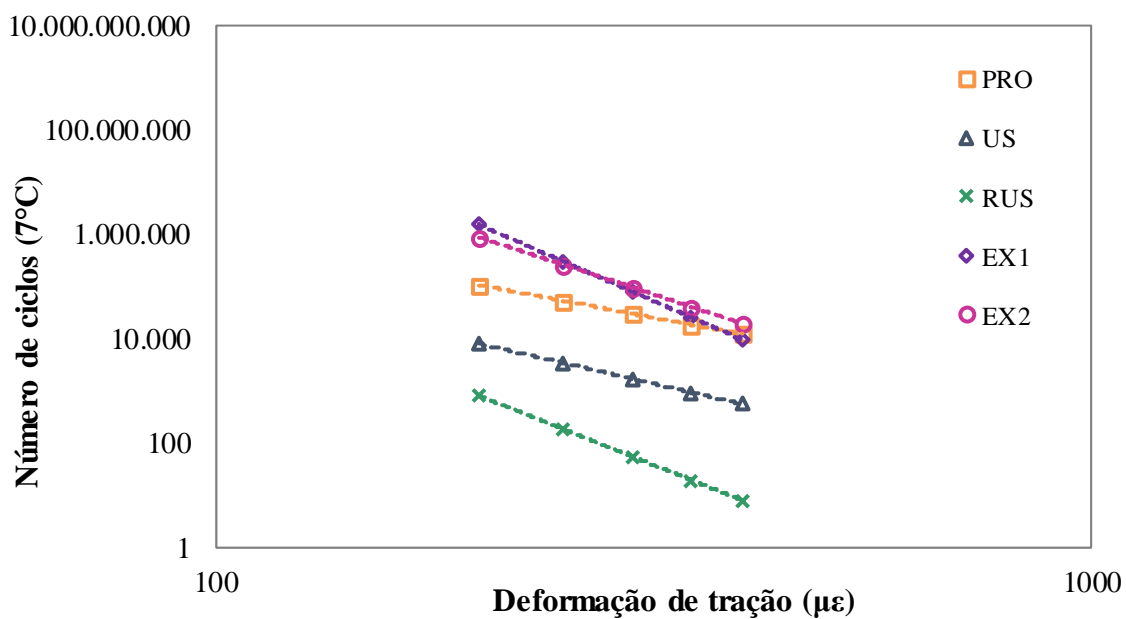


Figura 109 – Curvas de fadiga para temperatura de 10°C considerando o critério de ruptura do G^R .

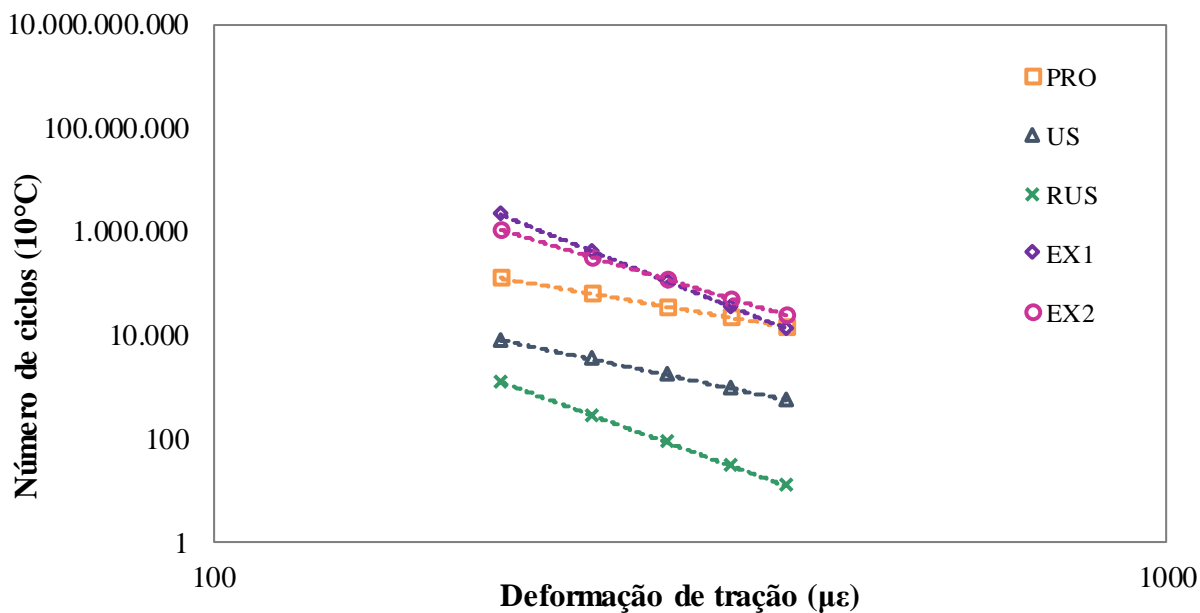


Figura 110 – Curvas de fadiga para temperatura de 15°C considerando o critério de ruptura do G^R .

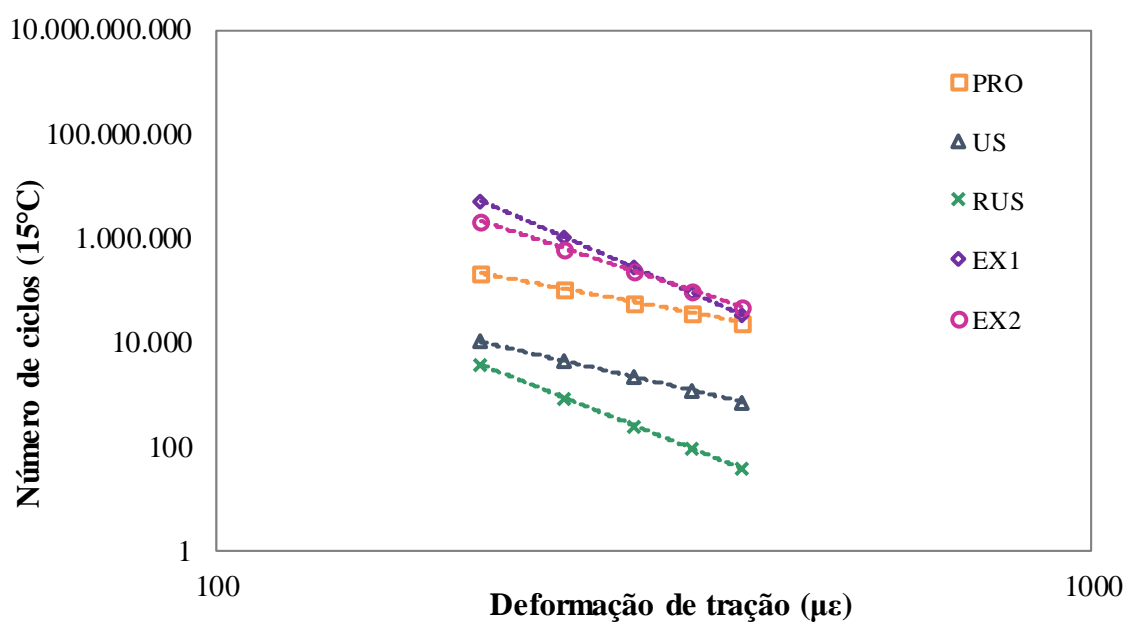


Figura 111 – Curvas de fadiga para temperatura de 20°C considerando o critério de ruptura do G^R .

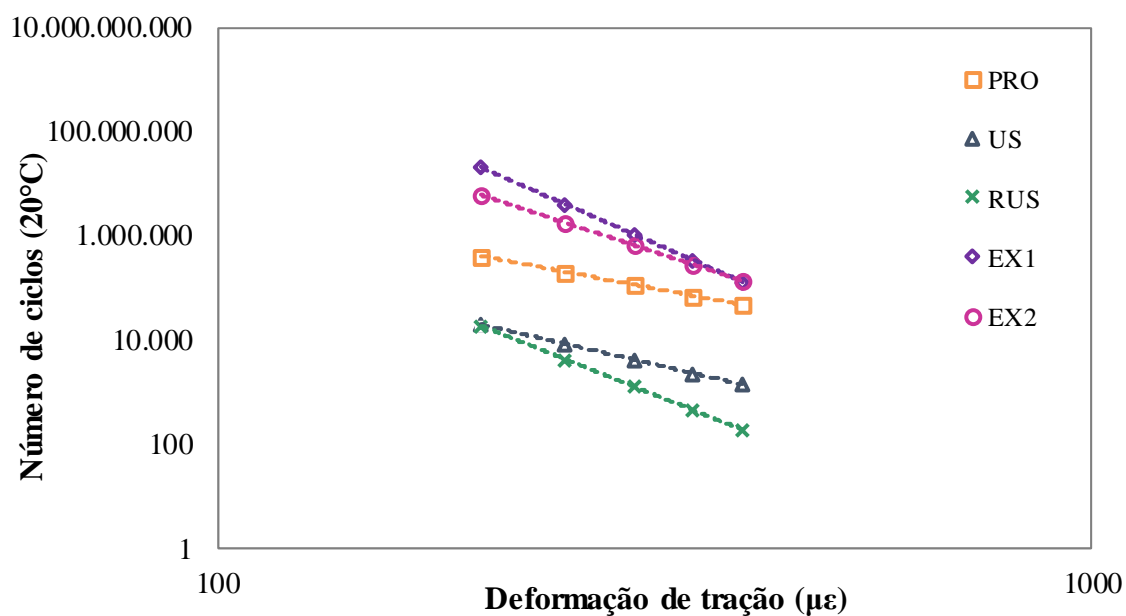


Figura 112 – Curvas de fadiga para temperatura de 25°C considerando o critério de ruptura do G^R .

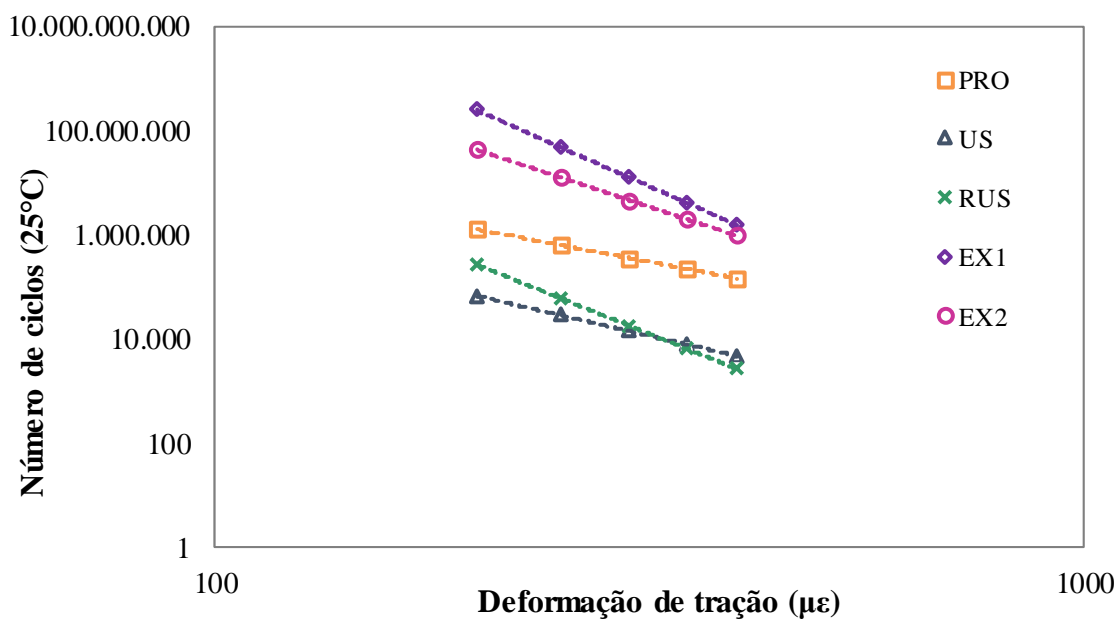


Figura 113 – Curvas de fadiga para temperatura de 30°C considerando o critério de ruptura do G^R .

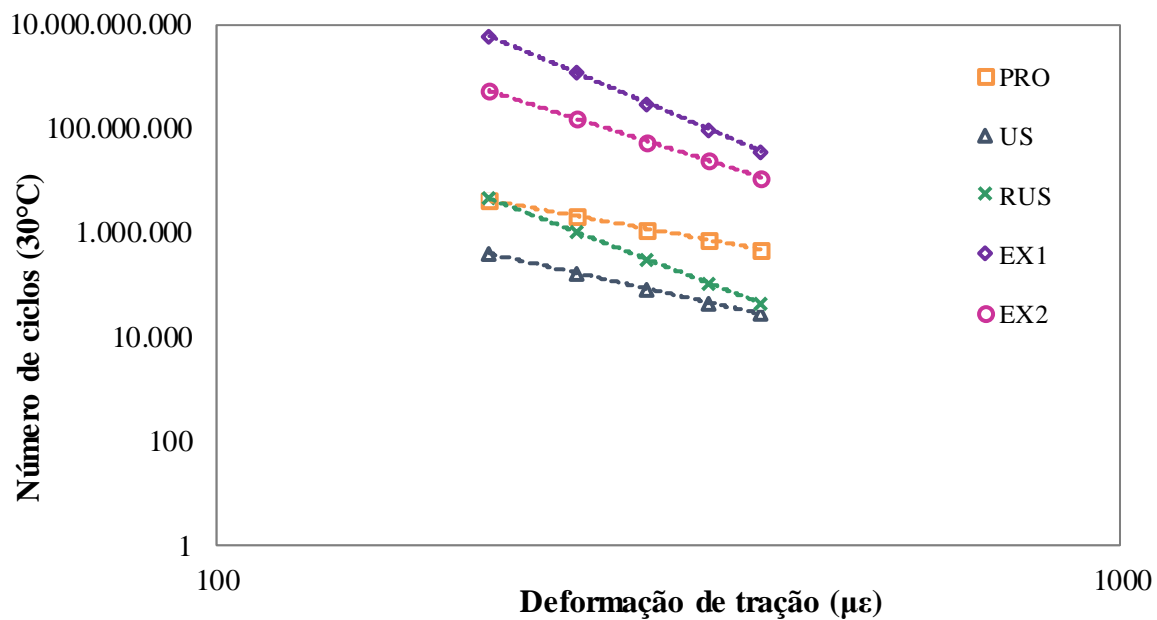


Figura 114 – Curvas de fadiga para temperatura de 7°C considerando o critério de ruptura do D^R .

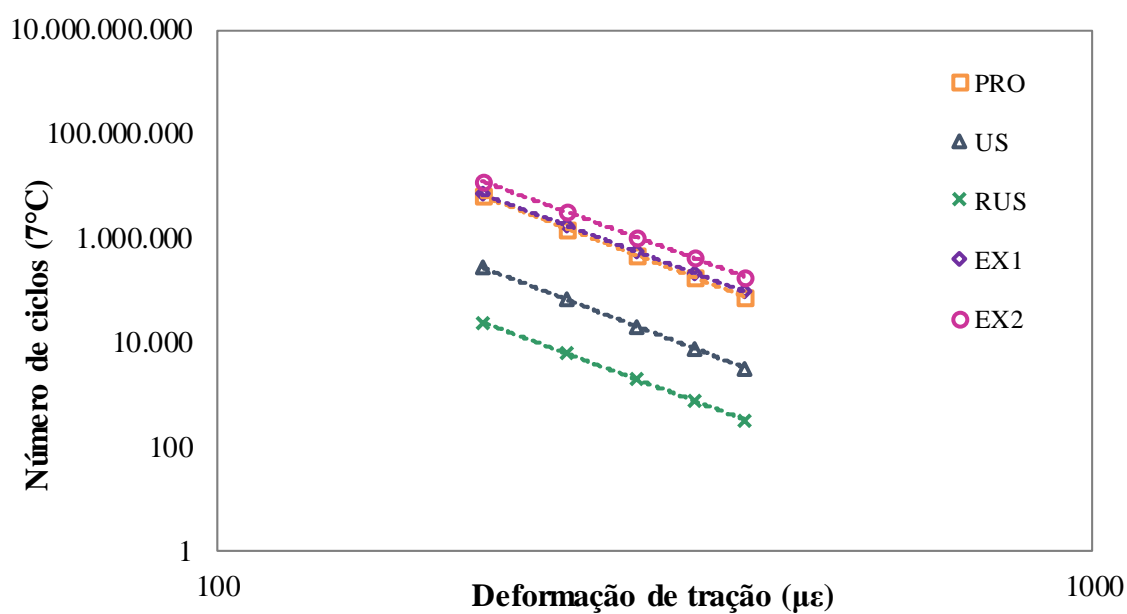


Figura 115 – Curvas de fadiga para temperatura de 10°C considerando o critério de ruptura do D^R .

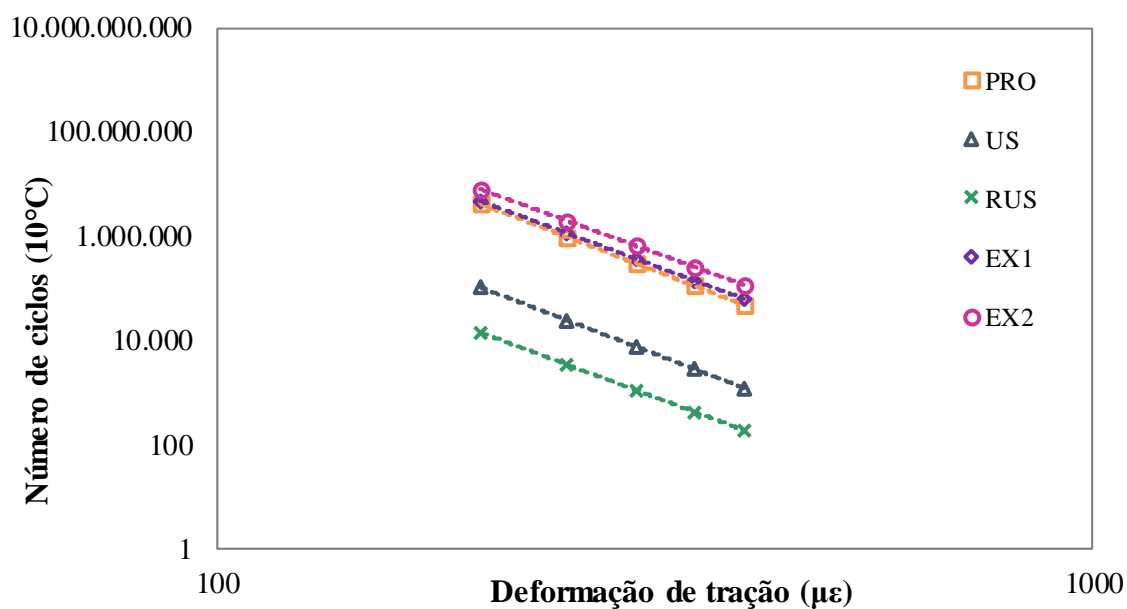


Figura 116 – Curvas de fadiga para temperatura de 15°C considerando o critério de ruptura do D^R .

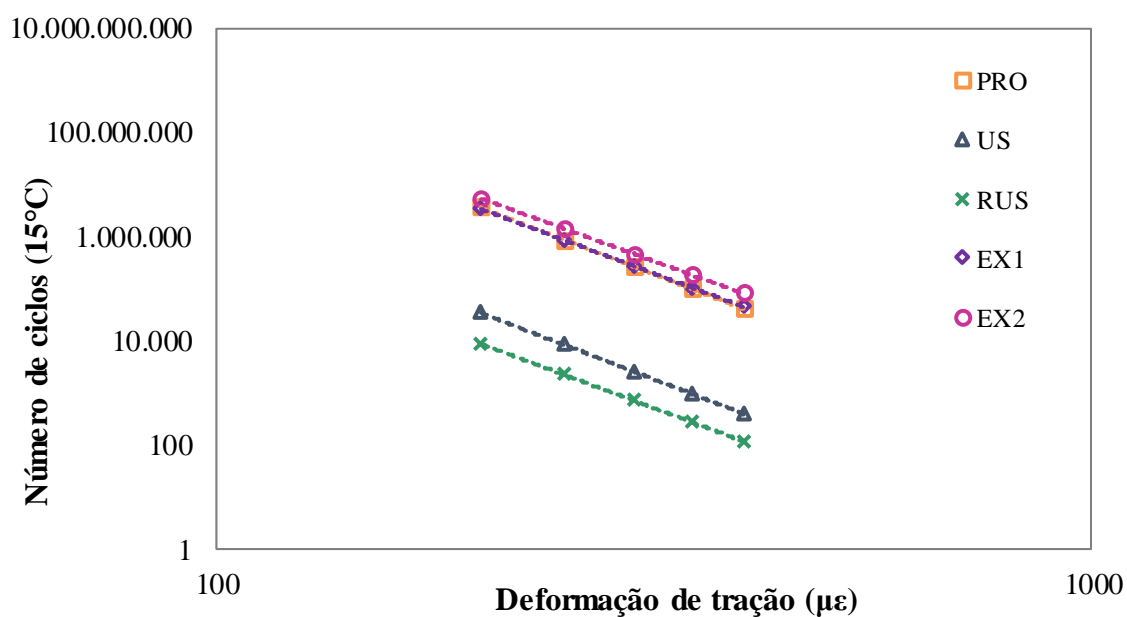


Figura 117 – Curvas de fadiga para temperatura de 20°C considerando o critério de ruptura do D^R .

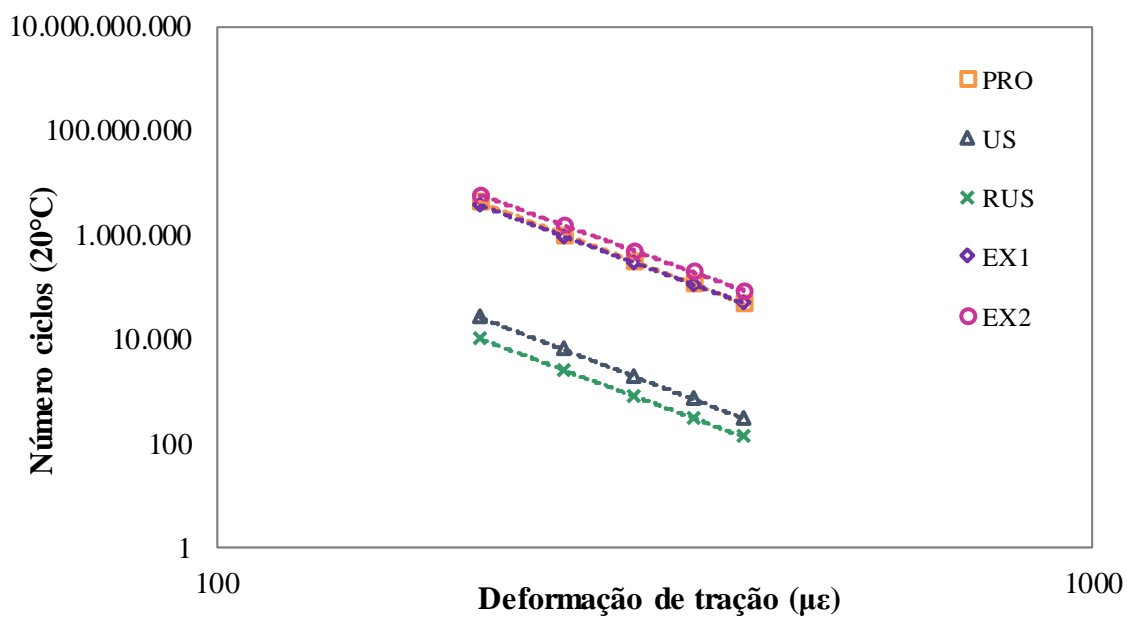


Figura 118 – Curvas de fadiga para temperatura de 25°C considerando o critério de ruptura do D^R .

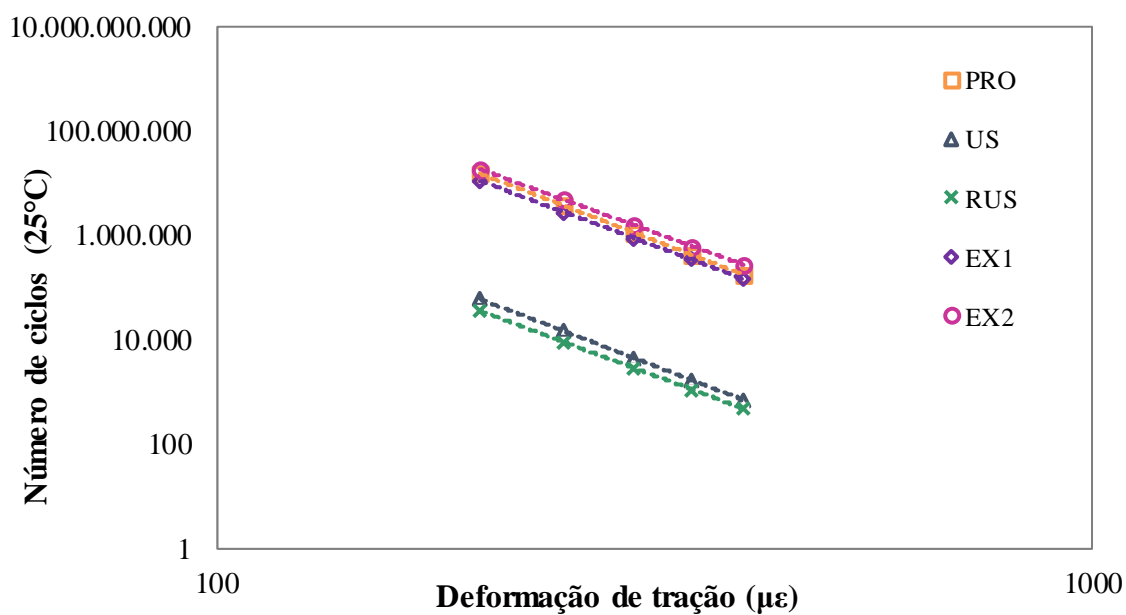
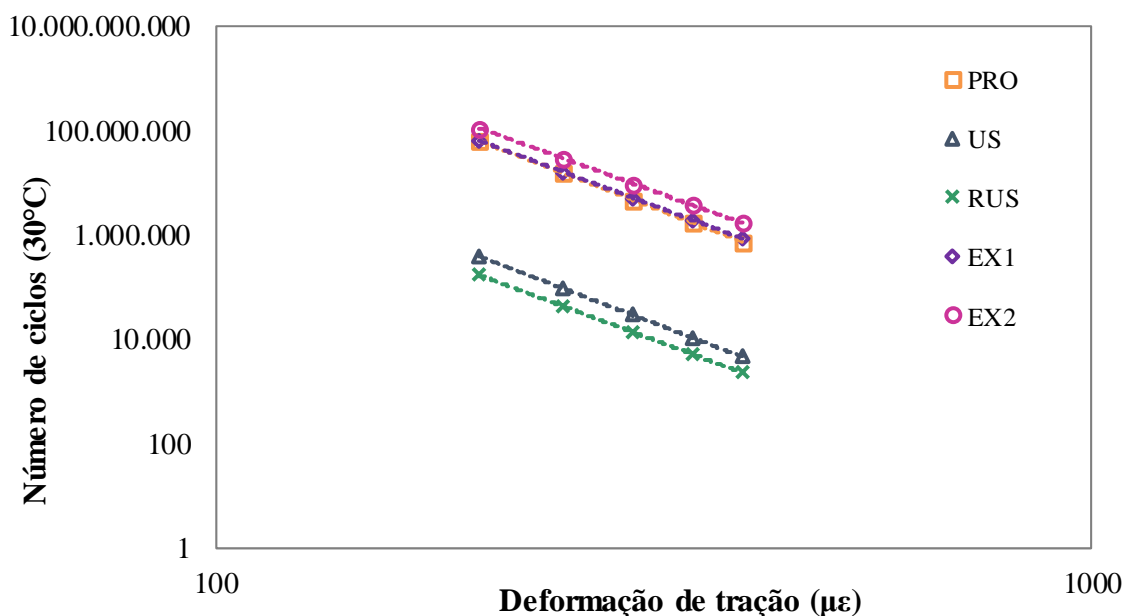


Figura 119 – Curvas de fadiga para temperatura de 30°C considerando o critério de ruptura do D^R .



Para o critério de ruptura do G^R , pode-se observar que o comportamento à fadiga das misturas asfálticas pode variar dependendo da temperatura que se está analisando. As misturas extraídas

(EX1 e EX2) apresentaram melhor comportamento à fadiga para todas as temperaturas analisadas, seguida da mistura projetada (PRO), usinada (US) e reprodução usina (RUS). Observa-se que as misturas com menor teor de ligante, usinada e reprodução usina, foram mais suscetíveis às mudanças de temperatura e níveis de deformação. A partir da temperatura de 20°C, a mistura US se aproxima da mistura RUS, nos baixos níveis de deformação, chegando a apresentar maiores valores de N_f quando analisada para a temperatura de 25°C, e se aproximando da mistura projetada na temperatura de 30°C.

As diferentes inclinações das curvas de Wöhler pelo critério G^R também chamam a atenção, mostrando as diferentes susceptibilidades às variações nos níveis de deformação. Por exemplo, para 25°C, a mistura RUS apresenta maior vida de fadiga que a mistura US para deformações menores que 250 $\mu\epsilon$ e menor vida de fadiga para deformações maiores que 250 $\mu\epsilon$.

Para as curvas de Wöhler geradas com o critério do D^R , as misturas PRO, EX1 e EX2 apresentaram comportamento bastante semelhante, para todas as temperaturas avaliadas. Já as misturas US e RUS apresentaram comportamento inferior e tendem a se aproximar em temperaturas mais altas. Observa-se, também, que para este critério, a classificação das misturas não alterna com a variação de temperatura, e também com a variação do nível de deformação, isto é, as inclinações das retas são bastante semelhantes. Neste momento vale lembrar que, para o critério do D^R , existe uma maior dispersão entre os dados experimentais e os dados previstos pelo modelo.

Essa variação do comportamento com a temperatura evidencia a importância de se fazer as simulações com situações reais de clima, como as realizadas no FlexPAVE™. Ensaios convencionais de laboratório geralmente avaliam o comportamento à fadiga para apenas uma temperatura, ou para uma série limitada de temperaturas, e essa variação, que é muito importante no contexto de um pavimento, é simplificada.

6 SIMULAÇÃO DO DANO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DO TRECHO DA BR-116 USANDO O FLEXPAVE™

O desempenho das misturas estudadas foi avaliado por meio de simulações computacionais utilizando o programa FlexPAVE™, inicialmente denominado de *Layered ViscoElastic Analysis for Critical Distresses* – LVECD, desenvolvido pela NCSU e o FHWA (*Federal Highway Administration*) e utilizado no projeto de especificações de desempenho de misturas asfálticas chamado de *Performance-Related Specifications for Hot-Mix Asphalt* (HMA-PRS) (NASCIMENTO, 2015).

O objetivo da utilização deste programa no presente trabalho foi poder classificar as misturas quanto ao desempenho à fadiga levando em consideração a estrutura, o clima e o tráfego do local onde a mistura foi aplicada, verificando a influência que as diferentes características de produção dessas misturas causam no desempenho em campo em relação à evolução do dano.

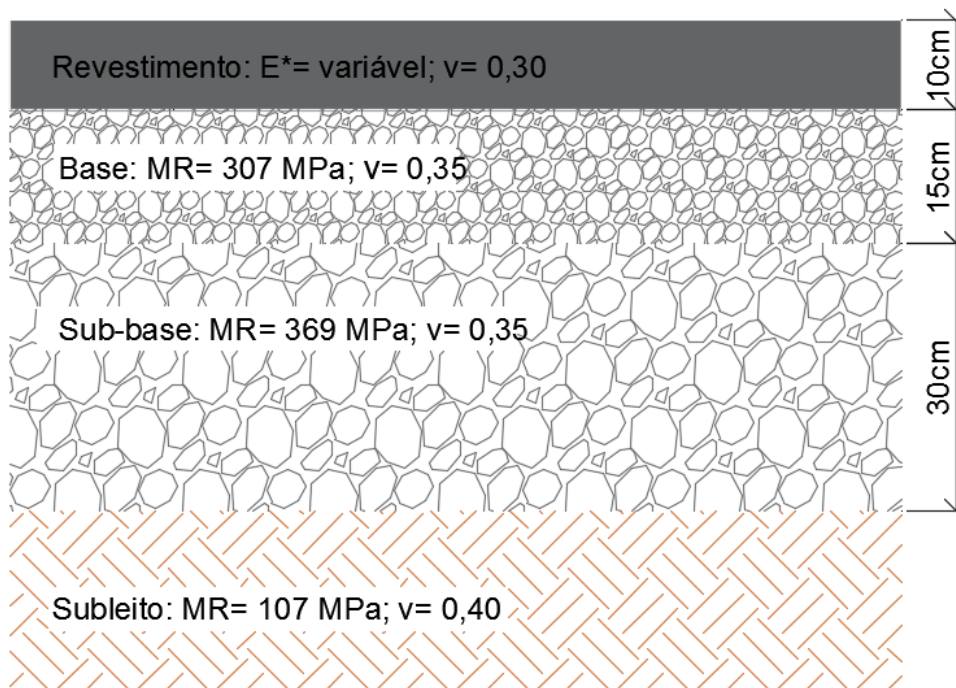
Este programa é baseado em análises viscoelásticas lineares juntamente com o dano, utilizando os dados obtidos do modelo S-VECD, para simular a resposta do pavimento quando submetido a ações climáticas e das cargas dinâmicas impostas pelo tráfego. Maiores informações sobre o funcionamento do FlexPAVE™ podem ser encontradas no trabalho de Eslaminia *et al.* (2012).

O FlexPAVE™ vem ganhando destaque nos últimos anos, sendo utilizado em diversas pesquisas (KIM e WANG, 2017; MOCELIN, 2018; WANG, 2019), apresentando boa capacidade de previsão do desempenho em campo (PARK, 2013; WANG, 2019). Nascimento (2015) fez uso deste programa para calibrar a função de transferência entre o dano simulado e a porcentagem de área trincada em campo, utilizando misturas asfálticas típicas brasileiras.

Para avaliar o dano, foi utilizado nesta pesquisa na parametrização do programa a estrutura do pavimento do trecho instrumentado da rodovia BR-116, com camada de revestimento de 10 cm de concreto asfáltico, base de brita graduada simples com 15 cm, sub-base de macadame seco com 20 cm e subleito, conforme mostra a Figura 120. Foi considerado esta estrutura única para todas as análises, variando apenas as características das misturas asfálticas, buscando verificar a diferença entre elas. As simulações foram realizadas levando em consideração que a estrutura do pavimento se encontrava nova e o período de projeto avaliado foi de 15 anos. As análises

foram feitas em relação ao dano gerado pelo trincamento por fadiga, não sendo analisados outros defeitos como, por exemplo, a deformação permanente ao longo do tempo.

Figura 120 – Estrutura do pavimento utilizada no FlexPAVE™ na presente pesquisa.



Os dados das misturas asfálticas utilizados pelo programa para as análises de trincamento por fadiga são: a caracterização linear viscoelástica com os termos da série de *Prony* ajustada e os dados de dano da mistura obtidos nos ensaios de fadiga por tração direta, com os parâmetros C_{11} e C_{12} de ajuste das curvas $C \times S$ por uma função potência (equação (39)). O programa permite que estes dados sejam exportados diretamente da planilha de análise das curvas características de dano. Os critérios de ruptura adotados nas simulações foram o do D^R e G^R . Na Figura 121 consta a tela do FlexPAVE™ com os dados da estrutura do pavimento e características da mistura.

Figura 121 – Tela do FlexPAVE™ com dados da estrutura do pavimento e características da mistura asfáltica.

The screenshot displays the FlexPAVE software interface with the following sections:

- General Information:** Structure Name: Flexible 3-Layer Pavement; Pavement/Lane Width (m): 3.65. Buttons: Add Layer, Remove Layer, Move Layer.
- Layer Properties:** Layer: AC; Thickness (cm): 10; Material Type: Asphalt Concrete; Specific Gravity (optional): 2.5; Expansion Co. (1/C): 0.00005. Radio buttons for GR Based Criterion (selected) and DR Based Criterion.
- Strength/Modulus:**

Poisson's Ratio	0.3000	Fatigue	
Einf (KPa)	86.7000	Alpha	3.2300
Ref. Temp. (C)	20	C11	0.0106
Shift Factor a1	9.2040e-04	C12	0.3480
Shift Factor a2	-0.1686	Initial C	0.8000
Shift Factor a3	3.0050	Gamma	3.8200e+09
		Delta	-1.7560

	Ti (sec)	Ei (KPa)	
1	200000000	1680	+
2	20000000	1500	
3	2000000	3830	-
4	200000	8370	
5	20000	19400	
6	2000	48100	
7	200	134000	
8	20	430000	∇
- Structure Diagram:** Visual representation of the pavement layers: AC, Base, Subgrade, and Subleito.
- Notes:** A yellow note states: "Please note that FlexPAVE 1.1 uses the power function with the C11 and C12 coefficients to define damage characteristic curve instead of an exponential function."

Em relação às cargas do tráfego, foi considerado o espectro de cargas conforme o estudo de RDT (Recurso de Desenvolvimento Tecnológico) realizado por Brito *et al.* (2019), no qual constam diferentes cenários considerando o aumento da tolerância nas cargas máximas legais (CML) por eixo. O estudo de RDT foi realizado para a ANTT, com base em um extenso banco de dados de pesagem rodoviária para avaliação do impacto da Lei do caminhoneiro nos custos de manutenção dos pavimentos rodoviários.

As simulações no FlexPAVE™ foram realizadas para seis cenários observando as condições de tolerância com base no estudo para a ANTT acima descrito: eixos limitados na CML (CML+0%); eixos limitados na CML + 5% (CML+5%); eixos limitados na CML + 7,5% e PBT + 5% (CML+7,5%); eixos limitados na CML + 10% e PBT + 5% (CML+10%); eixos limitados na CML + 12,5% e PBT + 5% (CML+12%); e espectro de cargas com base na carga real provenientes das pesagens realizadas pela Concessionária Ecosul no trecho da BR-116/RS, km 509 – posto de pesagem Retiro.

Os dados de tráfego considerados para a determinação do volume diário médio comercial (VDMC), foram coletados na praça de pedágio (P3) localizada no município de Eldorado do Sul/RS, próximo ao trecho onde foi realizada a instrumentação no pavimento e equacionado para o km 298 com base no estudo da empresa Engimind para a licitação da RIS – Rodovias Integradoras do Sul. O VDMC do local foi de 2237 veículos no ano de 2017, apresentando uma taxa de crescimento anual de 2,8%, resultando, ao final de 15 anos, nos números N apresentados

na Tabela 32. No FlexPAVE™ utilizou-se as passagens diárias do eixo-padrão calculadas seguindo os critérios do USACE (Figura 122). Nas simulações o tráfego foi considerado igualmente distribuído ao longo das horas do dia e ao longo dos meses do ano. Como o programa considera carregamentos dinâmicos, a velocidade utilizada foi de 80 km/h, com pressão de inflação dos pneus de 800 kPa, área de contato entre pneu-pavimento retangular, relação comprimento/largura de 1,57 e espaçamento entre os centros dos dois pneus do rodado de 32,4 cm (Figura 123).

Tabela 32 – Condições de tráfego analisadas nas simulações no FlexPAVE™.

Cenários	VDMC	Passagens diárias	N ano (USACE)	N 15 anos (USACE)	N 15 anos (AASHTO)	
CML + 0%	PBT Limitado em CML+5%	2237	9410	3,43E+06	6,29E+07	2,03E+07
CML + 5%			10324	3,77E+06	6,91E+07	2,16E+07
CML + 7,5%			10550	3,85E+06	7,06E+07	2,19E+07
CML + 10%			10683	3,90E+06	7,15E+07	2,21E+07
CML + 12,5%			10767	3,93E+06	7,20E+07	2,22E+07
Carga Real			11650	4,25E+06	7,79E+07	2,31E+07

CML - Carga máxima legal; PBT - Peso Bruto Total; VDMC: Volume diário médio comercial

Figura 122 – Tela do FlexPAVE™ com os dados de tráfego.

The screenshot displays the FlexPAVE software interface with the following data and settings:

- Design Vehicle Information:**
 - Diagram showing a truck with Single axle, Tandem axle, and Tridem axle. Distances D_2 and D_3 are indicated. Note: D_1 is always zero.
 - Choose a Vehicle: New Vehicle (dropdown), Special Truck (button).
 - Table:

	Axle Type	Wheel Type	Distance (m)	Axle Load (KN)
1	<input type="checkbox"/> Single Wheel	Dual Tires	0	40
 - Design Velocity (m/s): 22.222
 - Buttons: More, Advanced.
- Traffic Information:**
 - Daily ESAL: 9410
 - Growth Type: Linear (dropdown)
 - Growth Rate (%): 2.8
 - Lane Distribution Factor: 1
 - Monthly Adjustment Factor (MAF) table:

Month	MAF
January	1
February	1
March	1
April	1
May	1
June	1
July	1
August	1
September	1
October	1
November	1
December	1
 - Hourly Truck Distribution (HTD) table:

Time	HTD (%)
Midnight	4.1667
1:00 AM	4.1667
2:00 AM	4.1667
3:00 AM	4.1667
4:00 AM	4.1667
5:00 AM	4.1667
6:00 AM	4.1667
7:00 AM	4.1667
8:00 AM	4.1667
9:00 AM	4.1667
10:00 AM	4.1667
11:00 AM	4.1667
Noon	4.1667
1:00 PM	4.1667
2:00 PM	4.1667
3:00 PM	4.1667
4:00 PM	4.1667
5:00 PM	4.1667
6:00 PM	4.1667
7:00 PM	4.1667

Figura 123 – Tela do FlexPAVE™ com as configurações do eixo-padrão

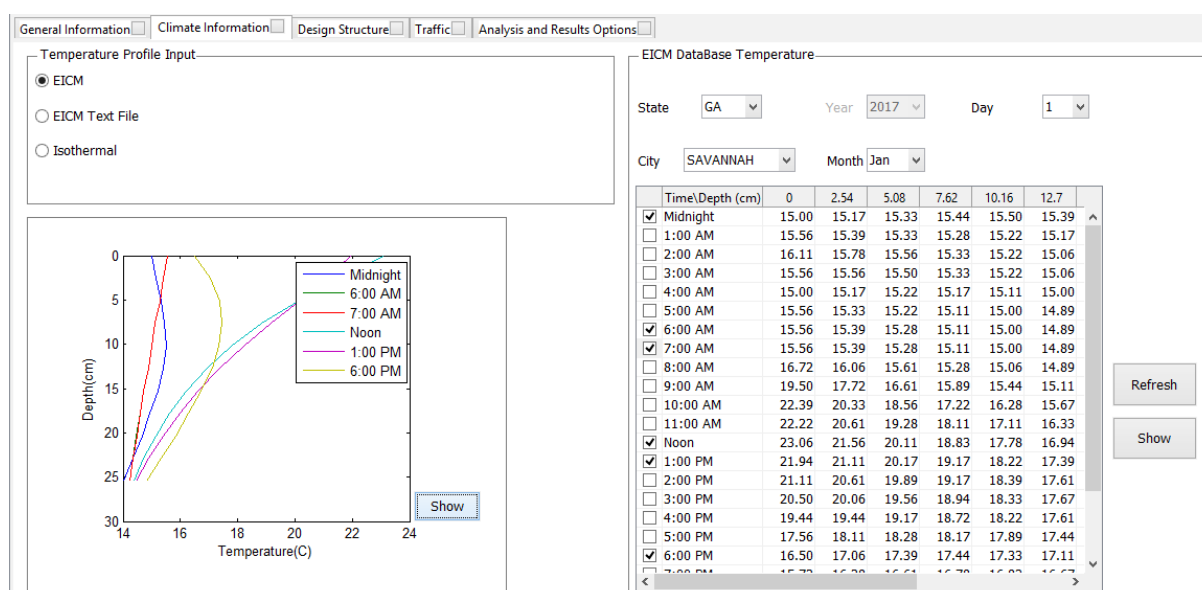
Axle	Type	Wheel Type	Width (m)	Axle Spacing (m)	Dual Tires Spacing (cm)
Axle 1	Single Wh...	Dual Tires	0	0	32.4000

Tire Pressure (KPa)

Contact Area Shape Aspect Ratio (length/width)

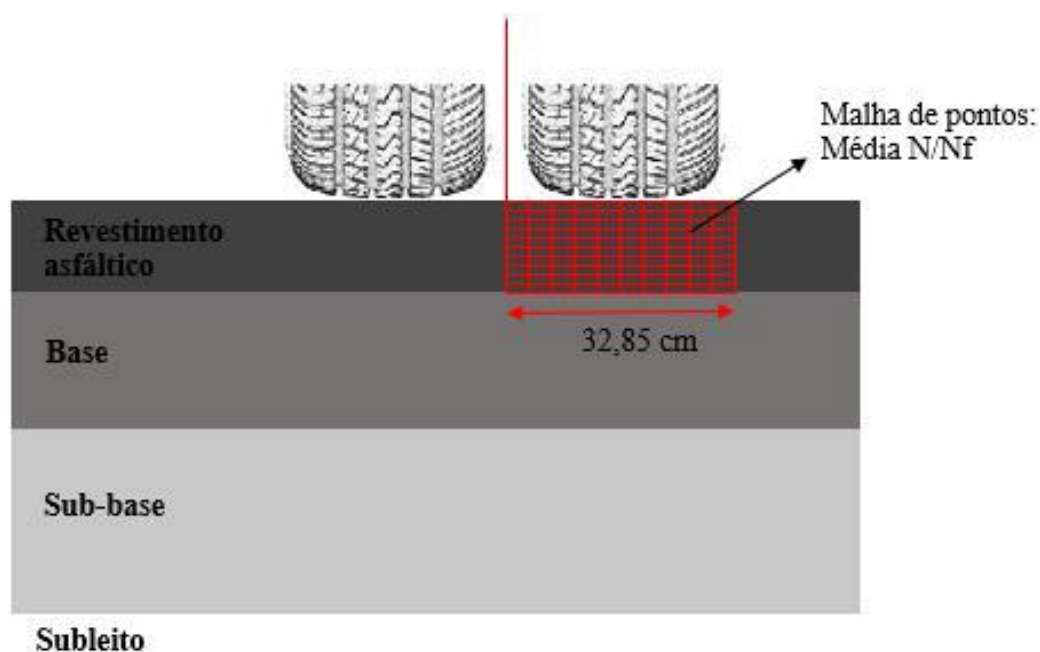
O FlexPAVE™ possui um banco de dados de temperatura, ao longo da profundidade e para todos os dias de um ano, separados de hora em hora, para diferentes cidades norte americanas, conforme apresentado na Figura 124. Foram selecionados os dados climáticos da cidade de Savannah, no estado da Geórgia nos Estados Unidos, pois de acordo com o estudo realizado por Brito e Heller (2017) esta cidade representa os dados de clima de forma semelhante à região de Porto Alegre/RS.

Figura 124 – Tela do FlexPAVE™ com os dados climáticos.



O dano médio acumulado (N/N_f) foi analisado em toda a espessura da camada asfáltica, na região abaixo de uma das rodas. Posteriormente, calculou-se o dano médio acumulado (N/N_f) para uma malha com 110 pontos (Figura 125), contendo 10 pontos distribuídos por 32,85 cm na horizontal, a partir do centro entre as duas rodas, e 11 pontos na vertical, distribuídos igualmente ao longo da espessura da camada de concreto asfáltico. Esta mesma malha foi utilizada para o cálculo do dano médio acumulado nos trabalhos de Nascimento (2015), Fritzen (2016) e Mocelin (2018).

Figura 125 – Representação da malha de pontos utilizada para determinação do dano médio acumulado na camada do revestimento (MOCELIN, 2018).



A partir destas análises, avaliou-se a evolução dos danos médios acumulados (N/N_f) na malha de pontos, calculados pela Lei de Miner, para todas as misturas ao longo do horizonte de projeto, permitindo observar o comportamento das diferentes misturas quando inseridas na mesma estrutura e submetidas às mesmas condições climáticas e de tráfego. Na Figura 126 e Figura 127 são apresentados os resultados de danos médios acumulados (N/N_f), para todas as misturas e a condições de tráfego para CML+0%, considerando o critério de ruptura do G^R e do D^R , respectivamente.

Figura 126 – Dano médio acumulado ao longo do tempo considerando CML+0%, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do G^R .

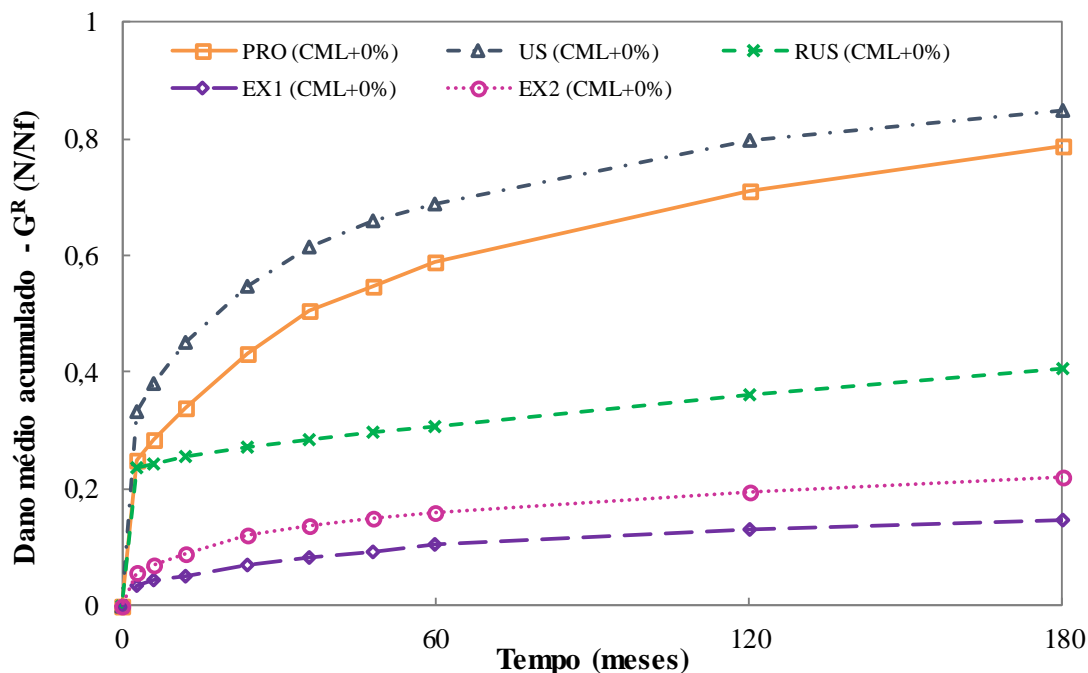
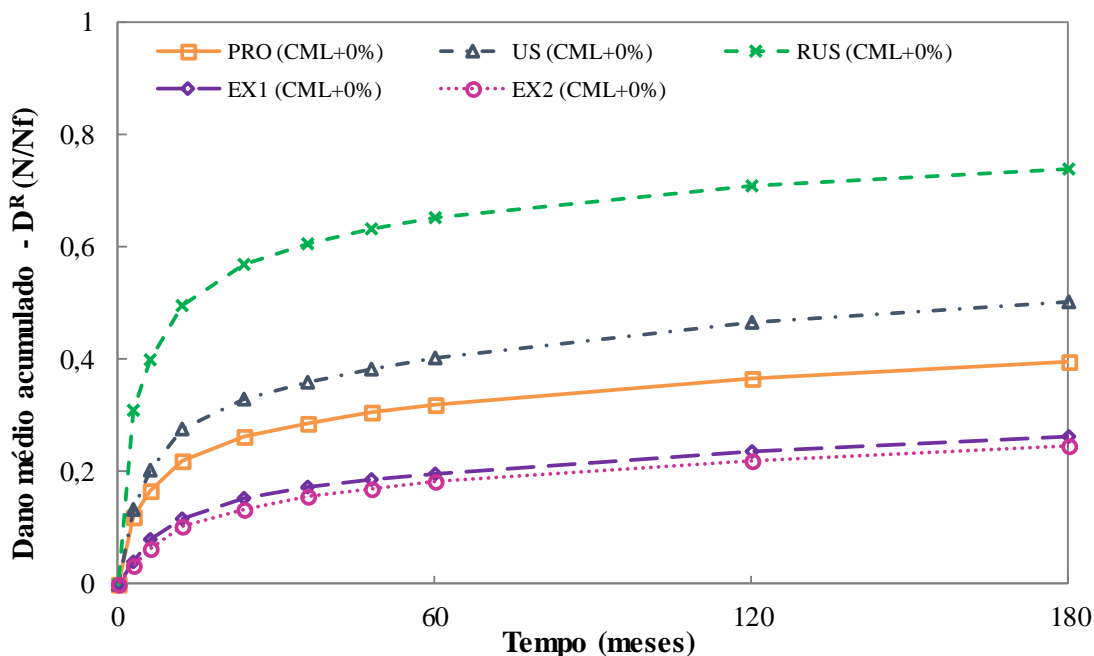


Figura 127 – Dano médio acumulado ao longo do tempo considerando CML+0%, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do D^R .



Nota-se que os dois critérios de ruptura adotados levam a resultados significativamente diferentes, principalmente no que tange às misturas usinada, reprodução usina e laboratório. Nos resultados de dano acumulado ao longo do tempo, utilizando o critério de ruptura do G^R ,

os comportamentos das misturas usinada e projetada são mais aproximados, com elevado valor de dano, enquanto nos resultados utilizando o D^R os valores de dano reduzem com exceção da mistura reprodução usina, a qual acumula mais dano ao longo do tempo.

Esta diferença entre os critérios de ruptura no dano previsto, é atribuída ao fato de que o critério de ruptura do G^R é definido em escala logarítmica, e para as simulações o N_f precisa ser extrapolado em relação ao resultado de laboratório, fazendo com que este critério seja muito sensível à variação experimental. Desta forma, o critério D^R é mais confiável para simulações de longo prazo (WANG e KIM, 2017).

Na Figura 128 e Figura 129 são apresentados os resultados de danos médios acumulados (N/N_f), para todas as misturas e condições de tráfego avaliadas, considerando o critério de ruptura do G^R e do D^R , respectivamente.

Figura 128 – Dano médio acumulado ao longo do tempo, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do G^R .

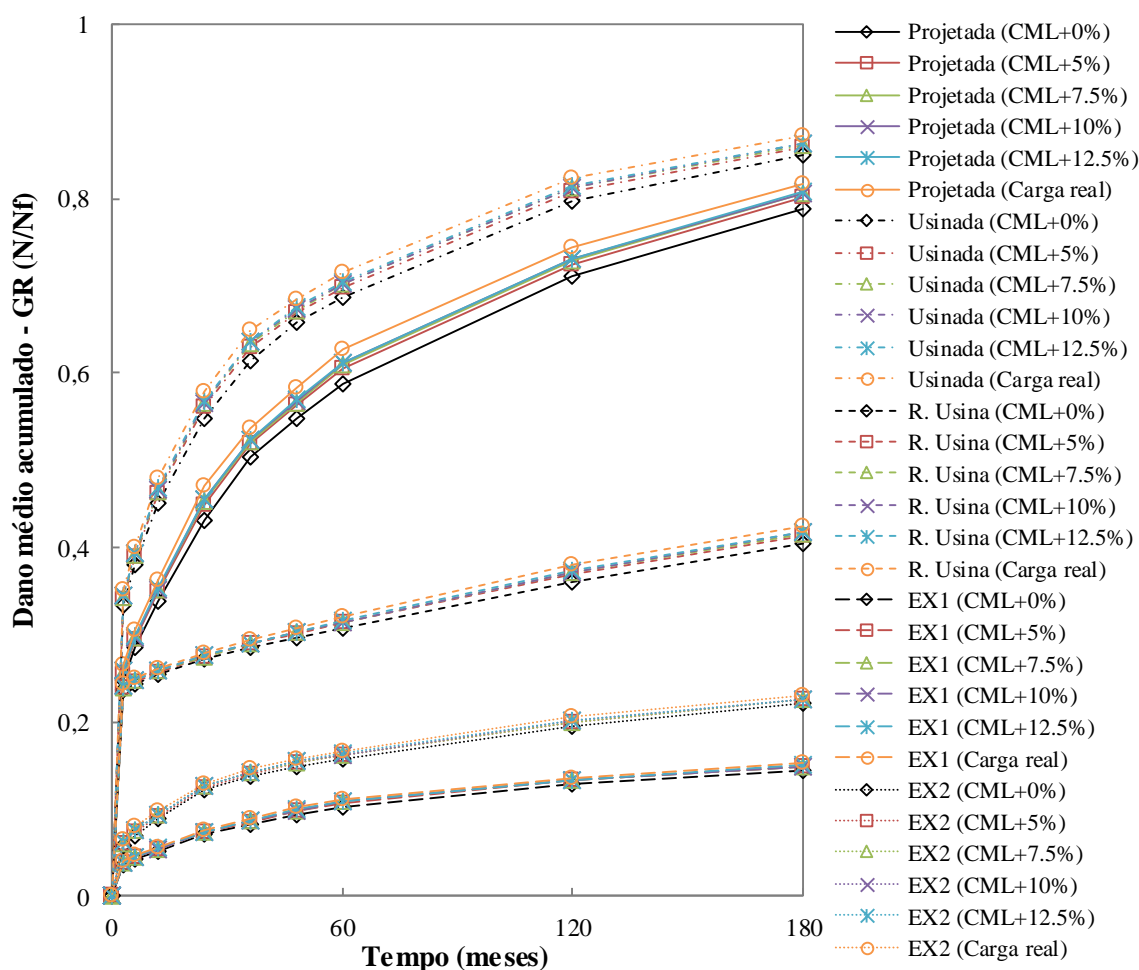
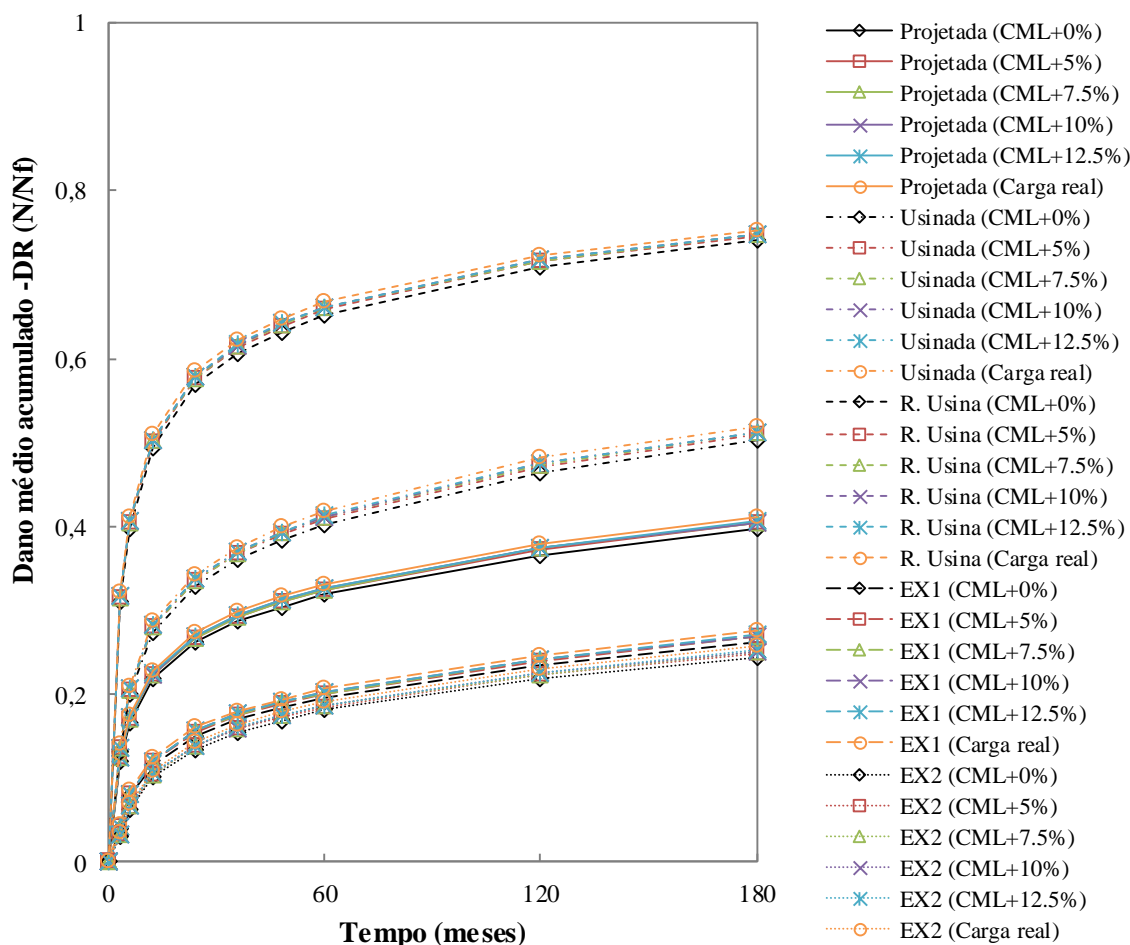


Figura 129 – Dano médio acumulado ao longo do tempo, para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do D^R .



Os resultados indicam que a variação da carga não altera significativamente o dano médio acumulado para o horizonte de projeto de 15 anos. A máxima diferença se dá, para todas as misturas e ambos os critérios, entre a carga real (maior dano) e os veículos até a carga máxima legal (menor dano).

Pelo critério do G^R , a classificação das misturas, da ordem de melhor desempenho para o pior, é EX1, EX2, RUS, PRO e US. Já para o critério do D^R , a classificação de desempenho é EX2, EX1, PRO, US e RUS. Como descrito anteriormente, as simulações no FlexPAVE™ com D^R são mais confiáveis, pelo fato de não necessitar de extrapolação em escala logarítmica. Na Tabela 33 é apresentando um resumo do ranqueamento das misturas estudadas considerado todos os ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa.

Tabela 33 – Ranqueamento quanto ao comportamento à fadiga das misturas asfálticas estudadas.

Mistura	TL (%)	RT 20°C (MPa)	MR 20°C (MPa)	MR/RT	MD 20°C (MPa)	FCD*		F4P*	FTD* (Curvas de Wöhler)				Dano FlexPAVE™	
						σ_t	ϵ_t	ϵ_t	FAF	S _{app}	G ^R	D ^R	G ^R	D ^R
PRO ■	5,2	1,67	6297	3778	9532	2	2	1	3	3	4	1	4	3
US ▲	4,7	2,10	11705	5565	12407	1	1	-	5	4	5	4	5	4
RUS ×	4,7	2,17	10463	4814	9710	-	-	2	4	5	3	5	3	5
EX1 ◆	5, 2	1,90	11280	5935	8907	4	4	4	1	2	1	3	1	2
EX2 ●	5,2	1,93	11459	5924	9447	3	3	3	2	1	2	2	2	1

* Foram consideradas as tensões (σ_t) e deformações (ϵ_t) de tração obtidas nas simulações realizadas no FlexPAVE™ mostradas na Tabela 22.

O FlexPAVE™ também apresenta gráficos do tipo *contour* para todos os meses ao longo do período de projeto. Neste tipo de gráfico, é possível observar a distribuição do dano ao longo da camada, onde as cores quentes (vermelho) representam áreas totalmente danificadas ($N/N_f = 1$) e as cores frias (azul) representam áreas sem dano ($N/N_f = 0$). Nas Figuras 130 a 139 são mostrados os gráficos obtidos para todas as misturas, com as condições de tráfego para CML+0% e carga real, considerando o critério de ruptura do G^R e nas Figuras 140 a 149 utilizando o critério de ruptura do D^R. Para as demais condições de tráfego os gráficos do tipo *contour* encontram-se no Apêndice D.

Figura 130 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R: (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

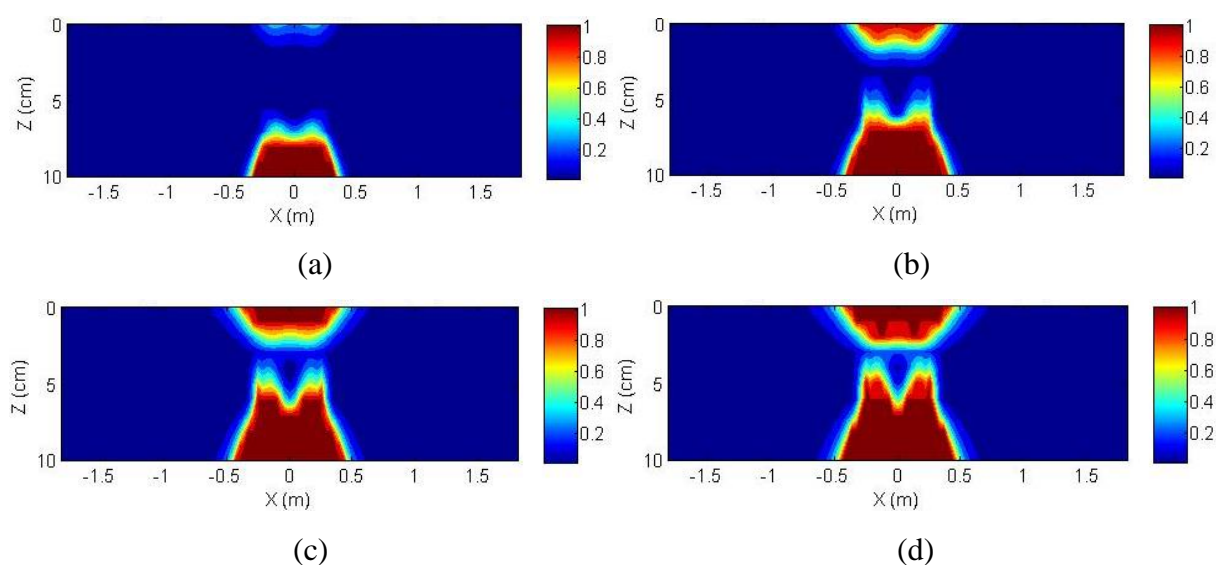


Figura 131 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

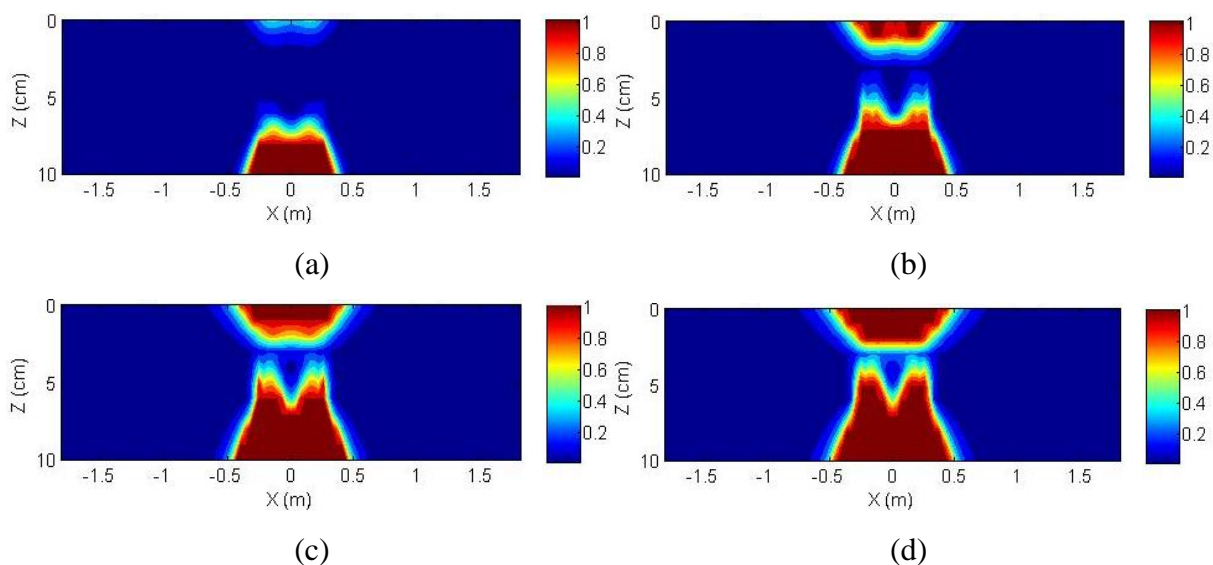


Figura 132 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

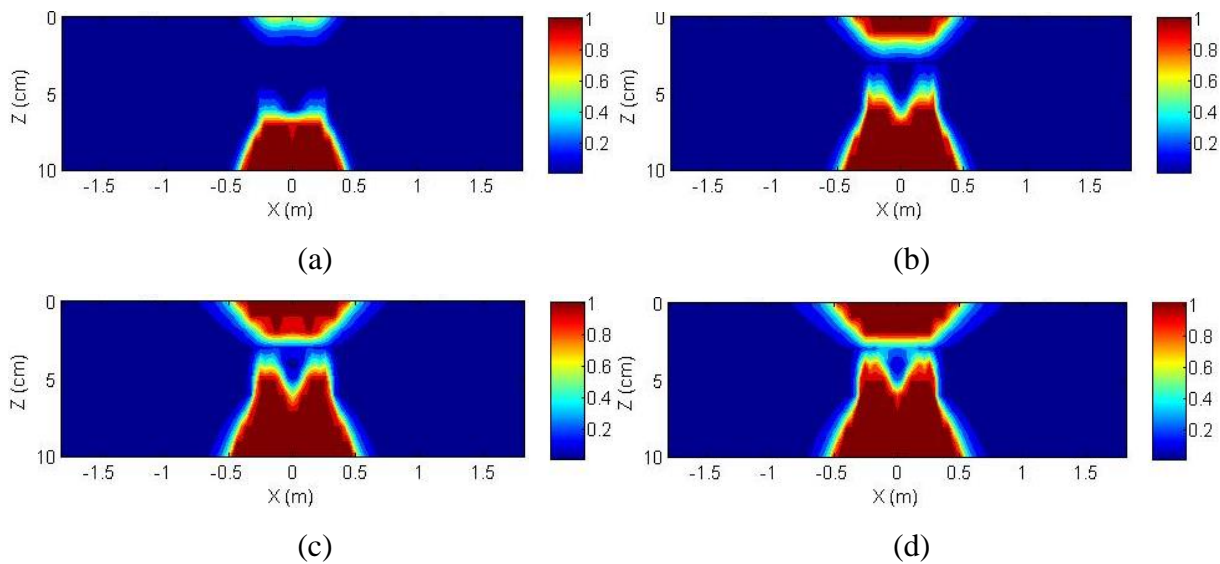


Figura 133 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

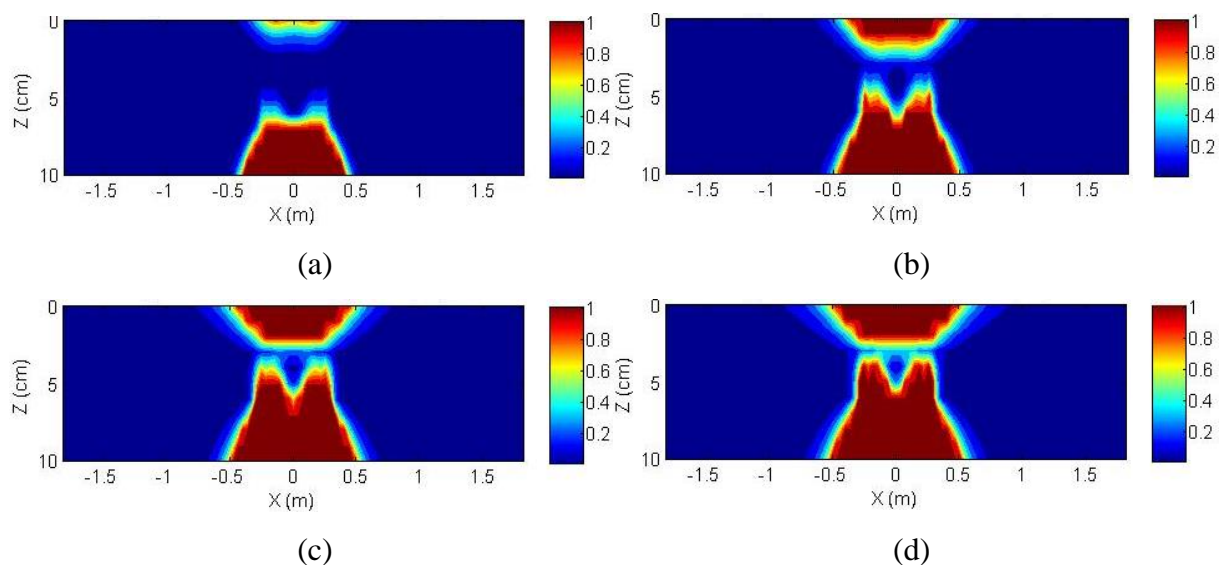


Figura 134 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

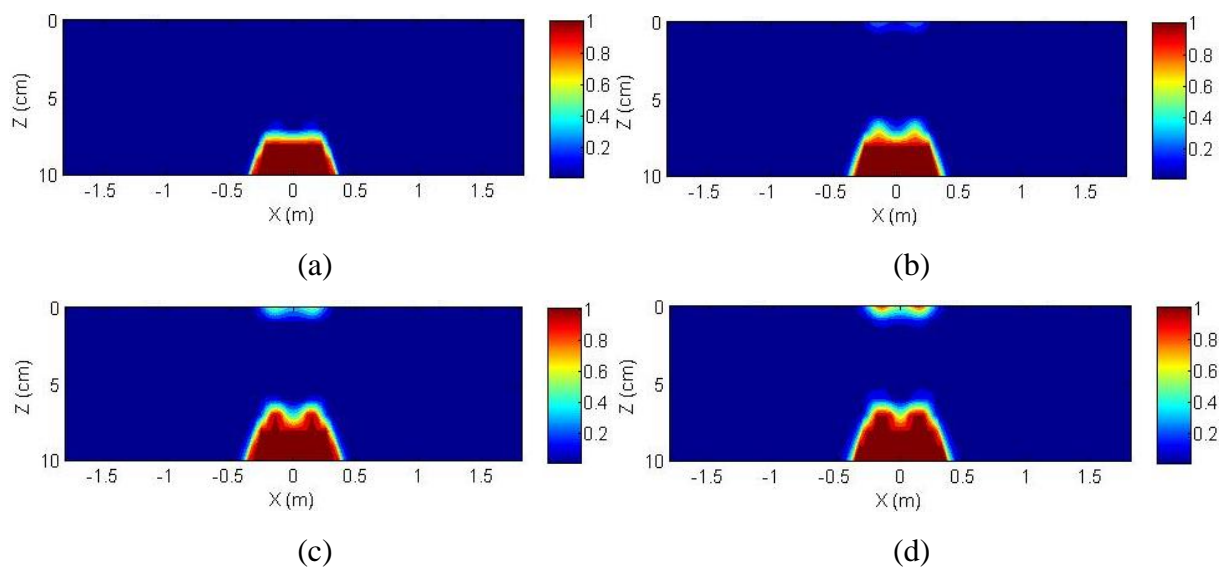


Figura 135 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

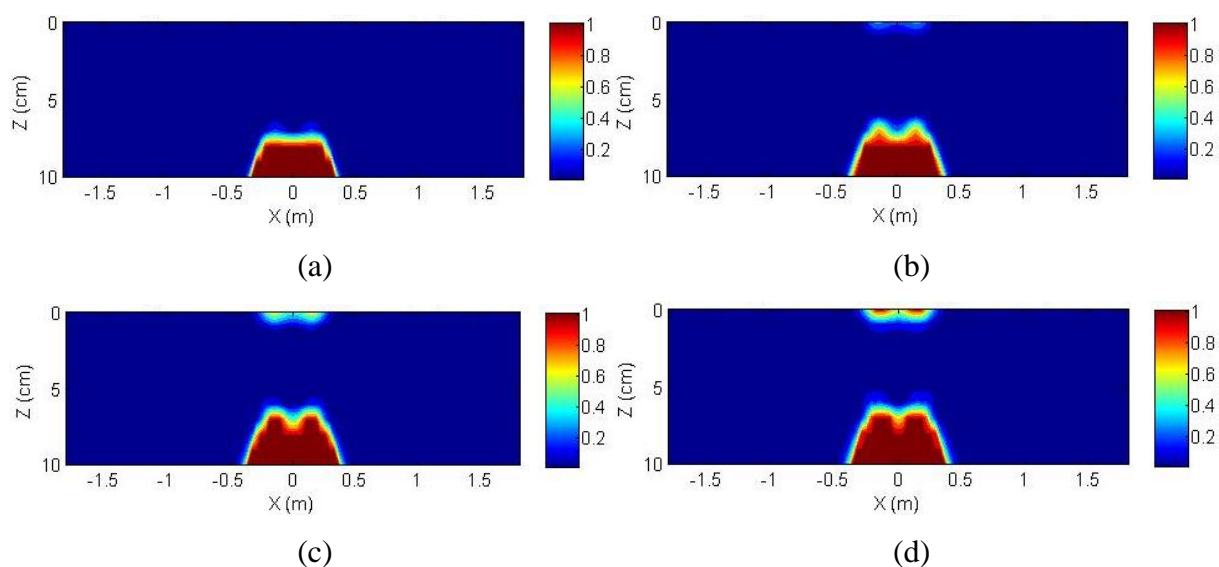


Figura 136 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

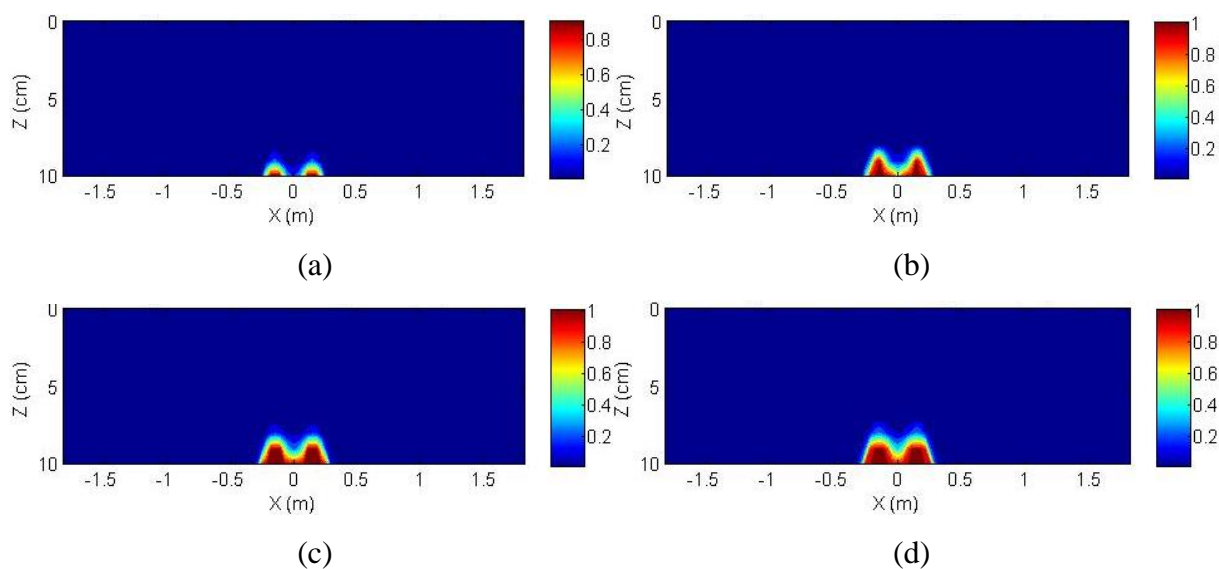


Figura 137 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

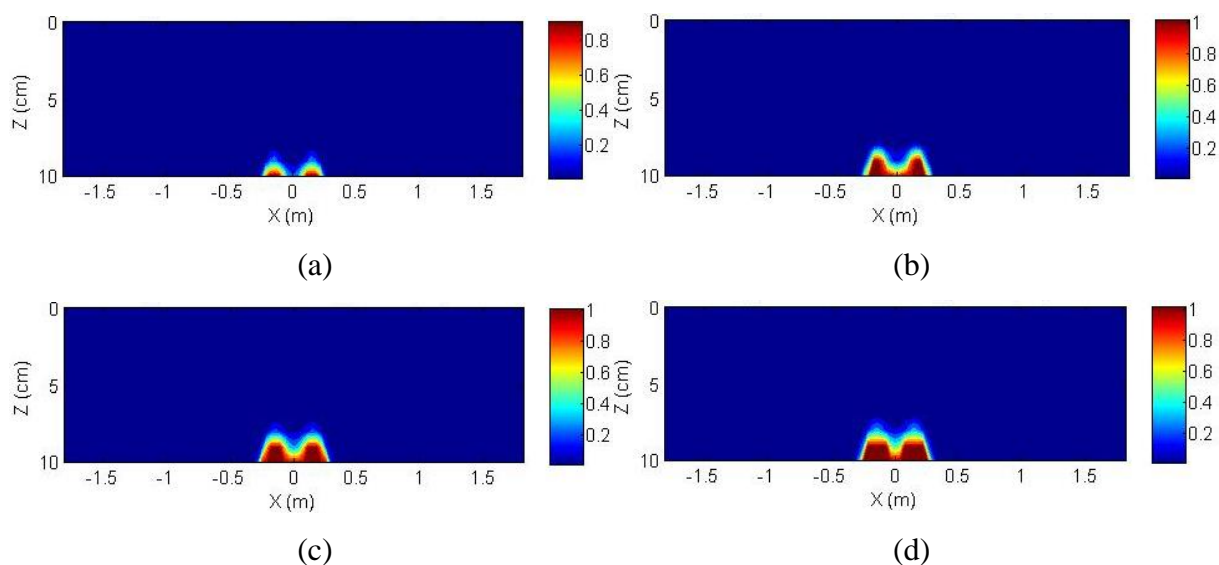


Figura 138 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

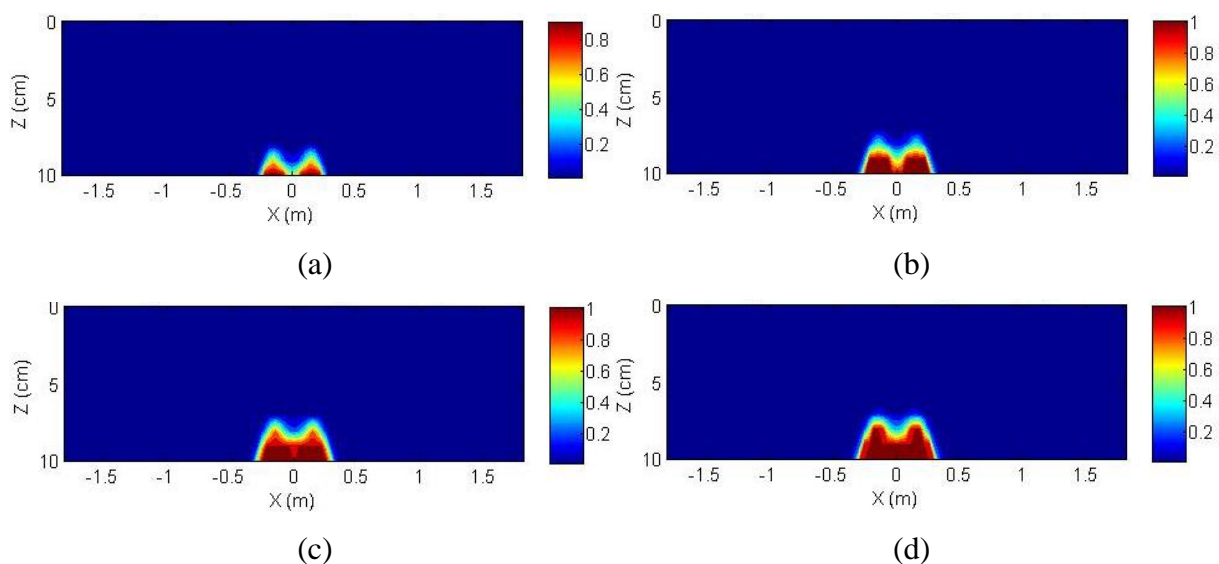


Figura 139 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), carga real, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

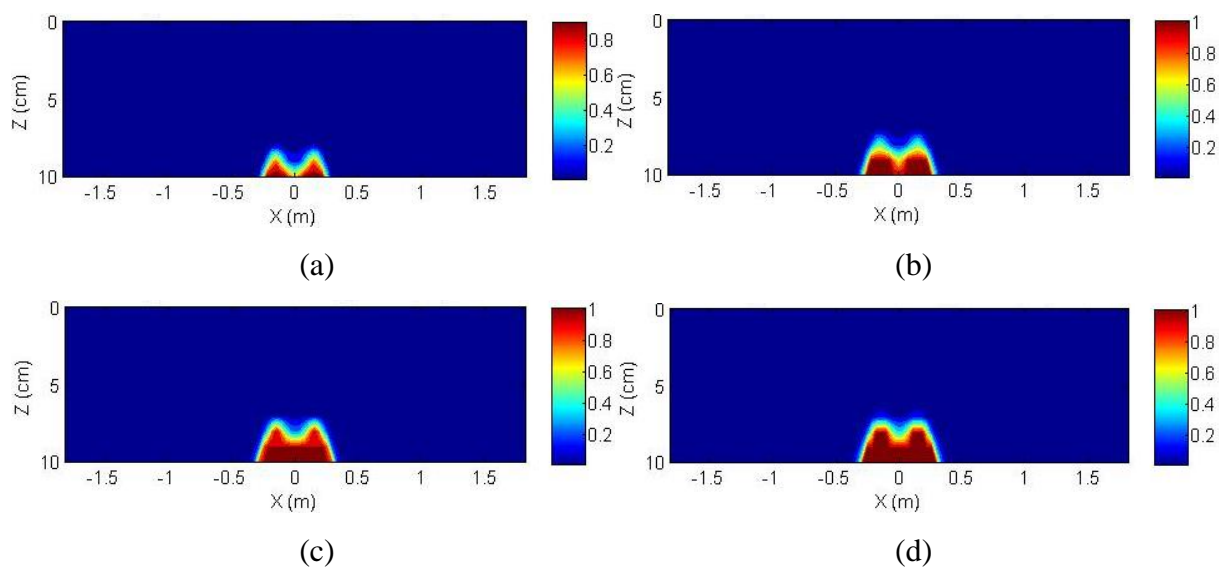


Figura 140 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

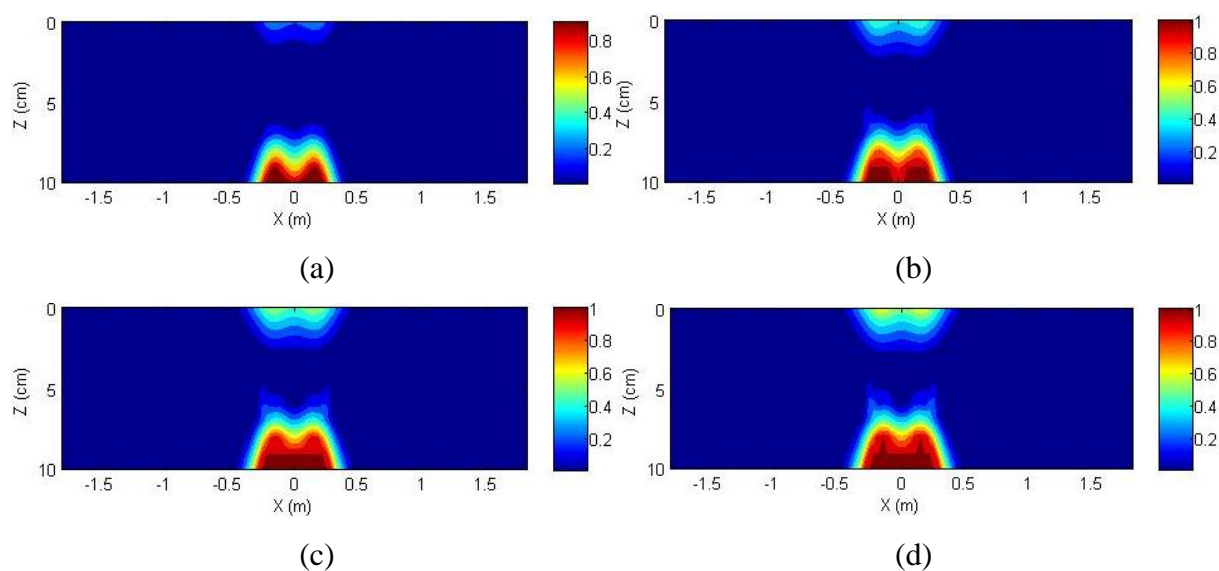


Figura 141 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

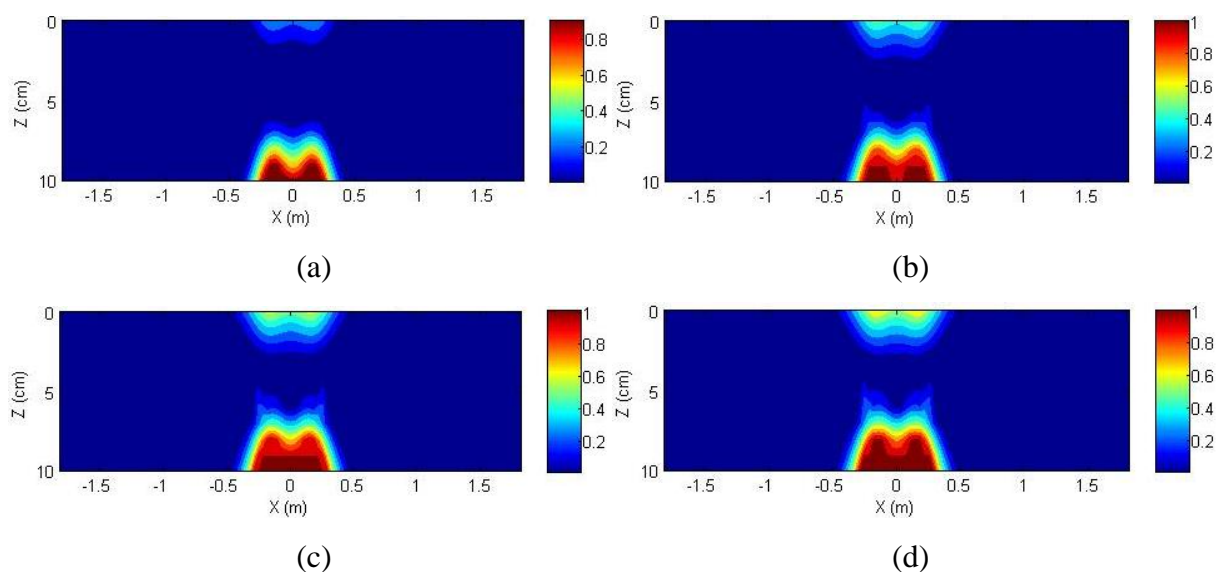


Figura 142 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

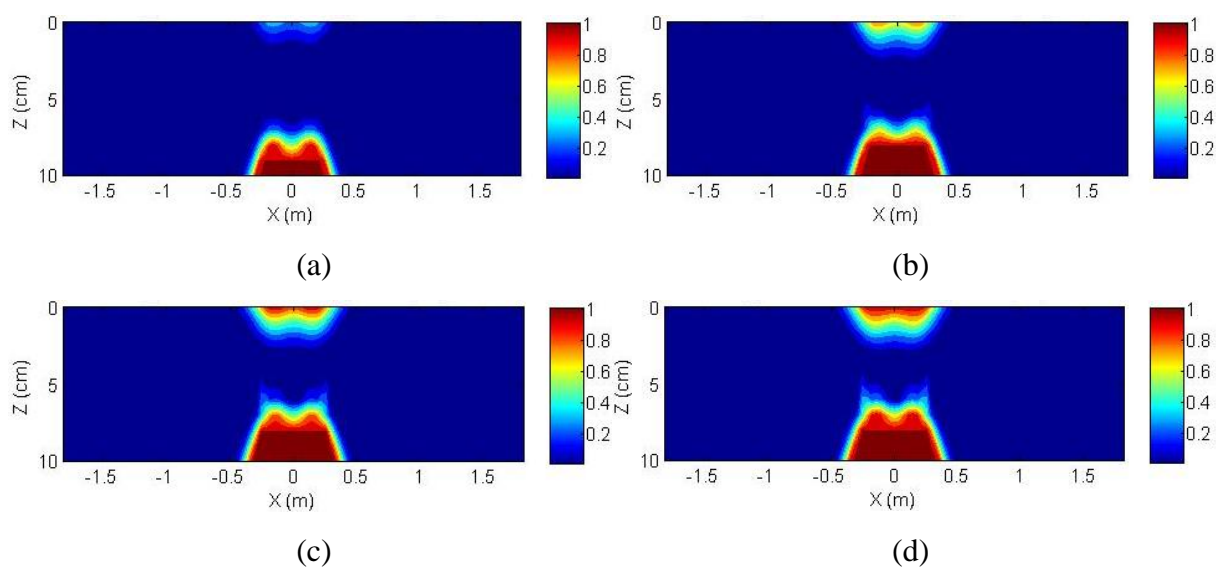


Figura 143 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

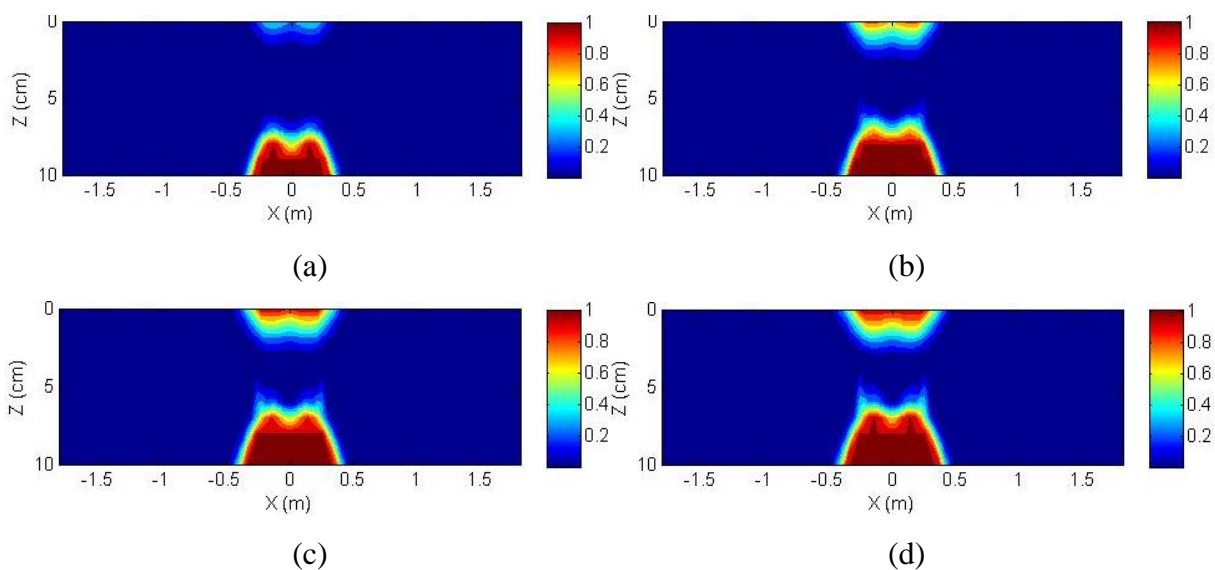


Figura 144 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

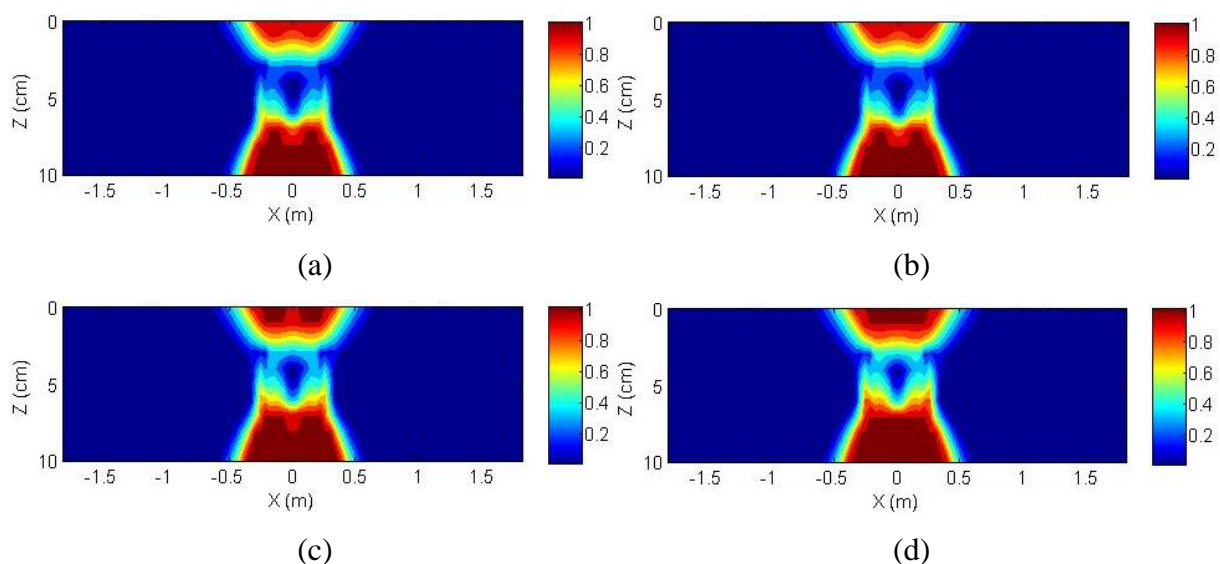


Figura 145 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

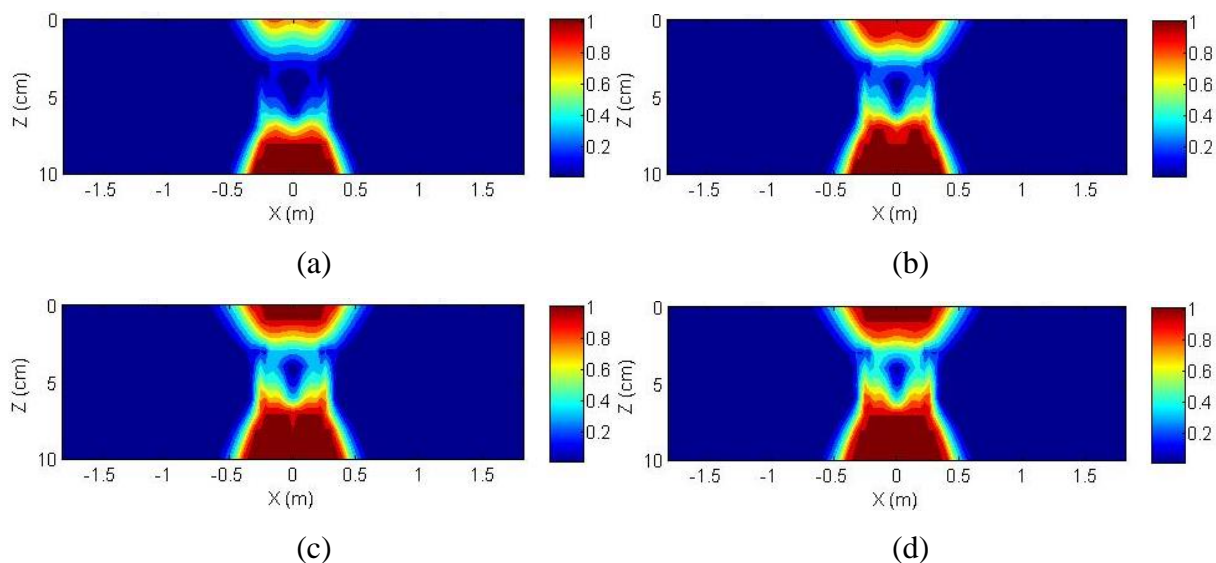


Figura 146 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

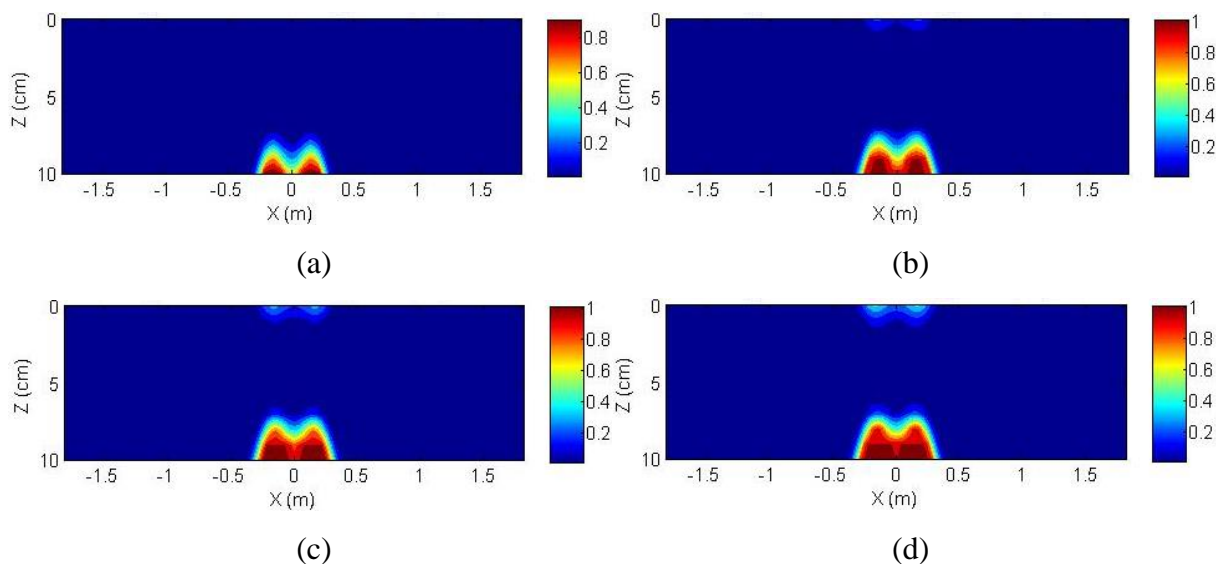


Figura 147 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

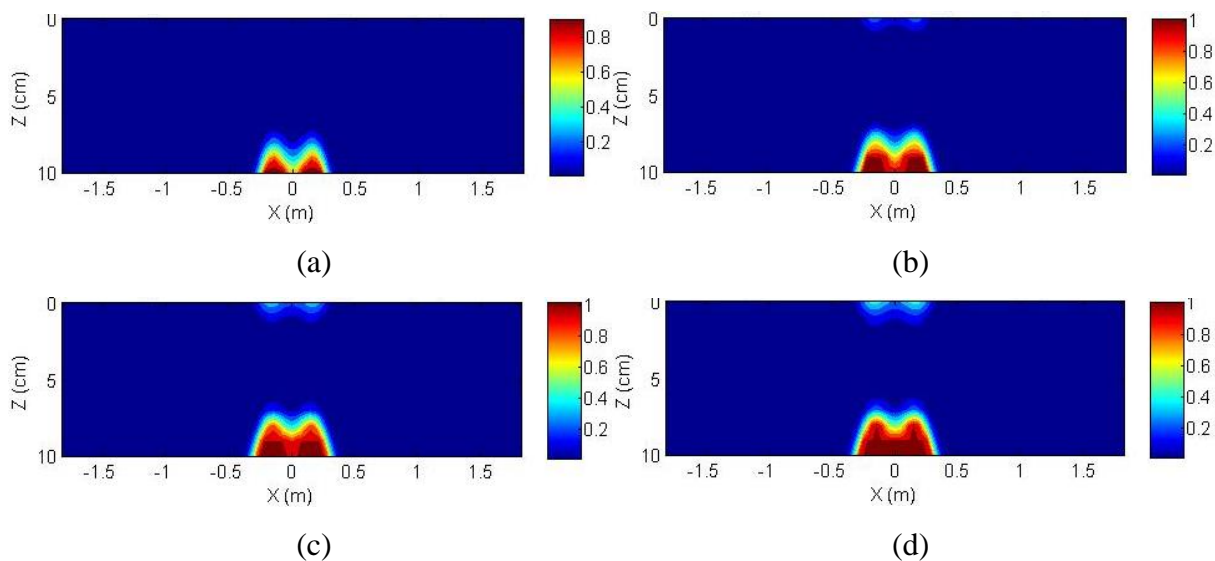


Figura 148 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+0%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

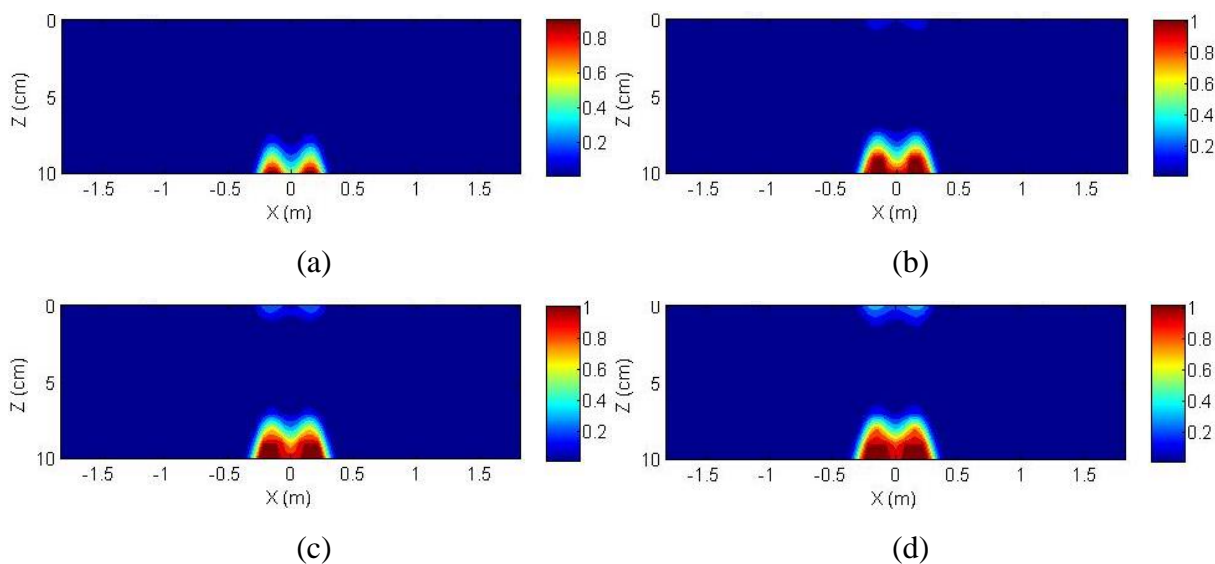
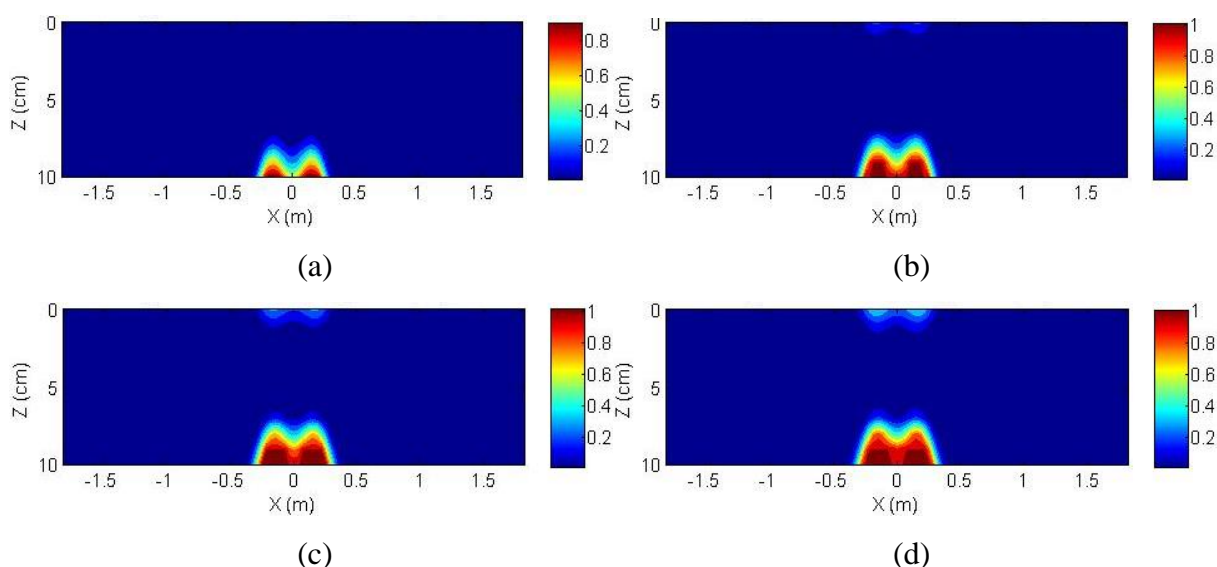


Figura 149 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), carga real, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.



O efeito do dano foi mais intenso nas condições avaliadas considerando o critério de ruptura do G^R , da mesma forma que na Figura 128 da evolução do dano ao longo do tempo, com o revestimento chegando a um estado significativo de dano nos 12 meses após início da liberação da rodovia ao tráfego, principalmente para a mistura usinada.

A mistura usinada apresenta maior rigidez, devido ao envelhecimento, e um teor de ligante inferior, o que impactou de forma relevante no acúmulo do dano ao longo do tempo e decréscimo no desempenho à fadiga. Outra consideração a ser feita é em relação à mistura reprodução usina que apresentou maior acúmulo do dano para o critério de ruptura do D^R , podendo este fato estar relacionado ao impacto do protocolo usado em laboratório para envelhecimento da mistura em estufa por um período de duas horas na temperatura de compactação. Este envelhecimento em laboratório pode ser muito severo quando comparado ao envelhecimento em usina. Sabe-se da importância de simular em laboratório a condição de envelhecimento a curto prazo que ocorre durante a usinagem e transporte da mistura até aplicação em campo. Conforme o estudo realizado por Oshone (2018), esta simulação estaria mais próxima da condição de reaquecimento e posterior permanência da mistura em estufa por um período de quatro horas na temperatura de 135°C, porém o envelhecimento pode ser mais ou menos severo, dependendo do processo de usinagem.

As misturas extraídas mostraram menor acúmulo de dano ao longo do tempo, quando comparadas à mistura projetada com o mesmo teor de ligante. Isto possivelmente esteja

relacionado ao menor volume de vazios das amostras das misturas extraídas e, também, à maior quantidade de materiais finos presentes na mistura, contribuindo para o melhor desempenho à fadiga.

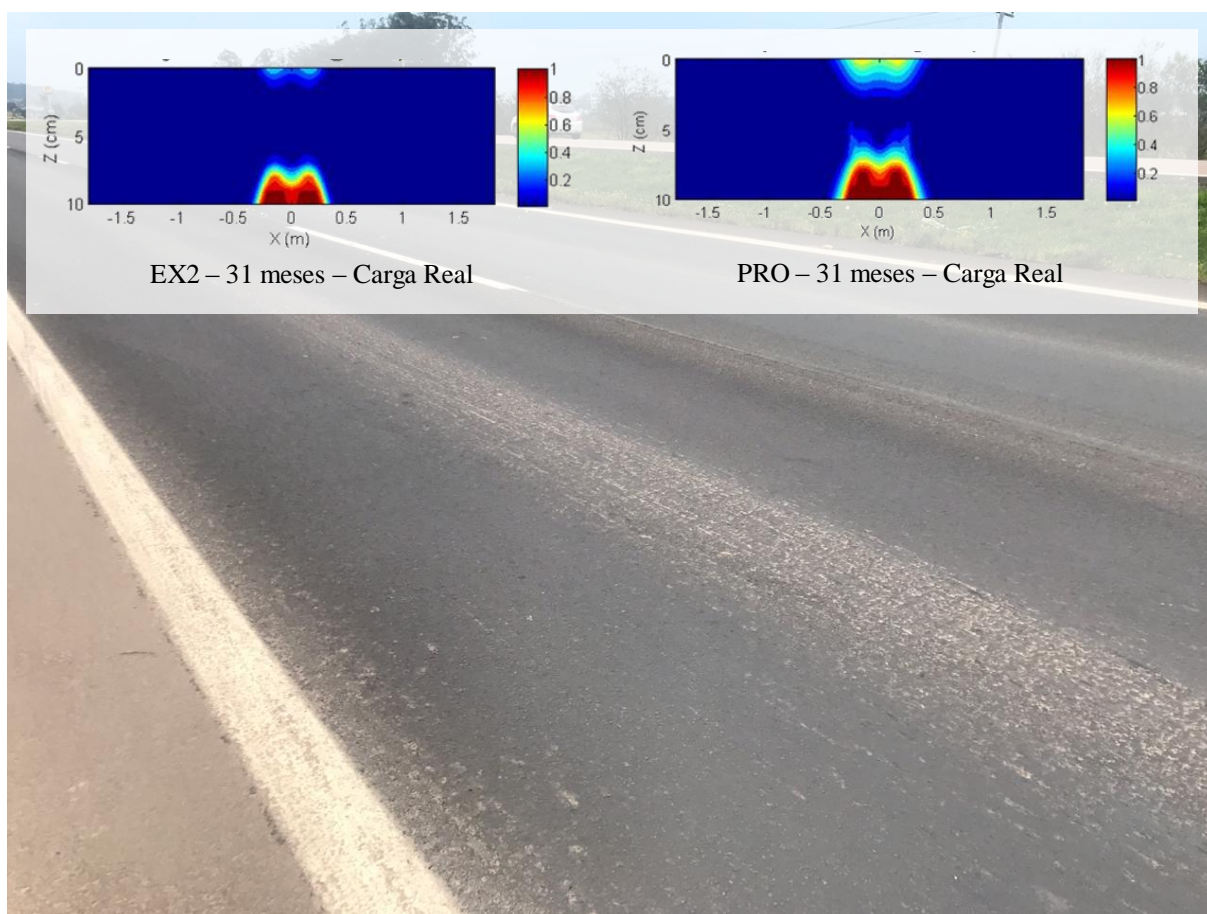
Os gráficos *contour* auxiliam na visualização da forma como o dano ocorre ao longo da camada de revestimento, colaborando nas análises da estrutura. Constata-se que algumas misturas apresentam área danificada somente na zona inferior da camada, enquanto outras também apresentam predisposição ao trincamento de cima para baixo (*top-down cracking*), como é o caso da mistura usinada, para ambos os critérios de ruptura, da mistura projetada, para o critério de ruptura do G^R , e da mistura reprodução usinada, para o critério de ruptura do D^R .

Misturas de módulo mais elevado tendem a sofrer maior tensão de cisalhamento no contato pneu-pavimento e, conseqüentemente, apresentar mais *top-down cracking*. As misturas que possuem maior módulo neste trabalho, são as que apresentaram maior área danificada na superfície, sendo elas as misturas US, RUS e PRO, nesta ordem.

Constata-se, também, que o surgimento de área danificada na superfície contribui imensamente no acúmulo de dano na malha de análise de 110 pontos. As misturas que possuem menor rigidez são as que apresentaram o menor dano acumulado no horizonte de projeto. Desta forma, ressalta-se a importância do módulo dinâmico no desempenho à fadiga em campo.

Comparando visualmente os gráficos *contours* gerados com os levantamentos de campo, conclui-se que a mistura extraída trecho 2 (EX2) se assemelha mais com a condição real de campo do que a mistura projetada. A Figura 150 mostra uma foto retirada do trecho com 31 meses, juntamente com os gráficos *contours* gerados para o mesmo mês, das misturas EX2 e PRO. O resultado da mistura PRO indica o surgimento de *top-down cracking*, o que não é observado em campo, enquanto o resultado da mistura EX2 indica somente dano na parte inferior da camada, o que não é visível na superfície.

Figura 150 – Comparação visual entre o observado em campo e o simulado pelo FlexPAVE™.



A comparação entre os resultados das simulações e a condição de campo, requer a utilização de uma função de transferência, o que não foi utilizado neste caso. Porém, isto não invalida a comparação feita, uma vez que ela é qualitativa, e não quantitativa.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos no presente trabalho e apresentados nos capítulos anteriores. São sintetizadas as discussões da etapa de instrumentação e dos estudos realizados em laboratório, de forma a atender os objetivos propostos. Também são apresentadas sugestões para pesquisas futuras visando um complemento frente aos temas estudados e as limitações desta pesquisa.

7.1 INSTRUMENTAÇÃO DO TRECHO DA BR-116/RS

A partir das etapas realizadas para instrumentação do revestimento do pavimento da BR-116/RS, faz-se as seguintes considerações:

- O processo de instrumentação realizado em ambas as fases de instalação foi considerado bem-sucedido, com todos os sensores apresentando leitura logo após instalados. A única exceção foi a célula de pressão com capacidade de 0,5 MPa, instalada na segunda fase da instrumentação, que não apresentou leitura. No entanto, esta célula estava sendo reaproveitada da instrumentação realizada por Gonçalves (2002) em uma pista experimental localizada no LAPAV/UFRGS, e não causou prejuízos à interpretação de resultados.
- Foram inúmeras as dificuldades encontradas durante a execução das etapas de instrumentação e ao longo do período de coleta dos dados do trecho, pois o sistema de instrumentação foi instalado em uma rodovia em serviço, com condições variáveis de carga e posição dos veículos. Também foram enfrentados vários transtornos no período de coleta de dados, devido a vandalismos e furtos dos cabos de fornecimento de energia, inviabilizando uma coleta contínua por um período prolongado, como era esperado no início da pesquisa. Contudo, foi possível coletar dados em torno de 10 meses, com excelente qualidade dos sinais, colaborando para as análises realizadas em conjunto com os estudos de laboratório.
- O sistema de aquisição de dados foi validado e atendeu aos objetivos propostos quanto a coleta de dados a partir de um sistema embarcado de processamento de sinal; isto

permitiu a otimização do volume de dados armazenados, mesmo em condições de tráfego real.

- A disposição entre os sensores, com a presença de duas células de carga, *strain gages* com compensação de temperatura embutidos na roseta, permitiram precisa informação das deformações, independente da temperatura do pavimento e inferência do posicionamento do eixo do veículo em relação aos sensores com relação às solicitações registradas, bem como velocidade dos veículos.
- O processo de tratamento de dados se mostrou adequado, com uma excelente qualidade dos sinais e uma adequada relação sinal-ruído, atendendo a taxas de aquisição necessárias para as velocidades operacionais da via em serviço.
- As simulações realizadas com o FlexPAVETM validam os dados obtidos em campo, bem como a análise em conjunto com as variações de temperatura utilizando o banco de dados climáticos do MERRA. Os níveis de deformação obtidos nas temperaturas baixas e intermediárias, intervalo de 8°C a 26,5°C, foram em torno de 60 $\mu\epsilon$ a 95 $\mu\epsilon$, enquanto para as altas temperaturas, intervalo de 30°C a 55°C, variaram de 115 $\mu\epsilon$ a 300 $\mu\epsilon$, considerando o eixo-padrão de 80 kN e a velocidade padrão da rodovia de 80 km/h.
- Os dados provenientes da instrumentação de campo se mostraram capazes de servir como auxiliar na tomada de decisões para intervenções ou reabilitações de pavimentos, podendo ser um relevante observatório das condições estruturais do pavimento com custos moderados, permitindo o contínuo monitoramento da relação carga e deformação.
- Como o sistema de instrumentação permite a leitura dos esforços em tempo real, é possível analisar também o impacto de intervenções no pavimento como, por exemplo, recapagem ou microrrevestimento, na resposta do pavimento, e então simular o desempenho através de análise numérica.
- Os levantamentos realizados em campo para avaliar a condição funcional e estrutural do pavimento mostraram uma deterioração precoce do revestimento, fazendo com que a Concessionária precisasse intervir com microrrevestimento e, assim, não fosse possível acompanhar um potencial surgimento de área trincada no trecho estudado.

7.2 DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À FADIGA

A mistura asfáltica aplicada no trecho da BR-116/RS foi avaliada para diferentes condições de produção, bem como diferentes métodos de ensaio e interpretação, quanto ao comportamento mecânico, chegando-se as seguintes considerações:

- As misturas estudadas diferem entre si, basicamente, pelo modo de produção. Duas das misturas foram estudadas por meio de corpos de prova extraídos de campo, no trecho em estudo (EX1 e EX2). A mistura PRO é uma mistura produzida em laboratório, reproduzindo fielmente a mistura projetada. A mistura US é produzida em usina, e trazida ao laboratório para a realização dos ensaios. Como esta mistura não tem exatamente as mesmas características da mistura como projetada, decidiu-se produzir uma mistura em laboratório, com estas mesmas características, denominada reprodução usina (RUS).
- As misturas asfálticas usinada e reprodução usina, que diferem entre si apenas pelo método de produção (usina vs laboratório), apresentaram maior resistência à tração por compressão diametral, mostrando o impacto causado pela redução no teor de ligante em relação à mistura projetada, o que torna a mistura menos elástica.
- A rigidez das misturas determinadas pelo ensaio de módulo de resiliência apresentou maior variabilidade, possivelmente gerada pelas incertezas intrínsecas da configuração do ensaio.
- No ensaio de módulo dinâmico, as misturas com menor teor de ligante, US e RUS, apresentam maior rigidez em relação às demais. A mistura produzida em usina apresentou maior rigidez, provavelmente causada por algum grau de oxidação durante o processo de usinagem, reiterando a importância do procedimento de moldagem (tempo de envelhecimento em estufa).
- Nos ensaios de fadiga FCD, a classificação quanto ao desempenho, em ordem de melhor para pior, é: US, PRO, EX2 e EX1. Para os ensaios de F4P a classificação é: PRO, RUS, EX2 e EX1. Como se observa, as misturas extraídas do trecho apresentam os piores comportamentos para ambos os modos de ensaio, enquanto as demais misturas aparecem consistentemente como melhores.

- Já para os ensaios de FTD, o desempenho é melhor analisado nas simulações (nível estrutural), ou então usando parâmetros/índices (nível de material), como o fator de área de fadiga (FAF) e a capacidade de dano (S_{app}). Para ambos os parâmetros, o ranqueamento é o mesmo: EX1, EX2, PRO, RUS e US. Salienta-se que as amostras das misturas EX1 e EX2 foram extraídas de vigotas, e seus volumes de vazios eram menores em relação às demais misturas, contribuindo para o melhor desempenho. Estes resultados se mostram coerentes com os valores de módulo dinâmico obtidos, onde misturas menos rígidas tendem a melhores resultados de fadiga.
- Nas simulações no FlexPAVETM, os critérios de ruptura do G^R e do D^R foram avaliados. Quando utilizado o critério do G^R , o ranqueamento das misturas em relação ao dano é: EX1, EX2, RUS, PRO e US. Já para o critério do D^R , a classificação é: EX1, EX2, PRO, US e RUS, o que é coerente com os resultados da classificação à nível de material e, também, com os resultados de módulo dinâmico.
- Com isto, pode-se dizer que o método de análise da fadiga pode interferir na sua interpretação, não só quantitativamente, mas também em termos de comparação entre misturas asfálticas.
- Portanto, os ensaios de fadiga por tração direta, em conjunto com o modelo S-VECD, são recomendados por serem mais compreensivos e capturarem parâmetros de estado do material. Além disto, permitem a modelagem do material e, então, a simulação do desempenho sob condições realísticas de clima e tráfego. Com este modelo, pode-se analisar o comportamento do material em qualquer condição de temperatura e nível de deformação, mesmo diferentes das condições do ensaio.
- A estrutura analisada se mostrou insuficiente para o nível do carregamento do trecho estudado da BR-116/RS. Isso ficou evidente pela elevada tensão de tração na fibra inferior do revestimento determinada nas simulações realizadas no AEMC e no FlexPAVETM, bem como pela deformação de tração medida pelos sensores, o que levará a estrutura ao trincamento precoce em relação ao período para a qual foi projetada.
- Os valores obtidos do parâmetro S_{app} não são compatíveis com o nível de tráfego do trecho avaliado. De acordo com o tráfego da rodovia, a capacidade de dano deveria ser de no mínimo 24, considerando a carga real da rodovia e um número N (AASHTO) para

o período de 10 anos. Porém, as misturas estudadas apresentaram valores de S_{app} de 22, 19, 13, 6 e 4, para as misturas EX2, EX1, PRO, US e RUS, respectivamente. Em relação à classificação do desempenho das misturas quanto à fadiga, o parâmetro S_{app} proporciona a mesma classificação gerada pelo FlexPAVETM, considerando o critério de ruptura do D^R .

- Pode-se observar que o efeito da diferença entre a CML+0% e a carga real, que trafega na rodovia, é significativa. Já para as outras considerações de tráfego, a variação não afetou tanto no desempenho da estrutura avaliada, para as condições empregadas.
- Simulações das misturas extraídas são mais coerentes com as observações de campo, uma vez que pequenas diferenças entre a mistura projetada e a mistura executada podem levar a grandes diferenças no desempenho do material.
- A partir dos resultados obtidos é recomendado, sempre que possível, a utilização de amostras extraídas de campo para avaliação de estruturas de pavimentos existentes, uma vez que estas amostras serão mais representativas da condição real do material empregado.
- Em fase de projeto, anterior à construção do pavimento, não é possível a obtenção de amostras de campo, portanto, para mitigar os efeitos da diferença entre amostras produzidas em campo e laboratório, recomenda-se que os procedimentos de envelhecimento da mistura em laboratório sejam revistos, com o objetivo de simular de maneira mais fidedigna a condição das misturas usinadas.
- As simulações realizadas através do modelo S-VECD são uma ferramenta valiosa para a previsão de desempenho das estruturas, podendo este processo ser realizado na etapa de projeto da mistura, contribuindo para um projeto estrutural compatível com tráfego, clima e material.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões deste trabalho verifica-se que ainda há diversos elementos que podem ser abordados e explorados em novas pesquisas. Assim, como complemento da presente Tese são sugeridos os seguintes tópicos:

- Investigar, a partir de dados coletados em campo, a relação da energia dissipada com o processo de deterioração do pavimento, visto ser difícil, muitas vezes, verificar/acompanhar em campo o surgimento e evolução da área trincada na superfície do revestimento.
- Usar a instrumentação de campo constantemente, como uma ferramenta de gestão de pavimentos.
- Ampliar o estudo de envelhecimento de misturas asfálticas em laboratório aplicando o protocolo considerando o resfriamento e reaquecimento das misturas para diferentes temperaturas.
- Modelar o impacto, no desempenho a longo prazo, das diferenças entre mistura projetada e possíveis variações granulométricas, do teor de ligante e volume de vazios.
- Avaliar o desempenho das misturas estudadas frente à deformação permanente, considerando o parâmetro *Flow Number* e o ensaio de varredura de tensões (SSR – *Stress Sweep Rutting Test*), visto este também ser um mecanismo importante de degradação.
- Simular as condições estruturais levando em consideração o espectro de cargas, ao invés de eixos equivalentes.

REFERÊNCIAS

ABOJARADEH, M. **Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based in Dissipated Energy and Stiffness Ratio**. Jordan Journal of Civil Engineering, vol. 7, n^o. 1, p. 54-59, 2013.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento Mecânico de Concretos Asfálticos com Diferentes Granulometrias, Ligantes e Métodos de Dosagem**. Dissertação (Mestre em Engenharia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AL-QADI, I. L.; NASSAR, W. N. **Fatigue Shift Factors to Predict HMA Performance**. The International Journal of Pavement Engineering, vol. 4, p. 69-75, 2003.

ALVAREZ, C.; THOMPSON, M. R. **Mechanistic-Empirical Evaluation of the Mn/Road Mainline Flexible Pavement Sections**. Project IHR-535, Illinois Cooperative Highway and Transportation Research Program, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1998.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, DC, 1993.

_____. **AASHTO TP-31**: Standard Test. Method for Determining Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension. Washington, DC, 1996.

_____. **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.

_____. **AASHTO R-30**: Standard Practice for Mixture of Hot-mix Asphalt (HMA). Washington, DC, 2015.

_____. **AASHTO R-84**: Standard Practice of Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, DC, 2017.

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

_____. **AASHTO TP-132**: Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus for Asphalt Mixtures Using Small Specimens in the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, DC, 2019.

_____. **AASHTO TP-133**: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using Small Specimens in the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, DC, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3497**: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, 1995.

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

_____. **ASTM D2172**: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures. Philadelphia, 2011.

ARABANI, M.; FERDOWSKI, B. **Evaluating the Semi-Circular Bending Test for HMA Mixtures**. IJE Transactions A: Basics, vol. 22, n°. 1, p. 47-58, 2009.

ASHOURI, M. **Modeling Microdamage Healing in Asphalt Pavements Using Continuum Damage Theory**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16208**: Misturas Asfálticas - Determinação do Teor de Betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo Refluxo Duplo. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15573**: Misturas Asfálticas – Determinação da Densidade Aparente e da Massa Específica Aparente de Corpos de Prova Compactados. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16018**: Misturas Asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Diametral sob Carga Repetida. Rio de Janeiro, 2012.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. **The Healing Capability of Asphalt Pavements: a state of the art review**. Journal of Cleaner Production, n°. 113, p. 28-40, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.034>.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A Contribution to Couple Aging to Hot Mix Asphalt (HMA) Mechanical Characterization Under Load-induced Damage**. M.Sc. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2014.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B.; BRANCO, V. T. F. C. **Interpreting Fatigue Tests in Hot Mix Asphalt (HMA) using Concepts from Viscoelasticity and Damage Mechanics**. Transportes, v. 23, n°. 2, ISSN: 2237-1346 (online), 2015.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H.; BRANCO, V. T. F. C. **Aging-Effect Incorporation into the Fatigue-Damage Modeling of Asphalt Mixtures Using the S-VECD Model**. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. [https://doi:10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001676](https://doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001676).

BABADOPULOS, L. F. A. L., SOARES, J. B., FERREIRA, J. L. S., NASCIMENTO, L. A. H. **Fatigue Cracking Simulation of Aged Asphalt Pavements Using a Viscoelastic**

Continuum Damage Model. Road Materials and Pavement Design, p. 1-15, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1418715.

BABURAMANI, P. **Asphalt Fatigue Life Prediction Models: A Literature Review.** ARRB Transport Research Ltd. – Research Report ARR 334. Vermont South, Victoria. 1999.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração.** São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BASTOS, A. G. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfálticas: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 504 p., 2008.

BHASIN A., BRANCO, V. T. F. C.; MASAD, V.T.F.; LITTLE, D. N. **Quantitative Comparison of Energy Methods to Characterize Fatigue in Asphalt Materials.** Journal of Materials in Civil Engineering, n° 2, vol. 21, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:2(83).

BOCK, A. L. **Pesagem em Movimento de Cargas Atuantes em Rodovias e seu Impacto no Desempenho de Pavimentos da Rede Temática de Asfalto.** Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. **Indicadores do Desempenho de Misturas Asfálticas Determinados Através do Ensaio de Compressão Diametral.** Transportes, vol. XVI, n° 1, 2008. <https://doi.org/10.14295/transportes.v16i1.10>.

BRITO, L. A. T., HELLER, L. F. **Montagem e Validação de um Banco de Dados Climáticos para Fins de Avaliação do Efeito da Temperatura no Desempenho de Pavimentos Flexíveis.** Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 4, n° 1, p. 3-18, 2017.

BRITO *et al.* **Definição de uma Metodologia para Avaliar os Impactos do Aumento da Tolerância nas Cargas por Eixo nos Custos de Manutenção de Pavimentos de Rodovias Concedidas.** Relatório final de pesquisa, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Pavimentação da UFRGS – LAPAV, ANTT e ECOPONTE, 2019.

CAO, W.; NOROUZI, A.; KIM, Y. R. **Application of Viscoelastic Continuum Damage Approach to Predict Fatigue Performance of Binzhou Perpetual Pavements**. Journal of Traffic and Transportation Engineering, p. 104-115, 2016.

CARPENTER, S. H.; GHUZLAN, K. A.; SHEN, S. **A Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., nº 1832, p. 131-138, 2003.

CARPENTER, S. H.; SHEN, S. **Dissipated Energy Approach to Study Hot-Mix Asphalt Healing in Fatigue**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., nº. 1970, p. 178-185, 2006.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

CHAVES, J. M. *et al.* **Desenvolvimento do Modelo de Deterioração de Pavimentos Asfálticos com Uso de Instrumentação e Sistema *Weight in Motion***. Autopista Fernão Dias/ANTT, Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT, Projeto 06, SGP/AFD_06 REV.0, 2016.

CHEHAB, G. R.; KIM, Y.; SCHAPERY, R. A.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. **Time-Temperature Superposition Principle for Asphalt Concrete with Growing Damage in Tension State**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 71, p. 559-593, 2002.

CHEHAB, G. R.; KIM, Y.; SCHAPERY, R. A.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. **Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension Using a Viscoelastoplastic Model**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technology, vol. 72, p. 315-355, 2003.

CHEHAB, G. R.; O'QUINN, E.; KIM, Y. R. **Specimen Geometry Study for Direct Tension Test Based on Mechanical Tests and Air Void Variation in Asphalt Concrete Specimens Compacted by Superpave Giratory Compactor**. Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board, nº 1723, p. 125-132, 2000. DOI:10.3141/1723-16.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 71, p. 619-650, 2002.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DER IP-DE-P00/003: Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimento – Instrução de Projeto**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 011:** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

_____. **DNER 024:** Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 83:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005:** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - terminologia. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **DNIT 006:** Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - procedimento. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **DNIT IPR-720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 031:** Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 135:** Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 136:** Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação da Resistência à tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 178:** Pavimentação Asfáltica – Preparação de Corpos de prova para Ensaio Mecânicos usando o Compactador Giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 183:** Pavimentação Asfáltica – Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 416:** Pavimentação Asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DNIT/UFSC. **Fase 1 – Avaliação das Metodologias de Pesagem em Movimento Existentes.** In: Convênio 102/2007 - Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento, Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Laboratório de Transportes e Logística. Florianópolis, Santa Catarina, 2007.

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.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures**. *Materials and Structures*, vol. 37, p. 202-216, apr. 2004.

DONDI, G.; PETTINARI, M.; SANGIORGI, C.; ZOOROB, S. E. **Traditional and Dissipated Energy Approaches to Compare the 2PB and 4PB Flexural Methodologies on a Warm Mix Asphalt**. *Construction and Building Materials*, vol. 47, p. 833-839, 2013.

ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. **Accelerated Pavement Performance Modeling Using Layered Viscoelastic Analysis**. In: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, p. 497-506, 2012.

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

FACCIN, C. **Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo Quanto à Deformação Permanente**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.

FONSECA, L. L. **Avaliação em Laboratório do Comportamento de Camadas Asfálticas Reforçadas com Geossintéticos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho, Portugal, 2009.

FONTES, L. P. T. L.; TRICHÊS, G.; PEREIRA, P. A. A.; PAIS, J. C. **Consideração da Propagação de Trincas em Camadas de Reforço com Misturas com Asfalto-Borracha**. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza, 2009.

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

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecânico - empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – Guia para Utilização de Método Mecânico-Empírico: Apresentação dos Programas desenvolvidos**. Relatório Parcial IV (A), Convênio UFRJ/DNIT, 2018.

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

GAO, L.; NI, F.; LING, C; YAN, J. **Evaluation of Fatigue Behavior in Cold Recycled Mixture Using Digital Image Correlation Method**. *Construction and Building Materials*, vol. 102, p. 393-402, 2016.

GARG, N.; LI, Q.; HAGGAG, M. **Accelerated Pavement Testing of Perpetual Pavement Test Sections under Heavy Aircraft Loading at FAA's National Airport Pavement Test Facility**. In: International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Fortaleza, 2018.

GEOKON. **Instruction Manual Earth Pressure Cells - Model 3500 Series**. Disponível em: < http://www.geokon.com/content/manuals/3500_Earth_Pressure_Cells.pdf >. 2013. Acesso em: fev. 2016.

GHUZLAN, K. A., CARPENTER. **Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, nº 1723, Washington, D.C., p. 141-149, 2000.

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

GODOI, L. C. **Aplicação do Ensaio de Flexão em Amostra Semicircular para Avaliação de Trincamento de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GUDIPUDI, P.; UNDERWOOD, S. **Reliability Analysis of Fatigue Life Prediction from the Viscoelastic Continuum Damage Model**. Transportation Research Record, Transportation Research Board, nº 2576, Washington, D.C., 2016. DOI: 10.3141/2576-10.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

HARVEY, J. T.; DEACON, J. A.; TSAI, B-W; MONISMITH, C. L. **Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California**. Report Prepared for California Department of Transportation, Nº RTA-65W48-2, Asphalt Research Program, CAL/APT Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1995.

HARVEY, J. T; MONISMITH, C. L. **Effect of Laboratory Asphalt Concrete Specimen Preparation Variables on Fatigue and Permanent Deformation Test Results Using Strategic Highway Research Program A-003A Proposed Testing Equipment**. Transportation Research Record, Transportation Research Board, nº 1417, Washington, D.C., 1993.

HOU, T. **Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model**. Thesis (Master of Science). Faculty of North Carolina State University, Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, USA, 2009.

HU, X.; HU, S.; WALUBITA, L. F.; SUN, L. **Investigation of Fatigue Cracking: Bottom-up or Top-down**. RILEM International Conference on Cracking in Pavements, nº 6, Chicago, p. 333–344, 2008.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 75 p. 2004.

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

JOHNSON, E.; JOHNSON, G.; DAI, S.; LINELL, D.; MCGRAW, J.; WATSON, M. **Incorporation of Recycled Asphalt Shingles in Hot Mixed Asphalt Pavement Mixtures**. Final Report for Minnesota Department of Transportation, 2010.

KAREEM, Y. N. A.; CHANDRA, S. **Review of Studies on Fatigue Behavior of Bituminous Concrete**. International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, College of Engineering, Teerthanker Mahaveer University, 2012.

KARKI, P.; LI, R.; BHASIN, A. **Quantifying Overall Damage and Healing Behaviour of Asphalt Materials Using Continuum Damage Approach**. International Journal of Pavement Engineering, vol. 16, n° 4, p. 350–362, 2014.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. McGraw-Hill Companies, 2009.

KIM, Y. R.; DANIEL, J. S.; WEN, H. **Fatigue Performance Evaluation of WesTrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach**. North Carolina State University. Report n° FHWA/NC/2002-004, 2002.

KIM, Y. R.; LEE, Y. C. **Interrelationships Among Stiffnesses of Asphalt-Aggregate Mixtures**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 64, p. 575-609, 1995.

KIM, Y. R.; LEE, H. J.; LITTLE, D. N. **Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 66, p. 633–685, 1997.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. **One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. Journal of Engineering Mechanics, vol. 116, N° 4 p. 751-772, abr., 1990.

KIM, Y. R.; WANG, Y. **D^R Failure Criterion for Cracking of Asphalt Concrete**. Asphalt Mixture & Construction Expert Task Group Meeting Ames, IA, May, 2017.

KLINSKY, L.; FARIA, V.; ODA, S.; CAVALCANTI, L.; BARELLA, R. **Avaliação da Influência do Tipo de Ligante Asfáltico na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas**. Encontro do Asfalto, n° 21, IBP, Rio de Janeiro, 2014.

LEANDRI, P.; BACCI, R.; DI NATALE, A.; ROCCHIO, P.; LOSA, M. **Appropriate and Reliable use of Pavement Instrumentation on In-service Roads**. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, p. 1424-1433, 2013. DOI: 10.1061/9780784413005.120.

LEIVA-VILLACORTA, F.; TIMM, D. H. **Simulating the Effects of Instrumentation on Measured Pavement Response**. Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing. Taylor & Francis Group, p. 153-161, 2012.

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, n°. 1769, p. 142-151, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1769-17>.

LUO, X. **Characterization of Fatigue Cracking and Healing of Asphalt Mixtures**. Dissertation (Doctor of Philosophy). Texas A&M University, Civil Engineering, Texas, USA, 2012.

LOPES, T. A. S. **Análise do Efeito da Sazonalidade da Temperatura e do Tráfego no Desempenho de Pavimentos Flexíveis: Segmentos Monitorados de Araranguá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019.

LUZ, L. C. da. **Desempenho de Revestimentos Asfálticos Executados em Camada Singulares Integradas em Rodovias de Tráfego Pesado: Segmentos Monitorados de Araranguá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2017.

LYTTON, R. L.; UZAN J.; FERNANDO E. G.; ROQUE R.; HILTUMEN D.; STOFFELS, S. M. **Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes**. SHRP A-357, TRB, National Research Council, Washington, D. C. 1993.

MATEOS, A.; AYUSO, J. P.; CADAVID, B. **Shift Factors for Asphalt Fatigue from Full-scale Testing**. Annual Meeting of the Transportation Research Board, CEDEX Transport Research Center, 2011.

MATEOS, A.; WU, R.; HARVEY, J.; DENNEMAN, E.; FAN, A. **The Logit Model and the Need to Reproduce the Stiffness Degradation Curve of Asphalt Specimens During Fatigue Testing**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 2631, p. 105–113, 2017.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e Análise do Desempenho de Pavimentos Flexíveis da Ampliação da Rodovia BR-290/RS – A Implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MATTHEWS, J. M., MONISMITH, C. L., CRAUS, J. **Investigation of laboratory fatigue testing procedures for asphalt aggregate mixtures**. Journal of Transportation Engineering, vol. 119, p. 634-654, 1993.

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.

MELLO, L. G. R. **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MINHOTO, M. J. C. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Tese (Doutoramento). Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

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

MOGAWER, W.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S.; BONAQUIST, R.; AUSTERMAN, A.; BOOSHEHRIAN, A. **Performance Characterisitcs of Plant Produced High RAP Mixtures**. Road Materials and Pavement Design, vol. 13, p. 183–208, 2012.

MOMM, L. Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a **Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MONISMITH, C. L.; DEACON, J. A. **Fatigue of Asphalt Paving Mixtures**. Transportation Engineering Journal of ASCE, vol. 95, p. 317-346, 1969.

MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M. A.; COOPER, S. B.; HUGHES, C. S.; BUTTON, J. W.; DUKATZ, E. I. **Comparing the Volumetric and Mechanical Properties of Laboratory and Field Specimens of Asphalt Concrete**. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP 818, Washington, D.C., 2016.

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.

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga**. Curso ministrado na Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março, 2016.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Program 1-37A, Final Report. Washington, 2004.

NÚÑEZ, W. P. **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

OSHONE, M.; PIRES, G. M.; CARRIÓN, A. J. D. B.; RAHBAR-RASTEGAR, R.; AIREY, G. D.; DANIEL, J. S.; BAILEY, H.; SMITH, D. **Simulating Plant Produced Material in the Laboratory to Replicate Rheological and Fatigue Properties**. Road Materials and Pavement Design, 2672 (28), p. 471-480, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1484384.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PARK, H. J. **Investigation of Primary Causes of Load-Related Cracking in Asphalt Concrete Pavements in North Carolina**. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2013.

PELL, P. S.; MCCARTHY, P. F.; GARDNER, R. R. **Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes**. International Journal of Mechanical Sciences. vol. 3, p. 247-267, 1961.

PELL, M.; COOPER, K. **The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials**. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologist, vol. 44, 1975.

PERRET, J. **Déformations des Couches Bitumineuses au Passage D'une Charge de Trafic**. Thèse. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.

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.

PREUSSLER, E. S., PINTO, S, MEDINA, J. **Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos**. Reunião Anual de Pavimentação, 16. Recife: ABPV, 1981.

PRIEST, A. L. **Calibration of Fatigue Transfer Functions for Mechanistic-empirical Flexible Pavement Design**. Thesis (Master of Science). Faculty of Auburn University, Auburn, Alabama, 2005.

PRIEST, A. L; TIMM, D. H. **Methodology and Calibration of Fatigue Transfer Functions for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design**. National Center for Asphalt Technology, NCAT, Auburn University, NCAT Report 06-03, 2006.

PRONK, A. C.; HOPMAN, P. C. **Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue**. Proc., United States Strategic Highway Research Program–Sharing the Benefits, Institution of Civil Engineers (ICE), London, 255–267, 1990.

RAHBAR-RASTEGAR, R.; DANIEL, J. **Laboratory Versus Plant Production: Impact of Material Properties and Performance for RAP and RAS Mixtures**. International Journal of Pavement Engineering, vol. 20, p. 61-72, 2016. doi.org/10.1080/10298436.2016.1258243.

RAHBAR-RASTEGAR, R.; DAVE, E. V.; DANIEL, J. S. **Fatigue and Thermal Cracking Analysis of Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage and Cohesive Zone Fracture Models**. 7th International European Asphalt Technology Association Conference, Zurich, Switzerland, 2017.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

ROWE, G. M. **Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 62, p. 344-384, 1993.

ROWE, G. M. **Application of the Dissipated Energy Concept to Fatigue Cracking in Asphalt Pavements**. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, 1996.

ROWE, G. M.; BOULDIN, M. G. **Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures**. 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, 2000.

SABOURI, M.; KIM, Y. R. **Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures Under Different Modes of Fatigue Loading**. Transportation Research Record N° 2447–Journal of the Transportation Research Board. Washington, DC. p. 117-125, 2014.

SCHAPERLY, R. A. **Correspondence Principle and a Generalized J-Integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media**. International Journal of Fracture, vol. 25, n° 3, p. 195-223, 1984.

SCHAPERLY, R. A.; PARK, S. W. **Methods of Interconversion Between Linear Viscoelastic Materials Function. Part II – An Approximate Analytical Method**. International Journal of Solids and Structures, vol. 36, p.1677-1699, 1999.

SCHUTZ, W. **A history of fatigue**. Engineering fracture mechanics, vol. 5, n° 2, p. 263-300, 1996.

SHAN, L., TAN, Y., UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Thixotropic Characteristics of Asphalt Binder**. Journal of Materials in Civil Engineering, n° 23, p. 1681-1686, 2011. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000328](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000328).

SHEN, S; AIREY, G. D.; CARPENTER, S. H.; HUANG, H. A. **Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation**. Road Materials and Pavement Design, vol. 7, p. 47-69, 2006. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690026.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Application of Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, n° 1929, Washington, D.C., p. 165-173, 2005.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated Energy Approach to Study Hot-mix Asphalt Healing in Fatigue**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1970(1), p. 178-185, 2006.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing**. COE report n°. 29. Center of Excellence for Airport Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign-Urbana Metropolitan Area, Illinois, USA, 2007.

SHEN, S.; CHIU, H.; HUANG, H. **Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 22, n° 9, p. 846-852, 2010.

SHEN, S.; LU, X. **Energy Based Laboratory Fatigue Failure Criteria for Asphalt Materials**. Journal of Testing and Evaluation, vol. 39, n°. 3, 2011.

SILVA, P. D. E. A.; MOTTA, L. M. G. **Instrumentação da Pista Circular Experimental do IPR/DNER**. Transportes, vol. 7, n° 2, p. 29-46, 1999.

SILVA, B. A. **Análise Mecânica de um Pavimento Rodoviário Submetido à Oscilação do Lençol Freático Simulada em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de Tensões em Pavimentos a partir de Modelo Físico Instrumentado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SPECHT, L.P. **Avaliação de Alternativas de Pavimentação da Duplicação da BR-116 – Trecho Concepa**. Concessionária Porto Alegre – Osório, Concepa. Porto Alegre, 2012.

STEWART, C. M.; REYES, J. G.; GARCIA, V. M. **Comparison of Fracture Test Standards for a Superpave Dense-Graded Hot Mix Asphalt**. Engineering Fracture Mechanics, vol. 169, p. 262-275, 2017.

SUBHY, A.; PRESTI, D. L.; AIREY, G. **New Simplified Approach for Obtaining a Reliable Plateau Value in Fatigue Analysis of Bituminous Materials**. Engineering Failure Analysis, 2017. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.021.

SUPERINTENDÊNCIA DE EXPLORAÇÃO DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA - SUINF. **Manual de Fiscalização de Rodovias Federais Concedidas**. Brasília: ANTT, 2016.

TANGELLA, S. C. S. R., CRAUS, J., DEACON, J. A., MONISMITH, C. L. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures**. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

TAYEBALI, A. A.; ROWE, G. M.; SOUZA, J. B. **Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 61, p. 333-360, 1992.

TAYEBALI, A. A.; DEACON, J. A.; COPLANTZ, J. S.; FINN, F. N.; MONISMITH, C. L. **Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures, Part I e II**. Strategy Highway Research Program, Project A-404. Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, 1994.

TAPSOBA, N.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. **Analysis of Fatigue Test for Bituminous Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 25, p. 701-710, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000636.

TIMM, D. H. **Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study**. National Center for Asphalt Technology, NCAT, Auburn University, NCAT Report Report 09-01, 2009.

TIMM, D. H. **Key Concepts in Dynamic Signal Processing from Instrumented Pavement Sections**. In book: The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-42797-3_22.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. **Calibration of Flexible Pavement Performance Equations for Minnesota Road Research Project**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, n° 1853, p. 134-142, 2003. DOI: 10.3141/1853-15.

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, n° 33, Florianópolis, ABPV, p. 175-190, 2001.

TSAI, B.; HARVEY, J.; MONISMITH, C. **Application of Weibull Theory in Prediction of Asphalt Concrete Fatigue Performance**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, n° 1832, 2003. DOI: 10.3141/1832-15.

ULLIDTZ, P.; HARVEY, J.; TSAI, B.-W.; MONISMITH, C. L. **Calibration of CalME models using WesTrack Performance Data**. California Department of Transportation Division of Research and Innovation Office of Roadway Research, Report n° UCPRC-RR-2006-14, 2006.

ULLIDTZ, P.; HARVEY, J.; BASHEER, I.; LEA, J. D. **Process of Developing a Mechanistic-Empirical Asphalt Pavement Design System for California**. International Conference on Asphalt Pavements, 11, Nagoya, Japan, 2010.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical Techniques for Determining the Endurance Limit of Hot Mix Asphalt Concrete**. In: 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M.N. **Improved Calculation Method of Damage Parameter in Viscoelastic Continuum Damage Model**. Int. J. Pavement Eng. 11 (6), 459–476, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430903398088>.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. **Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC, n° 2296, p. 35-45, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3141/229604>.

VAN DEUSEN, D. A.; NEWCOMB, D. E.; LABUZ, J. F. **A Review of Instrumentation Technology for the Minnesota Road Research Project**. University of Minnesota, 1992.

VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E.; SANBONSUGE, K; CHAVES, J. M. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Contínuas e Descontínuas com Diferentes Ligantes Asfálticos**. Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões, n° 9, Brasília, CBR&C BRASVIAS, 2015.

VICTORINO, D. R. **Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WANG, Y. **Development of the Framework of Performance-Engineered Mixture Design for Asphalt Concrete**. Dissertation (Doctor of Philosophy). Faculty of North Carolina State University. Civil Engineering, Raleigh, North Carolina – USA, 2019.

WANG, C.; CASTORENA, C.; ZHANG, J.; KIM, Y. R. **Unified Failure Criterion for Asphalt Binder under Cyclic Fatigue Loading**. Road Materials and Pavement Design. vol. 16, n° 2, p. 125-148, 2015.

WANG, Y.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. **Fatigue Performance Prediction of Asphalt Pavements with FlexPAVE™, the S-VECD Model, and DR Failure Criterion**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, n° 2672, Washington, D.C., p. 217-227, 2018. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198118756873>.

WANG, Y.; KIM, Y. R. **Development of a Pseudo Strain Energy-Based Fatigue Failure Criterion for Asphalt Mixtures**. International Journal of Pavement Engineering. v. 18, 2017.

WARGO, A. D.; SAFAVIZADEH, S.; KIM, Y. R. **The Use of Four-Point Bending Notched Beam Fatigue Tests to Rank Crack-Mitigating Interlayers**. International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, n° 8, p. 359-370, 2016.

WEN, H.; LI, X. **Development of a Damage-Based Phenomenological Fatigue Model for Asphalt Pavements**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 25, p. 1006-1012, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000573.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

XIAO, F.; PUTMAN, B.; AMIRKHANIAN, S. **Plant and Laboratory Compaction Effects on Performance Properties of Plant-foamed Asphalt Mixture Containing RAP**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 27 (9): 04014240, 2014. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001202.

XIE, Z.; SHEN, J. **Fatigue Performance of Rubberized Stone Matrix Asphalt by a Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model**. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015.

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

ZEIADA, W. A.; UNDERWOOD, B. S.; KALOUSH, K. E. **Impact of Asphalt Concrete Fatigue Endurance Limit Definition on Pavement Performance Prediction**. International Journal of Pavement Engineering, 2016. DOI: 10.1080/10298436.2015.1127372.

ZHANG, J.; SABOURI, M.; GUDDATI, M. N.; KIM, Y. R. **Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures under Fatigue Loading**. Road Materials and Pavement Design, vol. 14, Nº S3, p. 1-15, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812843.

ZHOU, F.; NEWCOMB, D.; GURGANUS, G.; BANIHASHEMRAD, S.; PARK, E. S.; SAKHAEIFAR, M.; LYTTON, R. L. **Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures**. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP 9-57, College Station, Texas, 2016.

APÊNDICE A

RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela A- 1 – Resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral para a mistura projetada.

Amostra (PRO)	Volume de vazios (%)	Nível de tensão (%)	Tensão de tração (kPa)	Deformação específica inicial	Energia dissipada inicial (J/m ³)	Módulo de resiliência inicial			Número de ciclos na ruptura (Nf)
						Módulo de resiliência inicial (MPa)	Média	CV (%)	
1	4,5	15		0,000048	15,48	3999			1,36E+05
2	4,5	15	249	0,000066	20,48	2810	3699	21,2	1,01E+05
3	3,9	15		0,000043	13,48	4288			1,04E+05
4	4,0	20		0,000056	24,14	4385			2,62E+04
5	4,3	20	332	0,000071	33,05	3442	4087	13,7	3,73E+04
6	4,3	20		0,000055	26,50	4435			2,94E+04
7	4,4	30		0,000094	63,94	3898			4,95E+03
8	4,1	30	498	0,000111	79,67	3342	3858	12,9	4,50E+03
9	4,0	30		0,000085	60,40	4334			3,66E+03

Tabela A- 2 – Resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral para a mistura usinada.

Amostra (US)	Volume de vazios (%)	Nível de tensão (%)	Tensão de tração (kPa)	Deformação específica inicial	Energia dissipada inicial (J/m ³)	Módulo de resiliência inicial			Número de ciclos na ruptura (Nf)
						Módulo de resiliência inicial (MPa)	Média	CV (%)	
1	3,9	25		0,000067	36,30	6316			9,74E+04
2	4,1	25	573	0,000081	42,42	5188	6127	14,0	5,40E+04
3	4,2	25		0,000061	30,11	6876			1,10E+05
4	4,3	30	687	0,000086	47,80	8737	7216	29,8	1,63E+04
5	4,5	30		0,000088	59,65	5695			2,02E+04

Tabela A- 3 – Resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral para a mistura extraído trecho 1.

Amostra (EX1)	Volume de vazios (%)	Nível de tensão (%)	Tensão de tração (kPa)	Deformação específica inicial	Energia dissipada inicial (J/m ³)	Módulo de resiliência inicial			Número de ciclos na ruptura (Nf)
						Módulo de resiliência inicial (MPa)	Média	CV (%)	
1	4,0	10	190	0,000020	3,38	6256	5692	14,0	2,94E+04
2	4,0	10		0,000024	4,29	5128			3,81E+04
3	4,1	20	380	0,000081	30,19	3146	3296	6,4	2,12E+03
4	4,1	20		0,000074	26,02	3446			1,88E+03
5	4,1	30	570	0,000135	66,12	2825	2911	4,2	3,10E+02
6	4,1	30		0,000127	86,63	2997			2,87E+02
7	4,3	40	760	0,000160	138,37	3170	2864	15,1	6,17E+01
8	4,3	40		0,000198	184,58	2558			8,17E+01
9	4,4	50	950	0,000290	331,55	2178	2594	22,7	3,24E+01
10	4,4	50		0,000211	281,67	3009			2,12E+01

Tabela A- 4 – Resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral para a mistura extraído trecho 2.

Amostra (EX2)	Volume de vazios (%)	Nível de tensão (%)	Tensão de tração (kPa)	Deformação específica inicial	Energia dissipada inicial (J/m ³)	Módulo de resiliência inicial			Número de ciclos na ruptura (Nf)
						Módulo de resiliência inicial (MPa)	Média	CV (%)	
1	4,4	10	193	0,000032	5,90	3387	3544	6,2	2,75E+04
2	4,3	10		0,000031	6,04	3700			2,71E+04
3	4,4	20	386	0,000072	26,34	3104	2812	14,7	2,60E+03
4	4,5	20		0,000089	35,91	2519			2,71E+03
5	4,7	30	579	0,000145	97,93	2317	2980	31,5	6,86E+02
6	4,6	30		0,000093	51,56	3643			6,27E+02
7	4,9	40	772	0,000131	101,35	2945	3208	11,6	2,44E+02
8	4,9	40		0,000130	113,09	3471			2,36E+02
9	5,0	50	965	0,000222	299,41	2536	-	-	1,17E+02

APÊNDICE B

RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Tabela B- 1 – Resultados do ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos para a mistura projetada.

Amostra (PRO)	Volume de vazios (%)	Amplitude de deformação ($\mu\epsilon$)	Rigidez na flexão inicial			Energia dissipada inicial			Número de ciclos (Nf)
			Rigidez na flexão inicial (MPa)	Média	CV (%)	Energia dissipada inicial (J/m^3)	Média	CV (%)	
1	3,6	400	4913	-	-	336	-	-	4,28E+06
2	5,0	450	4440	-	-	383	-	-	2,80E+06
3	4,8		4630			505			2,99E+05
4	4,7	500	4290	4394	4,7	479	493	2,6	2,38E+05
5	5,0		4262			494			3,97E+05
6	5,0		4207			714			6,73E+04
7	3,4	600	4157	4196	0,8	691	702	1,7	1,18E+05
8	5,0		4224			700			1,18E+05

Tabela B- 2 – Resultados do ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos para a mistura reprodução usina.

Amostra (RUS)	Volume de vazios (%)	Amplitude de deformação ($\mu\epsilon$)	Rigidez na flexão inicial			Energia dissipada inicial			Número de ciclos (Nf)
			Rigidez na flexão inicial (MPa)	Média	CV (%)	Energia dissipada inicial (J/m^3)	Média	CV (%)	
1	5,0		4759			170			4,21E+06
2	5,0	300	5006	4883	3,6	180	175	4,0	2,78E+06
3	5,0		5171			344			9,37E+05
4	5,0	400	5352	5262	2,4	356	350	2,4	9,09E+05
5	4,7		5215			447			2,34E+05
6	5,0	450	5354	5285	1,9	451	449	0,6	3,52E+05
7	5,0		5140			573			3,15E+05
8	5,0	500	5471	5306	4,4	602	588	3,5	4,03E+05

Tabela B- 3 – Resultados do ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos para a mistura extraído trecho 1.

Amostra (EX1)	Volume de vazios (%)	Amplitude de deformação ($\mu\epsilon$)	Rigidez na flexão inicial			Energia dissipada inicial			Número de ciclos (Nf)
			Rigidez na flexão inicial (MPa)	Média	CV (%)	Energia dissipada inicial (J/m^3)	Média	CV (%)	
1	4,2	400	5403	5652	6,1	397	393	5,3	1,78E+05
2	4,1		5507			371			2,96E+05
3	4,2		6047			412			3,38E+05
4	4,3		5546			613			1,00E+05
5	4,3	500	5552	5592	1,3	605	615	1,9	1,08E+05
6	4,3		5677			628			1,05E+05
7	4,1		5519			871			4,34E+04
8	4,1	600	5542	5560	0,9	901	895	2,4	5,14E+04
9	4,1		5618			912			5,51E+04

Tabela B- 4 – Resultados do ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos para a mistura extraído trecho 2.

Amostra (EX2)	Volume de vazios (%)	Amplitude de deformação ($\mu\epsilon$)	Rigidez na flexão inicial			Energia dissipada inicial			Número de ciclos (Nf)
			Rigidez na flexão inicial (MPa)	Média	CV (%)	Energia dissipada inicial (J/m^3)	Média	CV (%)	
1	4,0	300	8181	8419	4,0	254	258	3,8	9,77E+05
2	4,0		8100			246			5,31E+05
3	4,0		8594			263			1,12E+06
4	3,7		8799			268			4,20E+05
5	4,4	400	8765	-	-	547	-	-	1,84E+05
6	4,4		7499	685	4,69E+04				
7	4,4	500	7366	7327	2,7	694	692	0,8	1,06E+05
8	4,6		7115			696			7,96E+04
9	3,8	600	7364	-	-	1030	-	-	1,79E+04

APÊNDICE C

AJUSTE DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DANO

Figura C- 1 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura usinada na temperatura de 20°C.

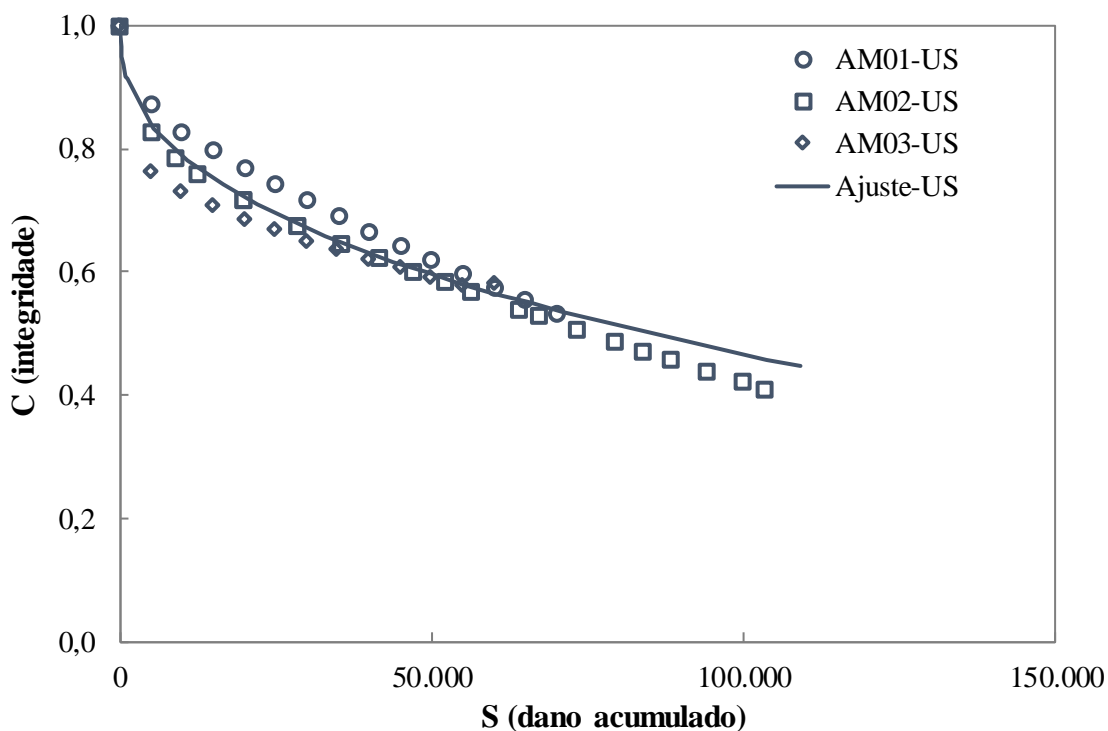


Figura C- 2 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura reprodução usina na temperatura de 20°C.

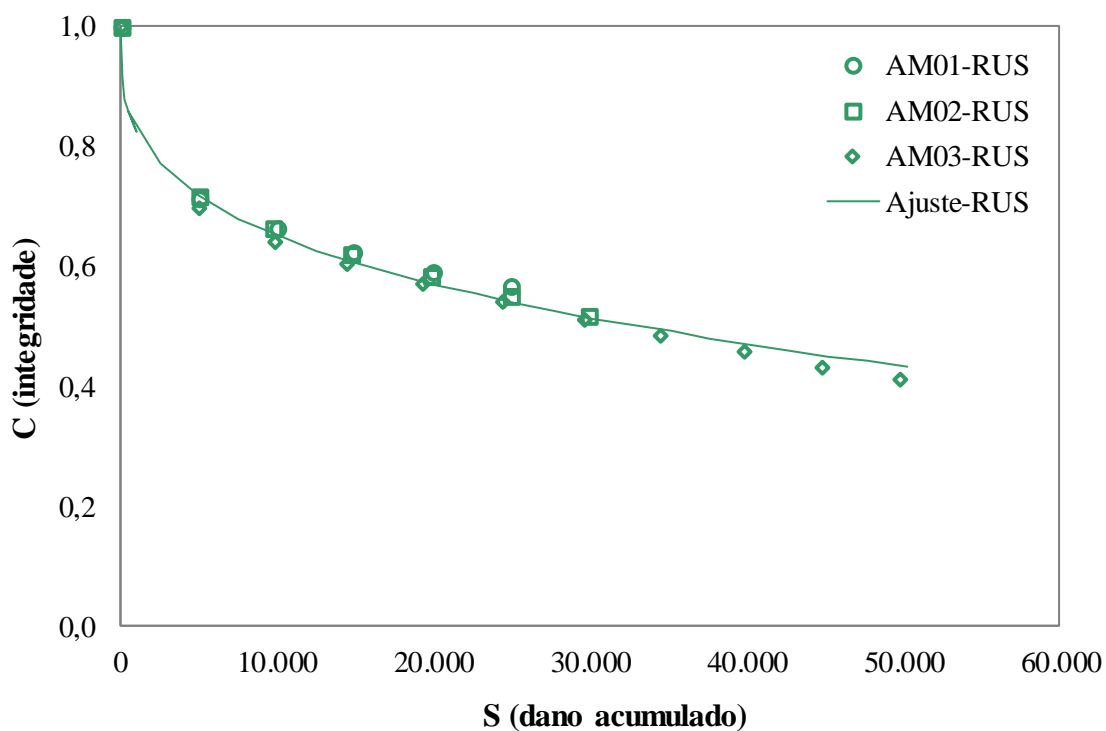


Figura C- 3 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura extraído trecho 1 na temperatura de 20°C.

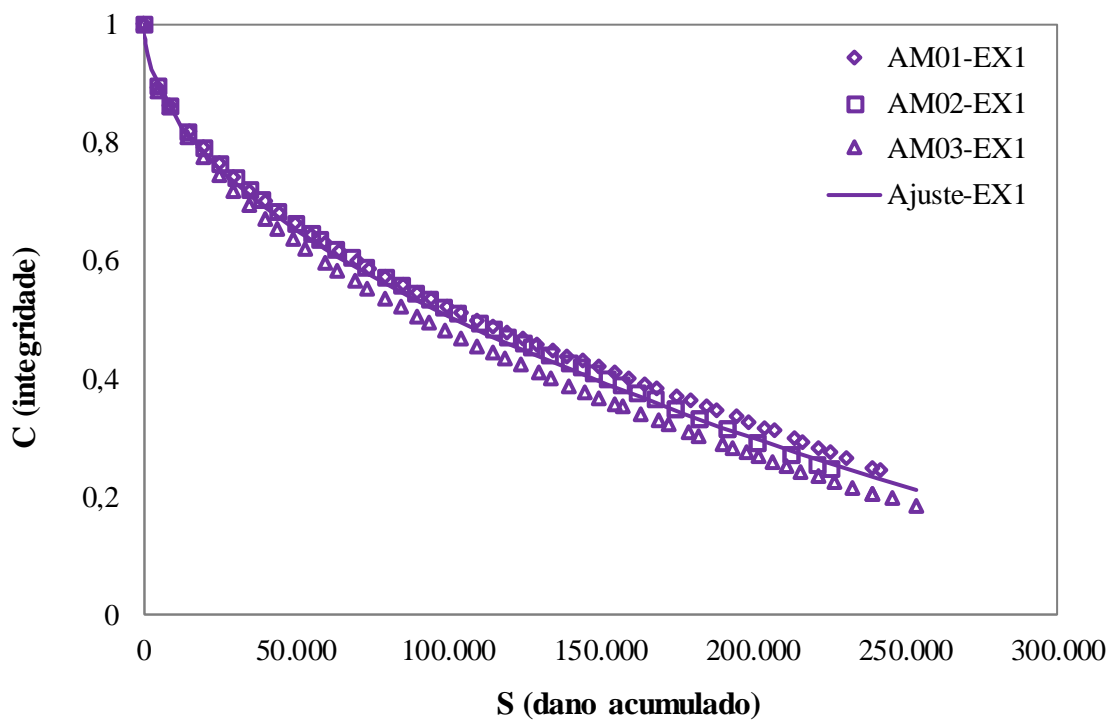
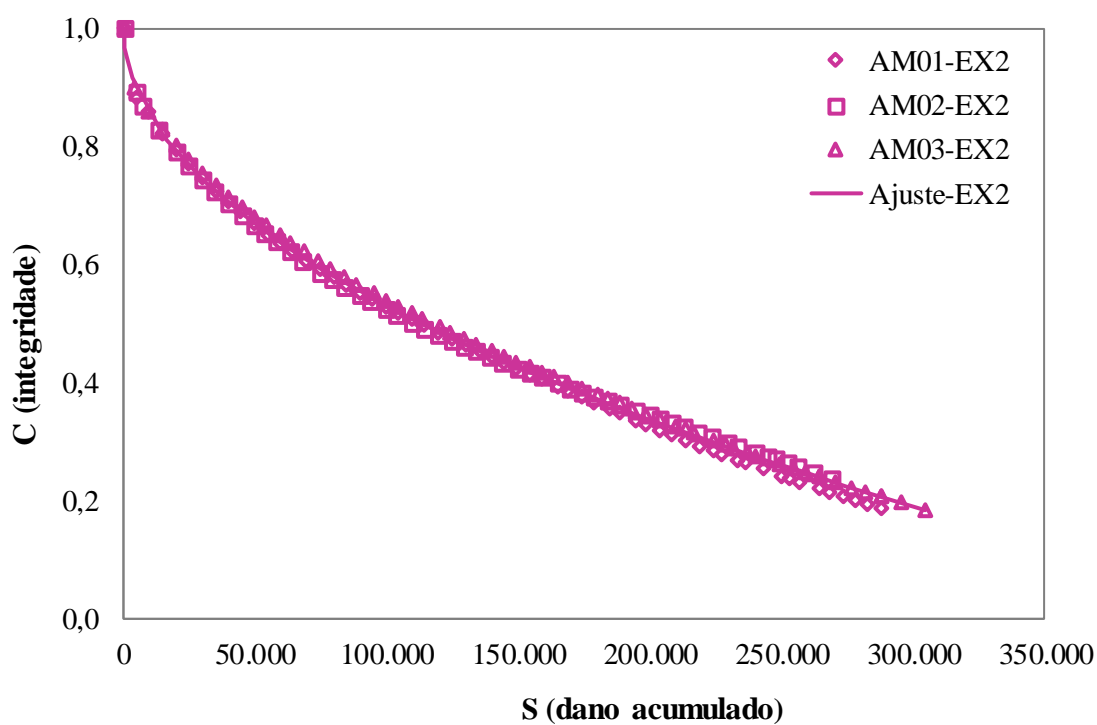


Figura C- 4 – Função potência ajustada para as três amostras ensaiadas da mistura extraído trecho 2 na temperatura de 20°C.



APÊNDICE D

GRÁFICOS DO TIPO *CONTOUR* UTILIZANDO O CRITÉRIO DE RUPTURA G^R E D^R

Figura D- 1 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

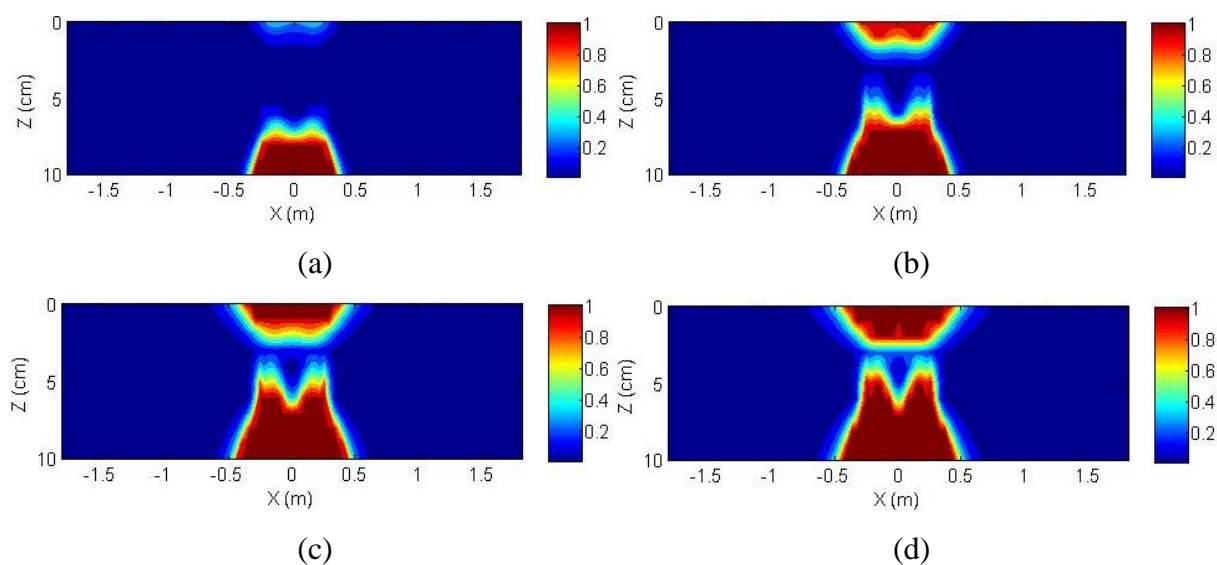


Figura D- 2 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

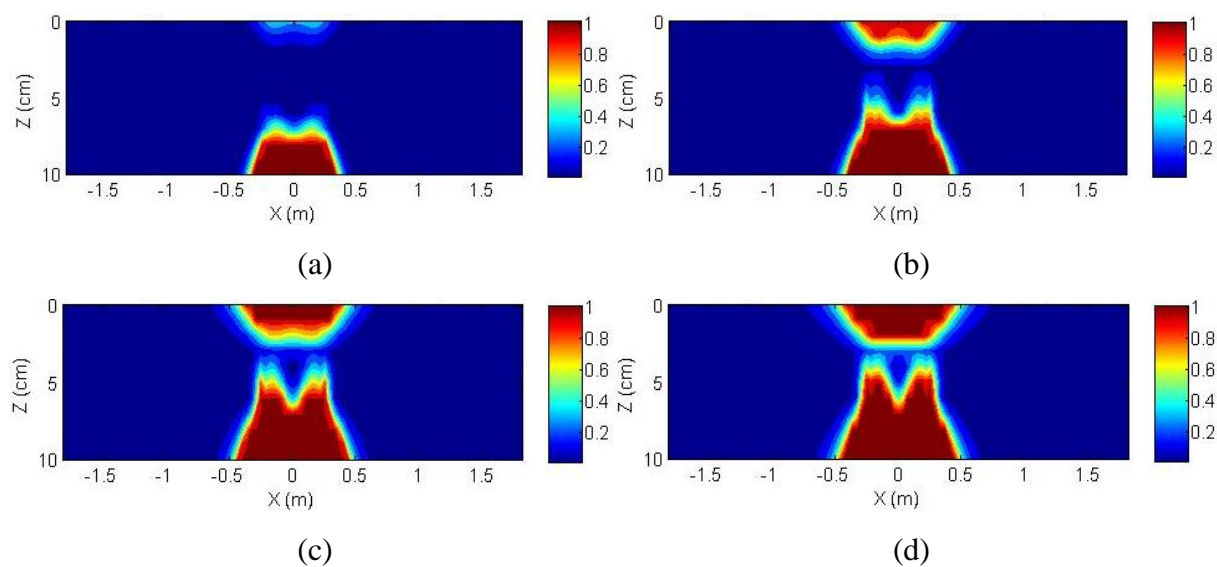


Figura D- 3 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

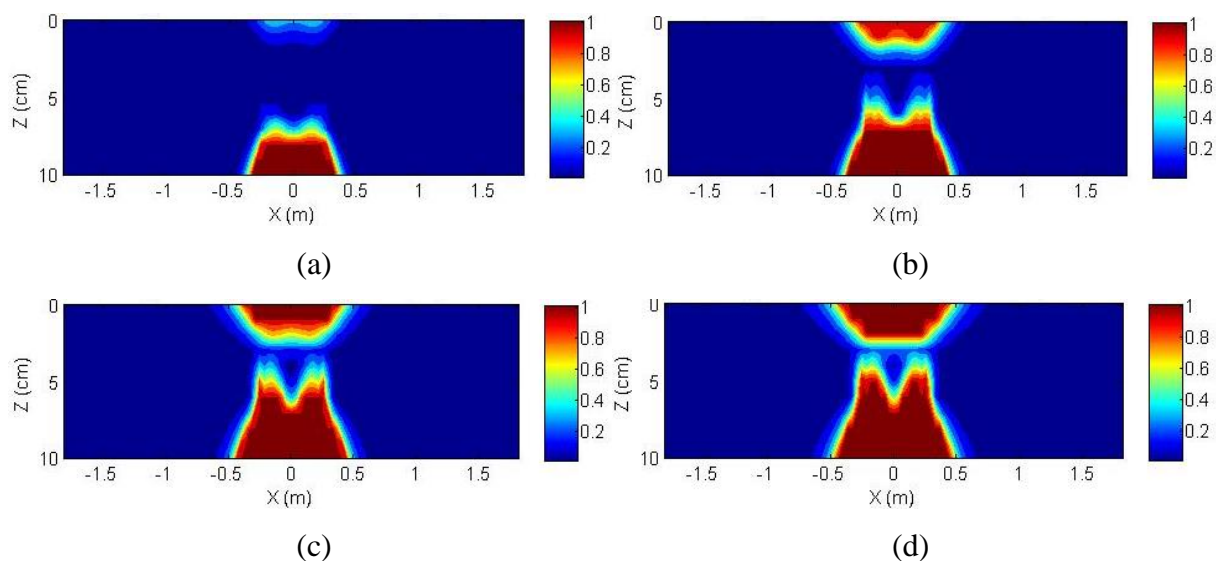


Figura D- 4 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

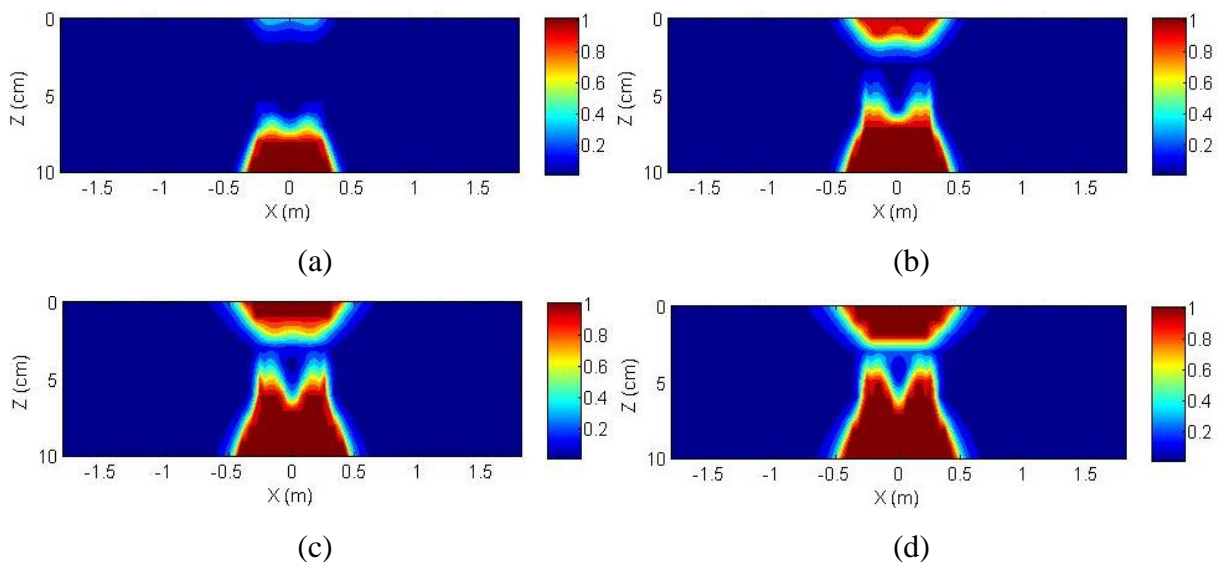


Figura D- 5 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

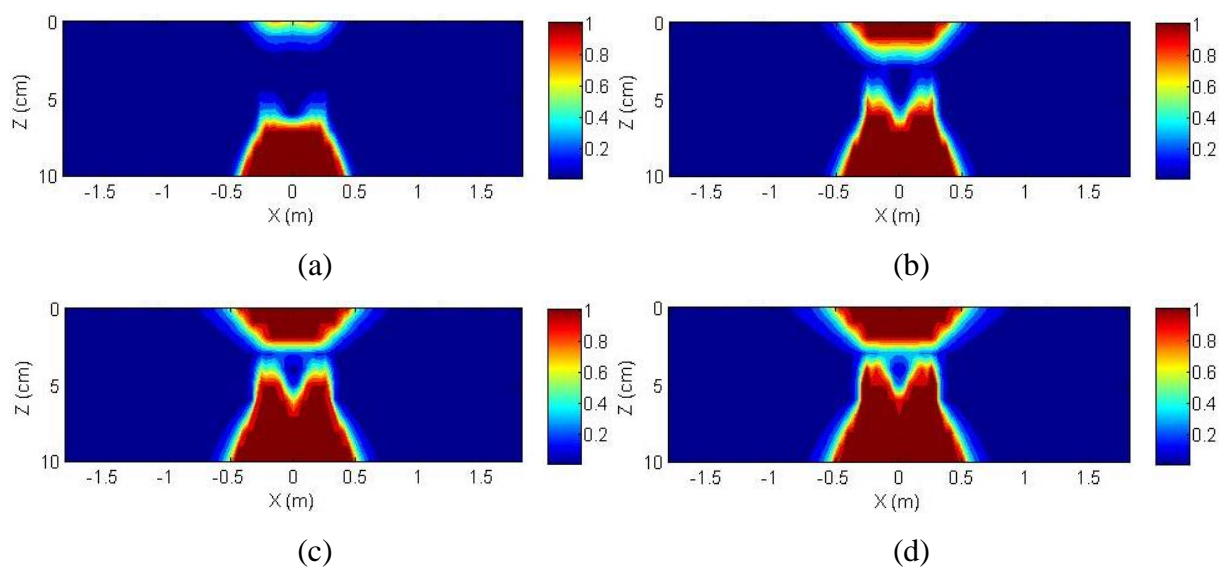


Figura D- 6 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

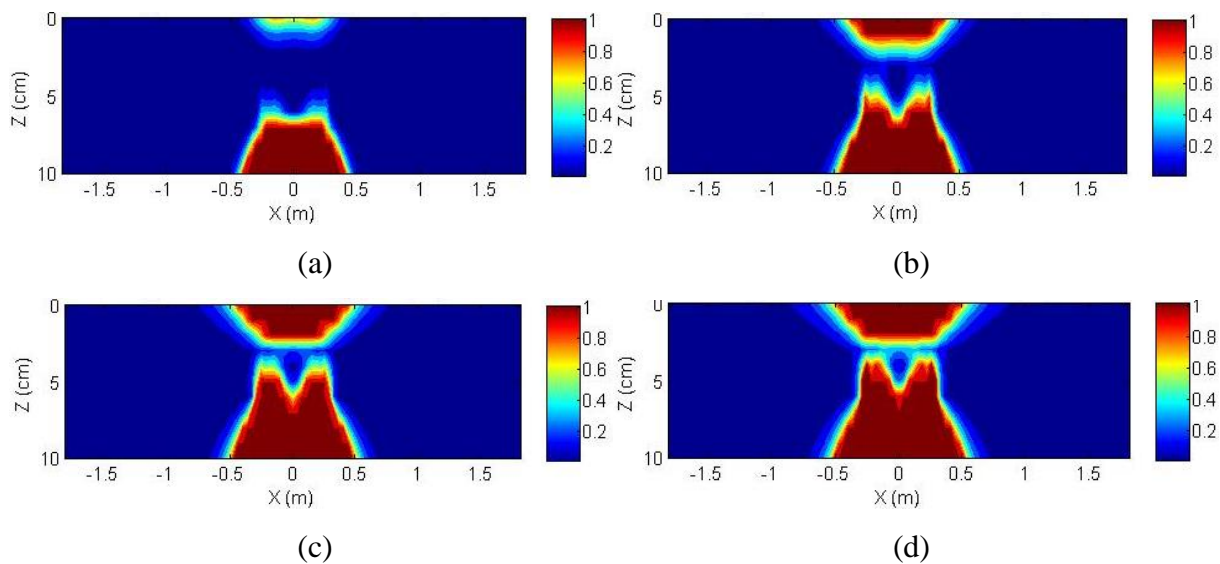


Figura D- 7 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

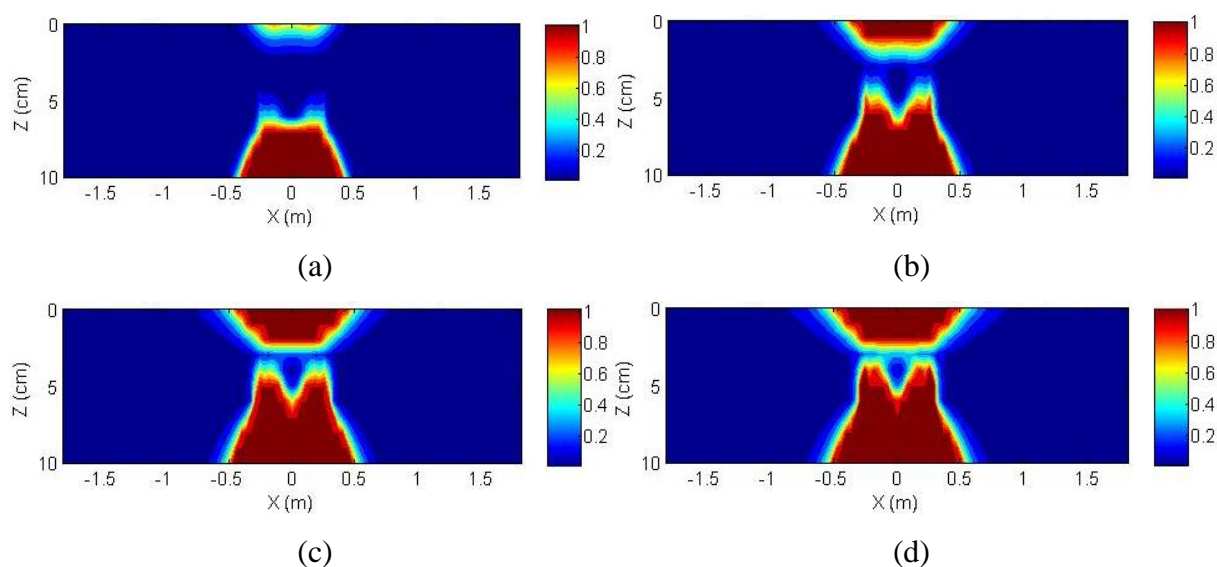


Figura D- 8 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

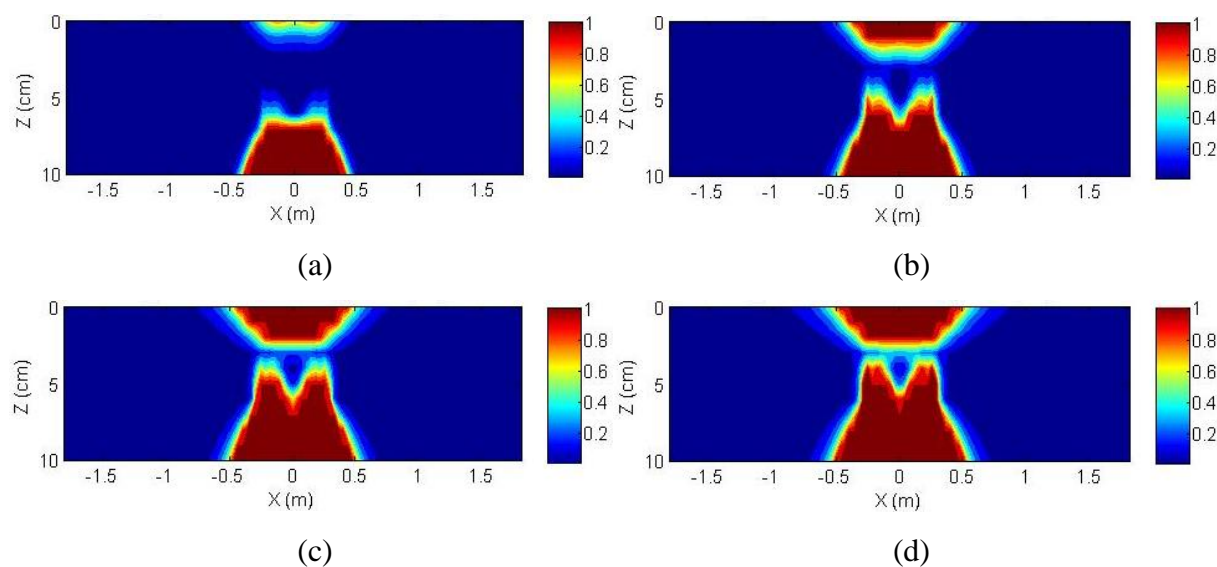


Figura D- 9 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

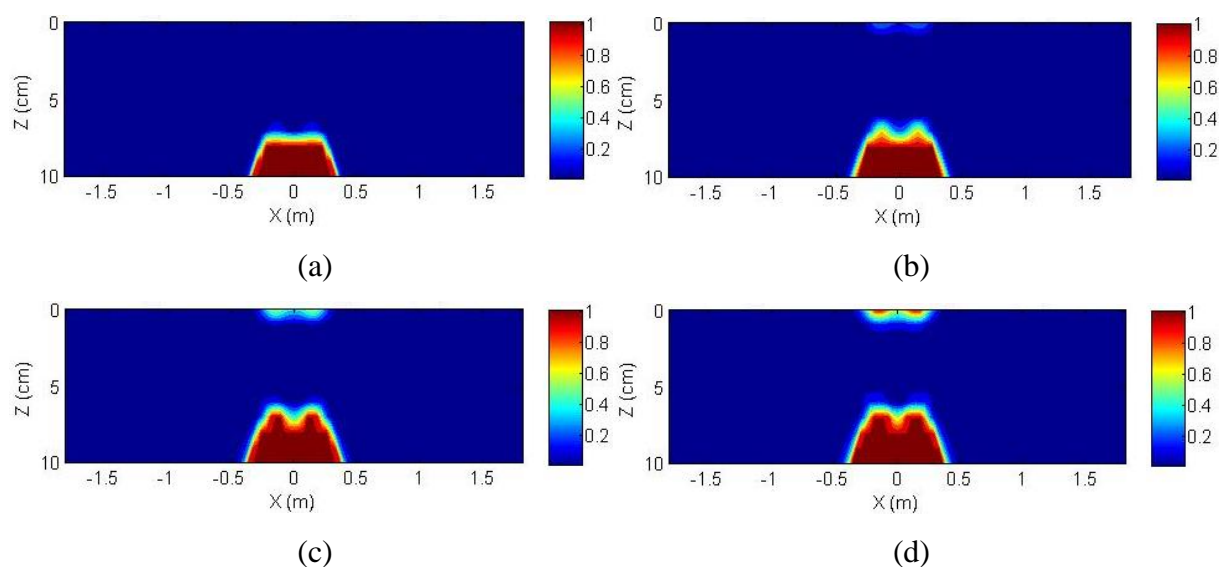


Figura D- 10 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

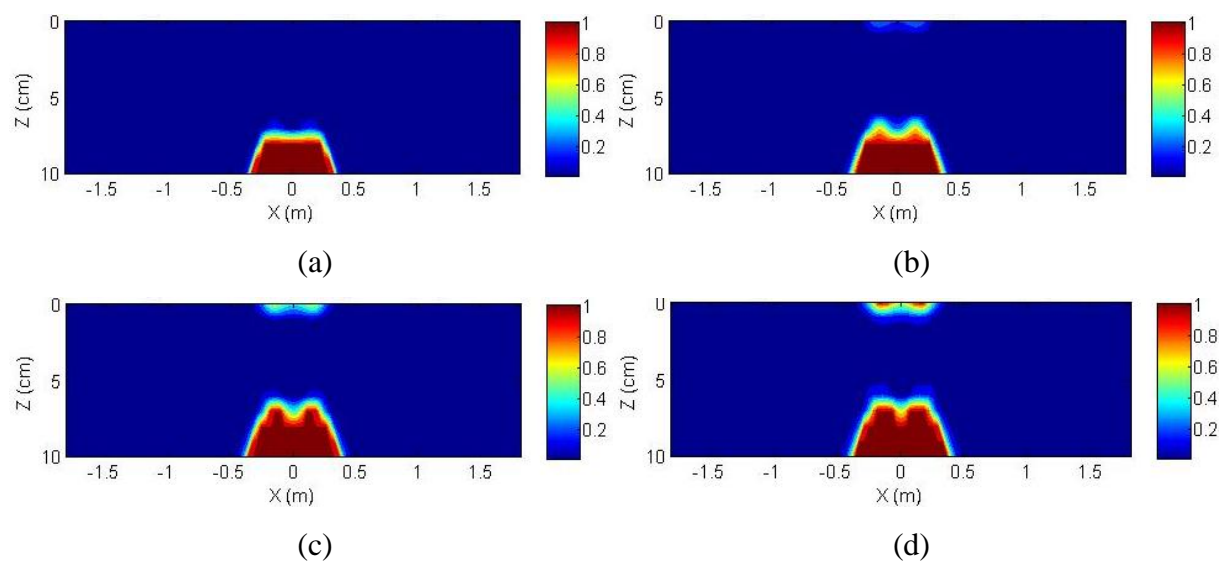


Figura D- 11 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

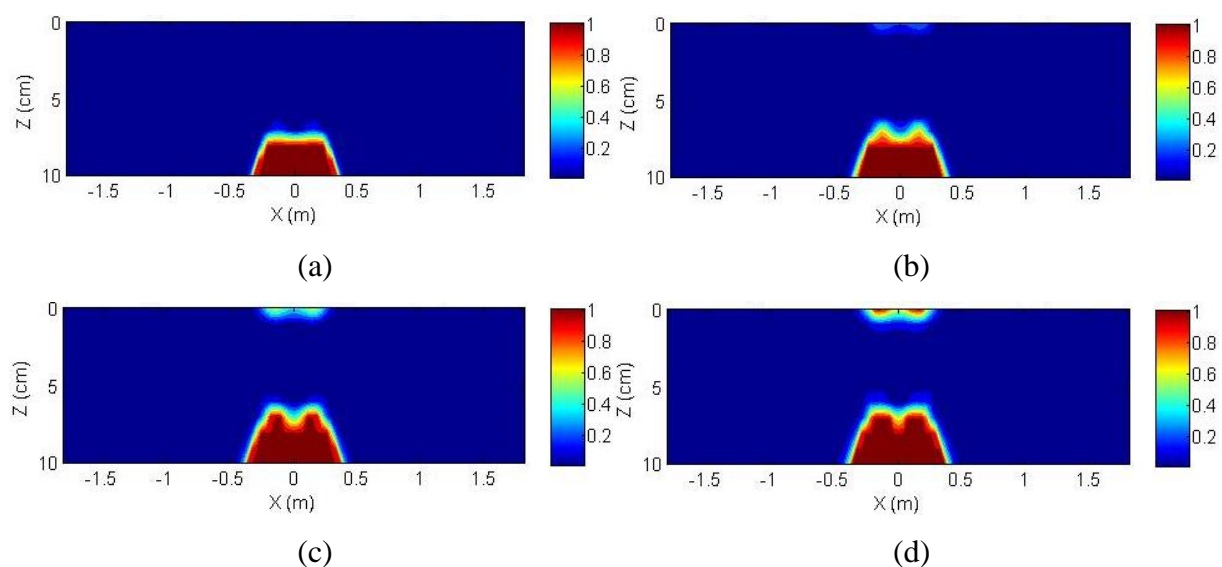


Figura D- 12 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

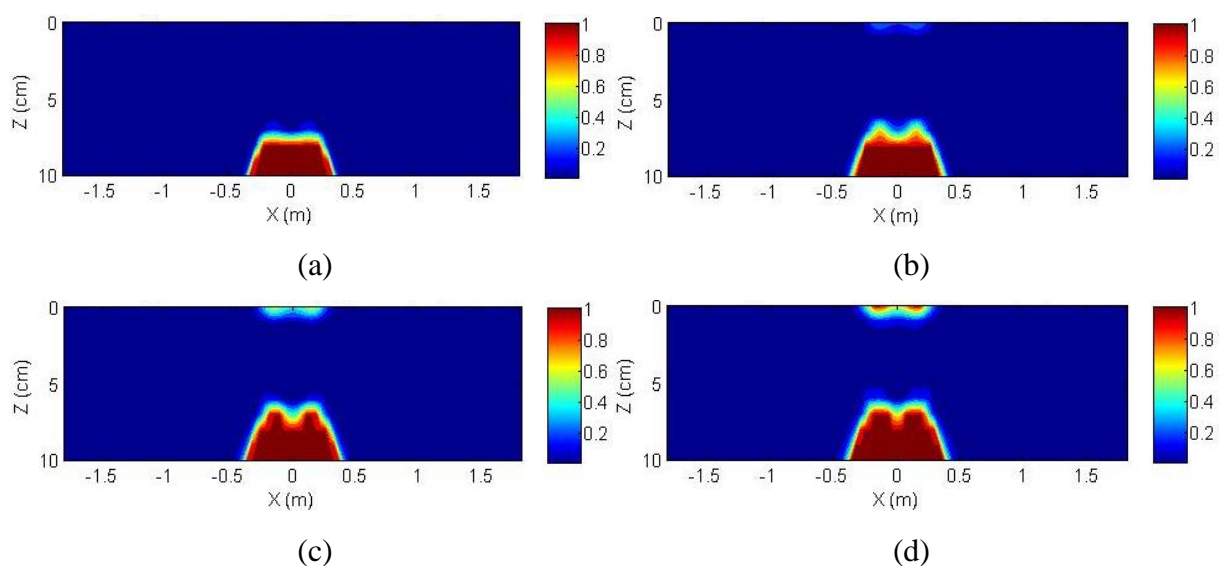


Figura D- 13 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

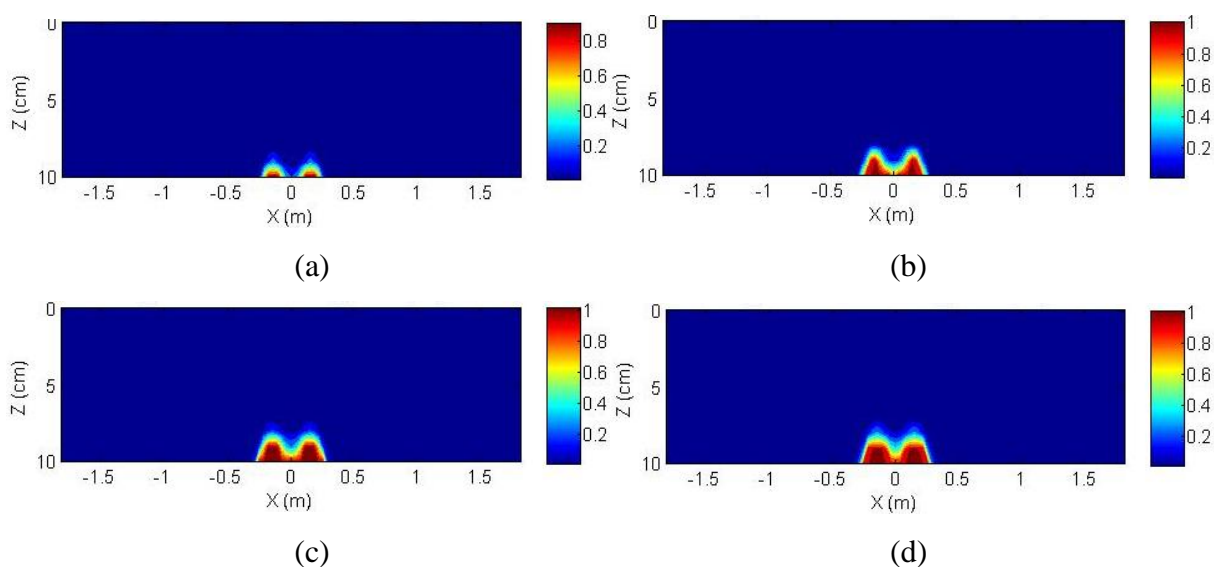


Figura D- 14 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

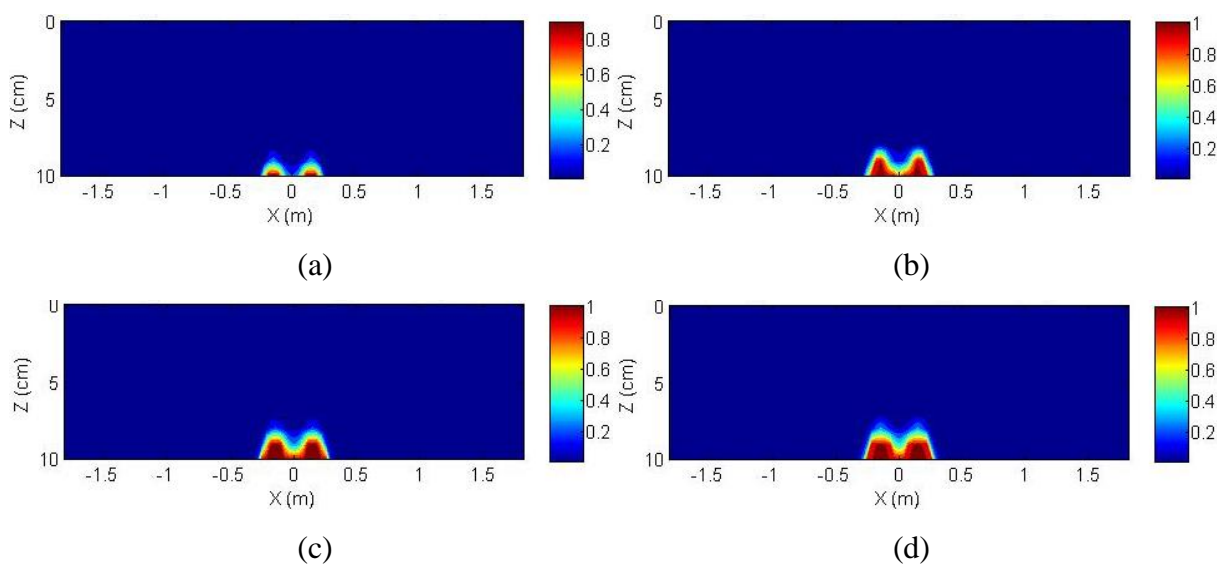


Figura D- 15 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

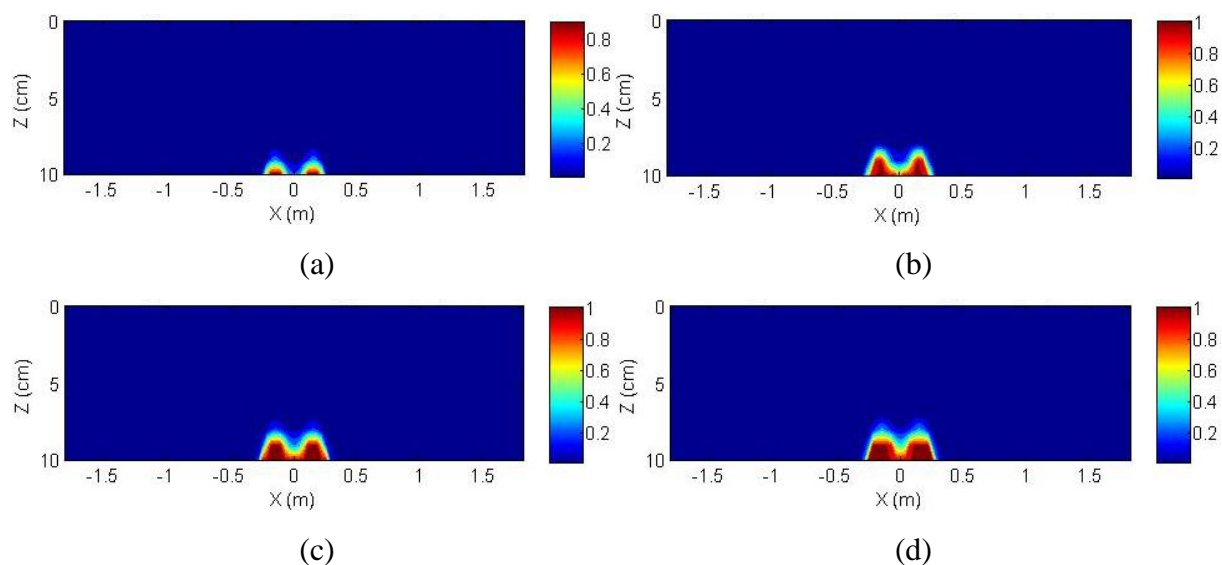


Figura D- 16 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

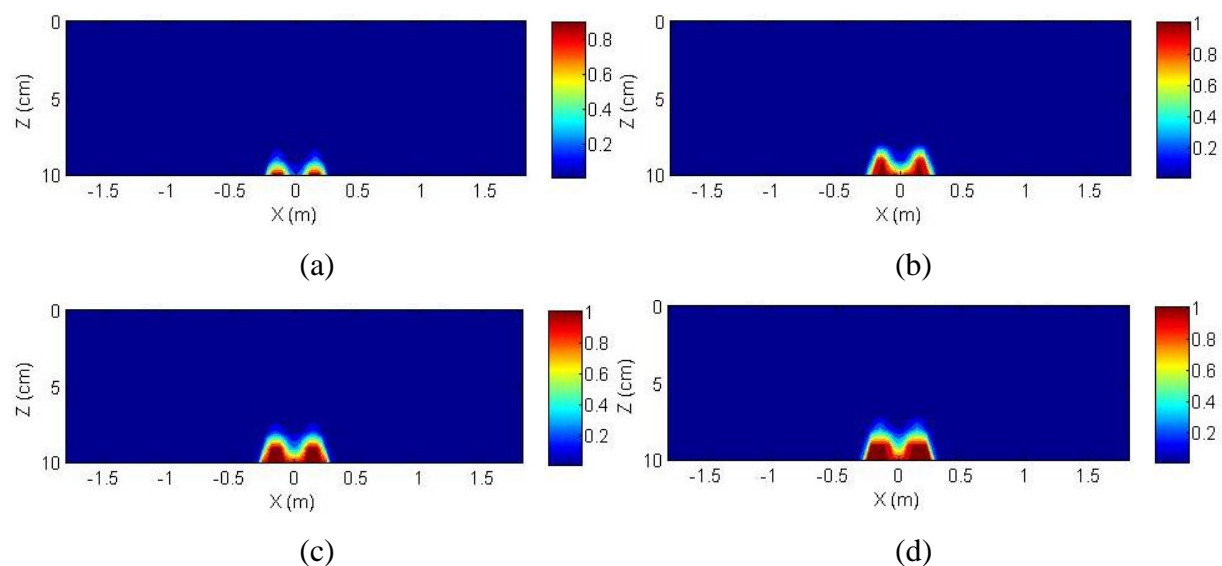


Figura D- 17 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

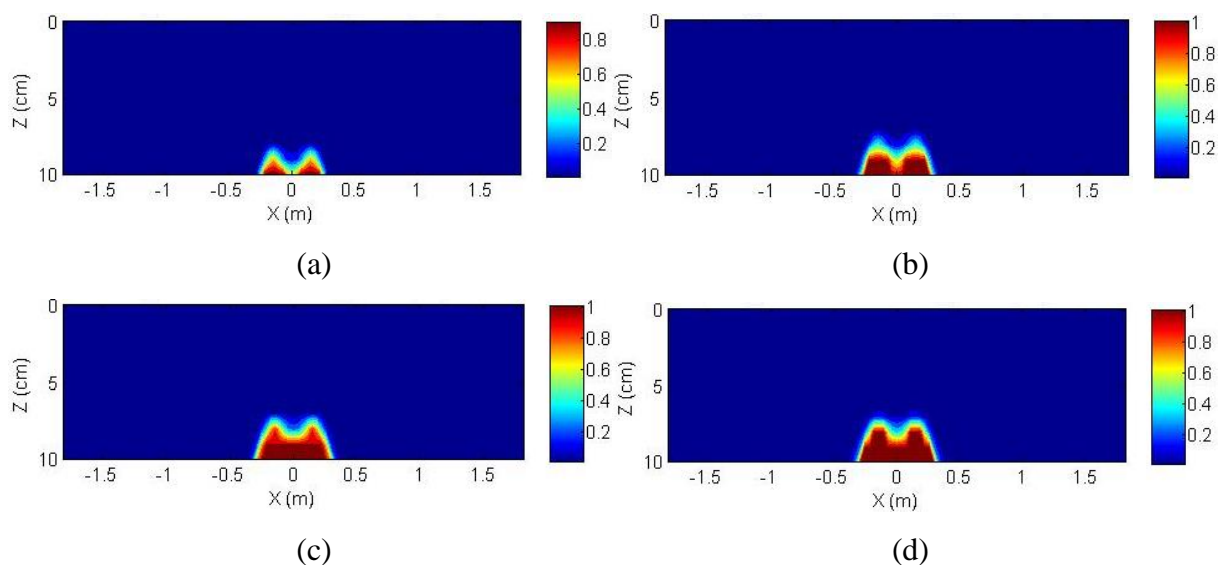


Figura D- 18 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

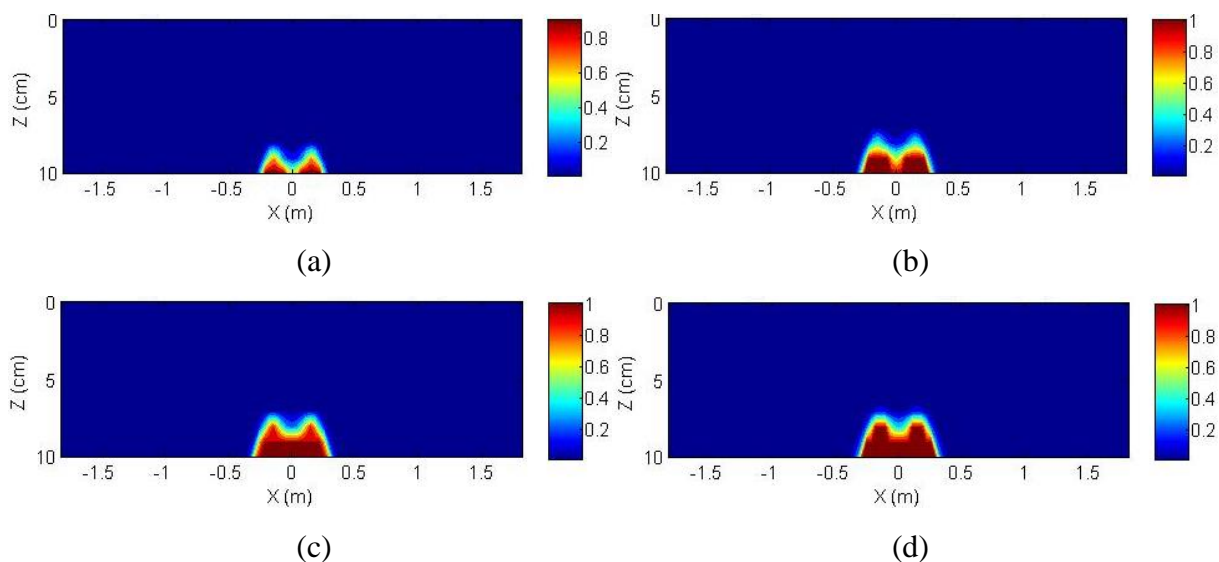


Figura D- 19 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

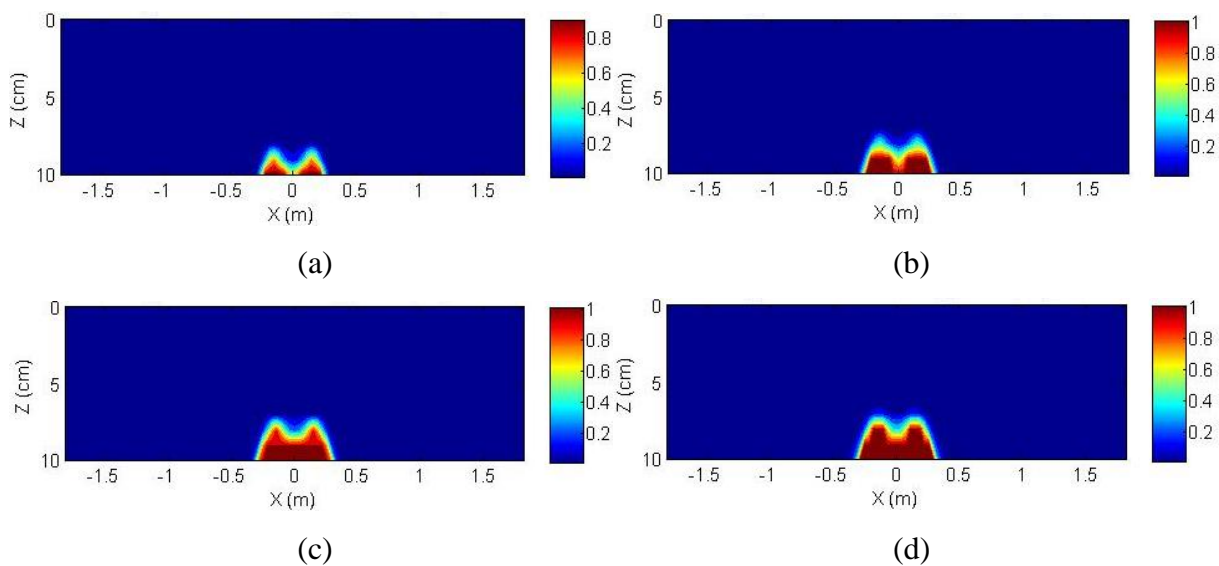


Figura D- 20 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do G^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

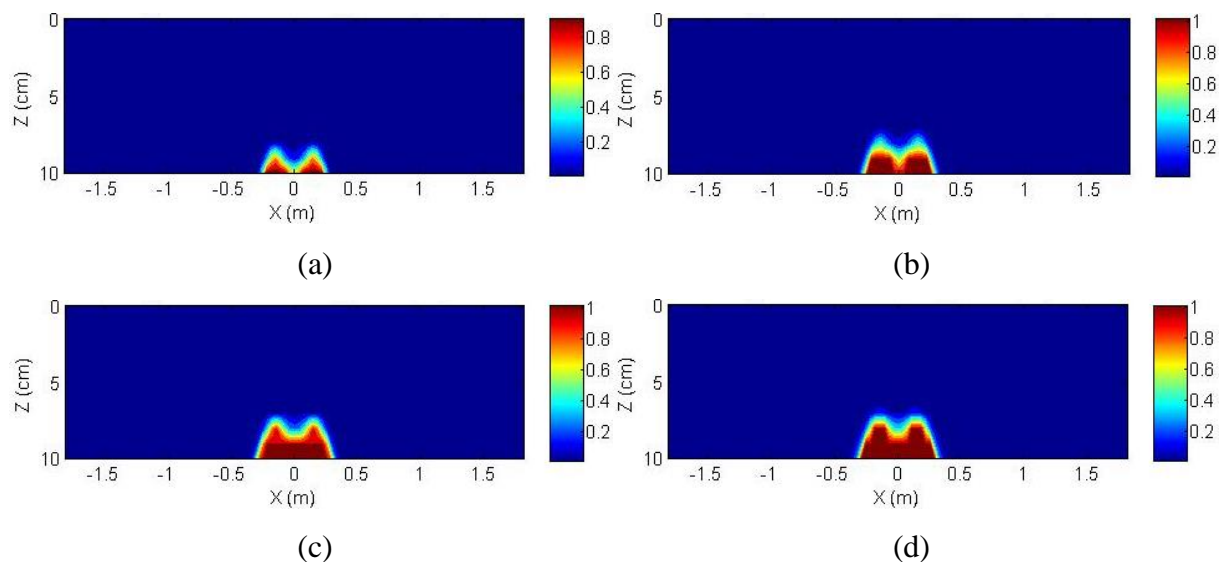


Figura D- 21 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

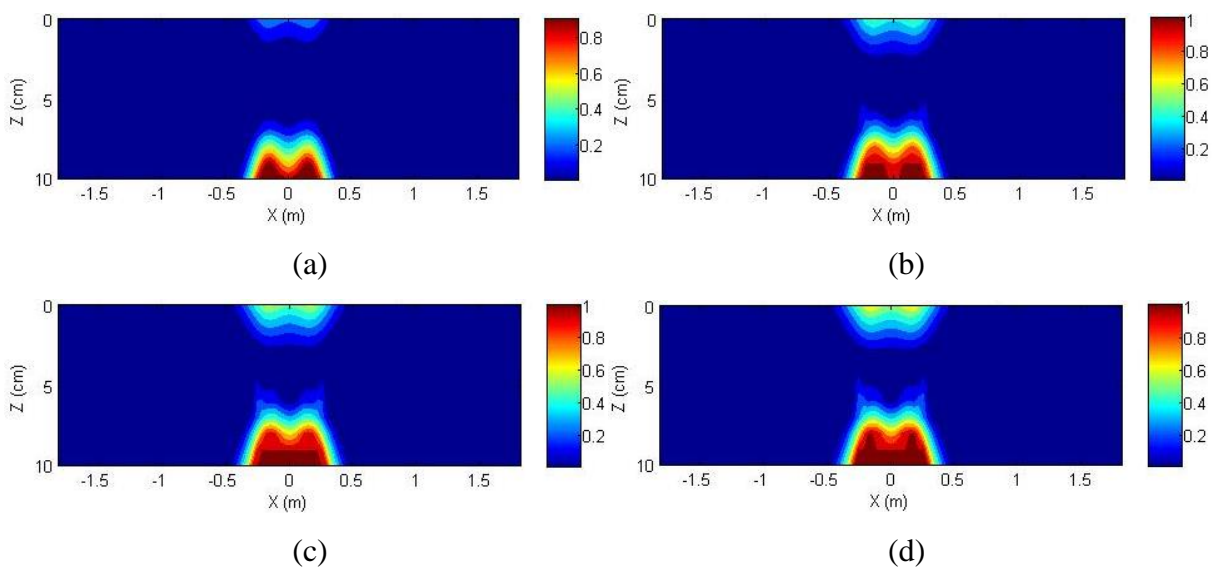


Figura D- 22 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

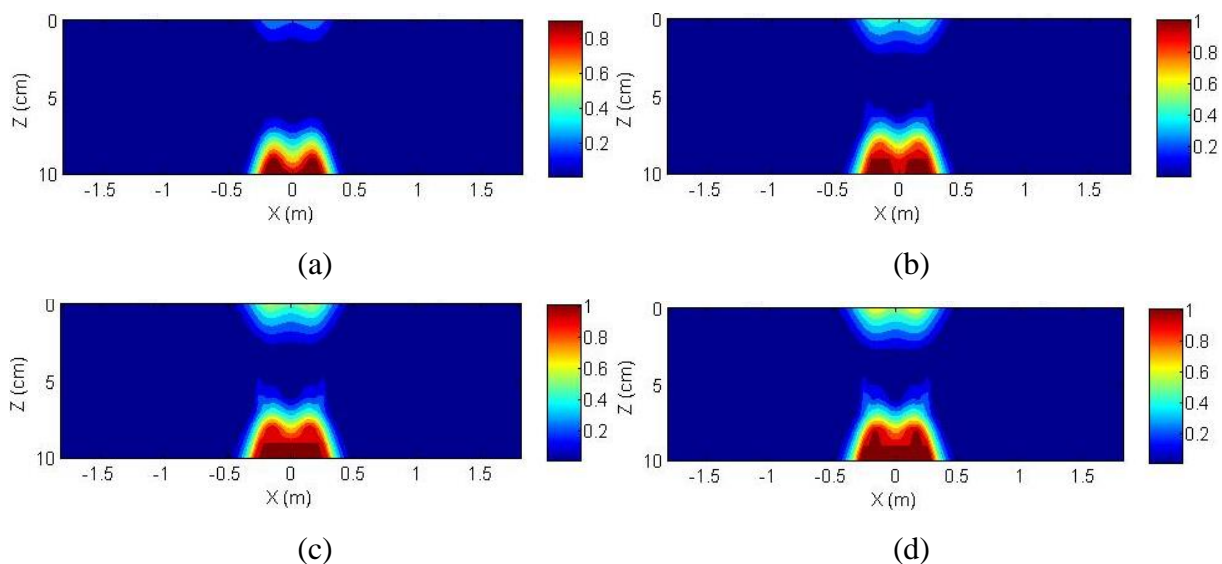


Figura D- 23 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

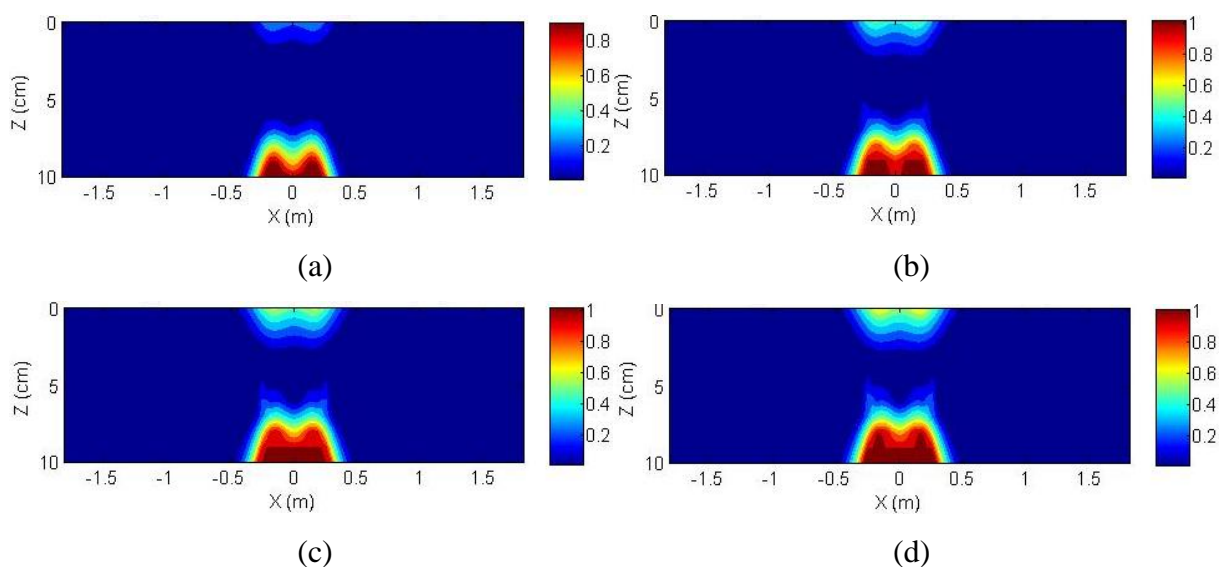


Figura D- 24 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Projetada (PRO), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

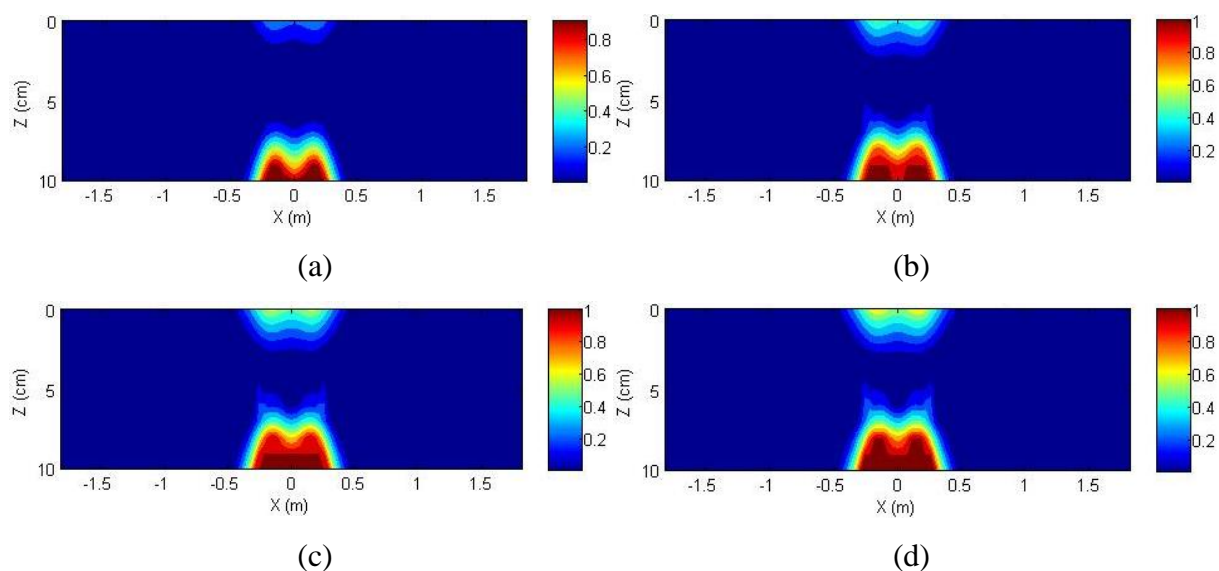


Figura D- 25 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

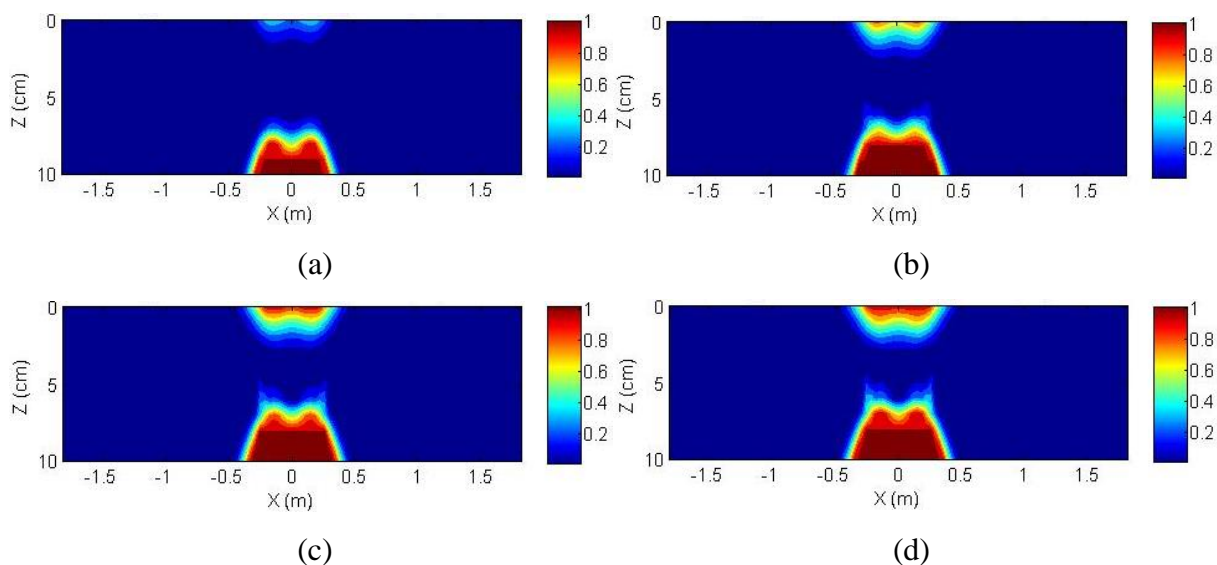


Figura D- 26 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

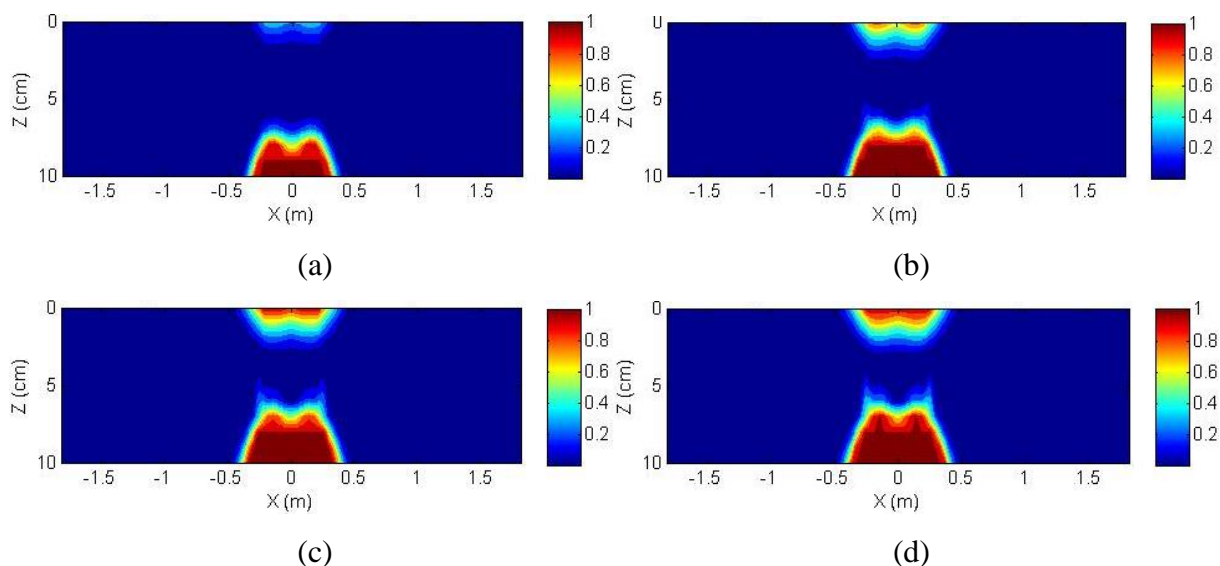


Figura D- 27 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

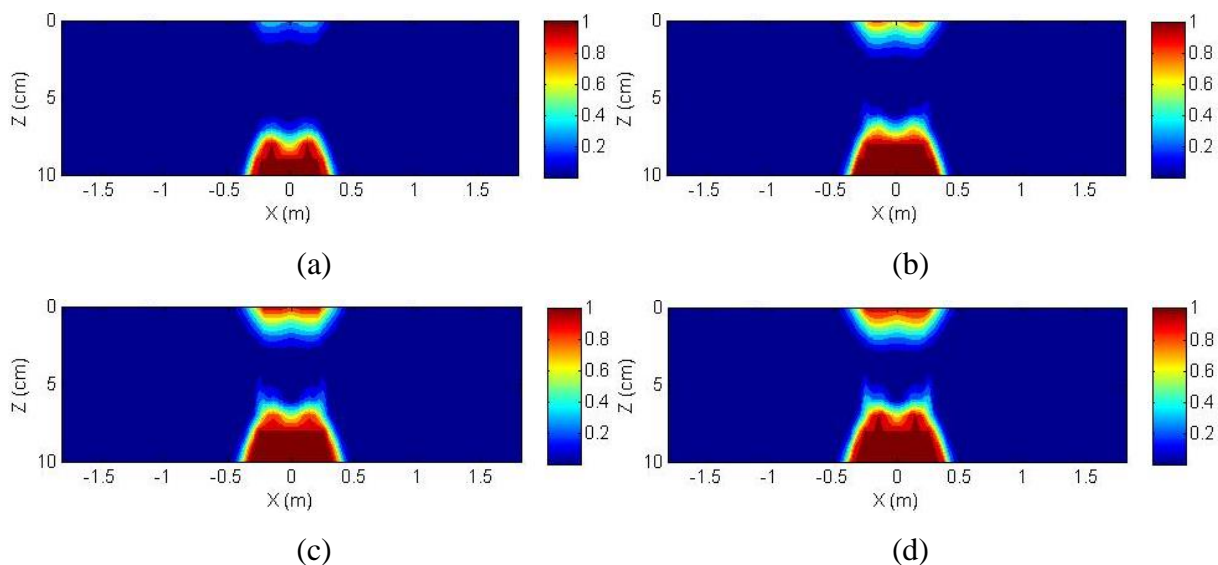


Figura D- 28 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Usinada (US), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

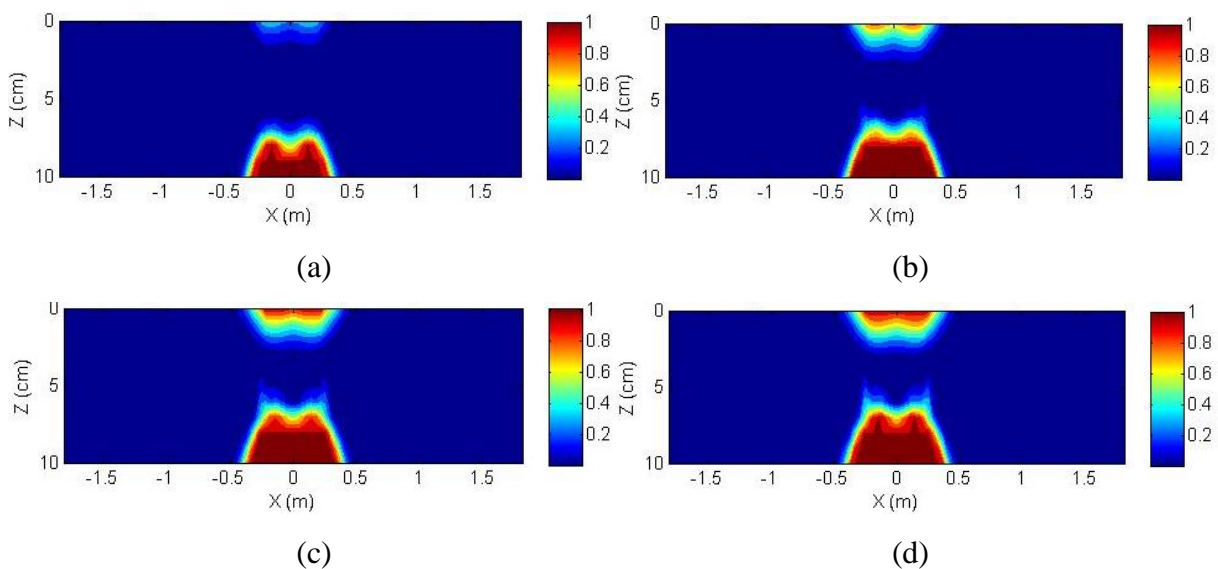


Figura D- 29 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

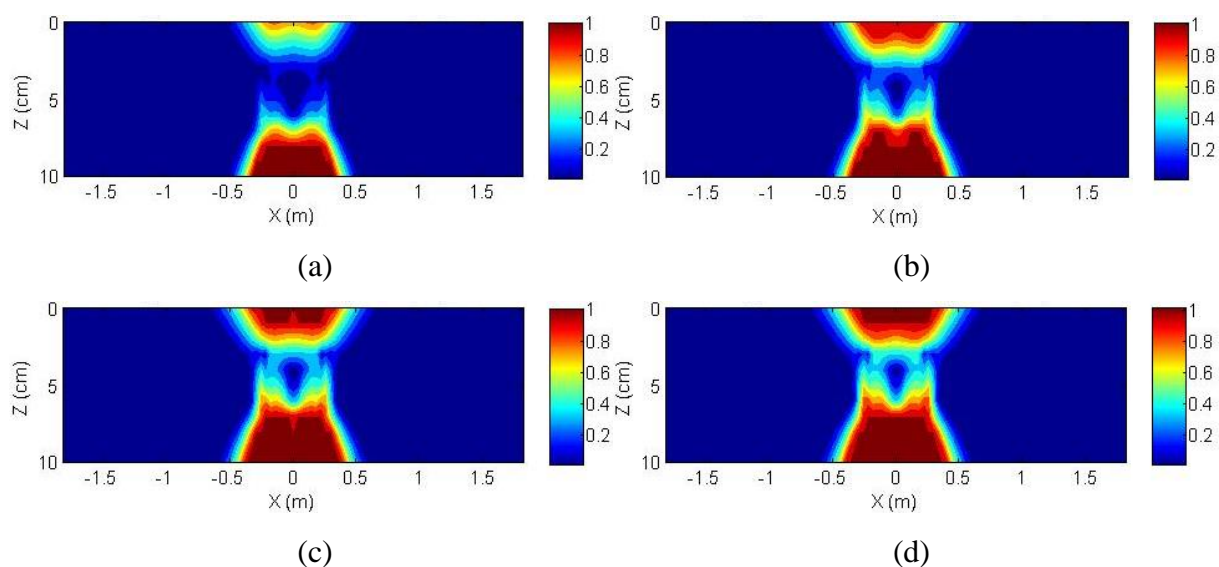


Figura D- 30 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

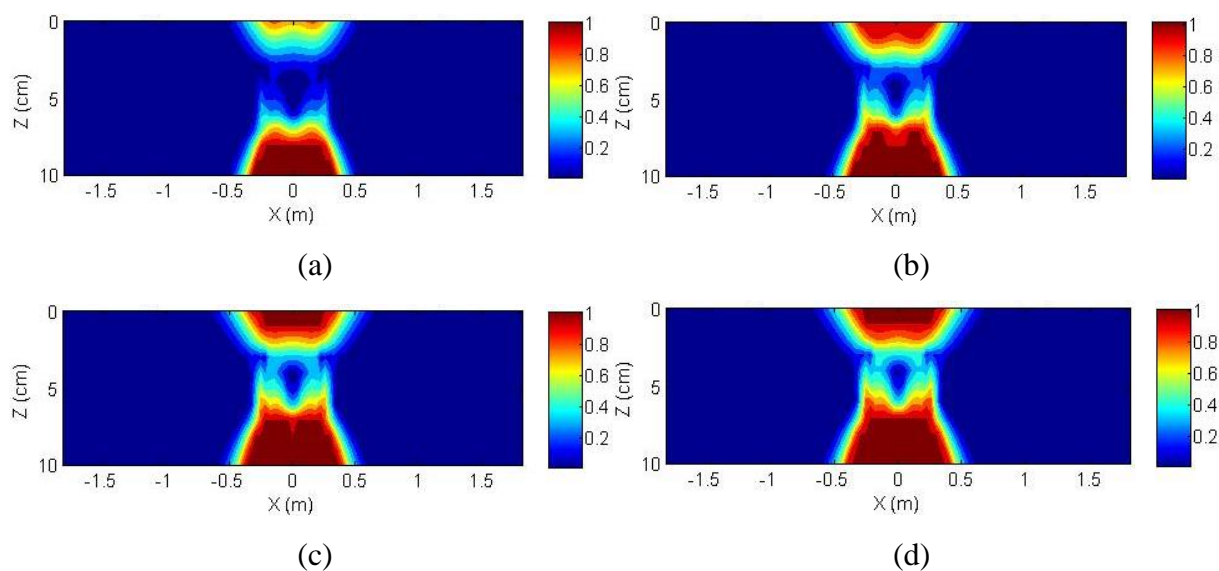


Figura D- 31 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

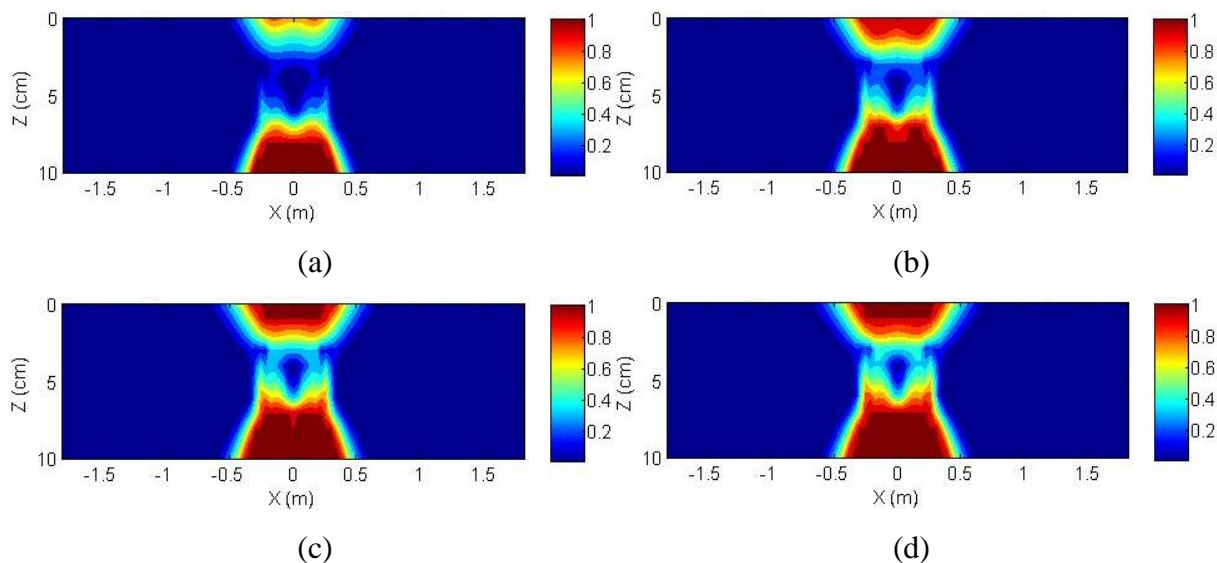


Figura D- 32 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Reprodução usina (RUS), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

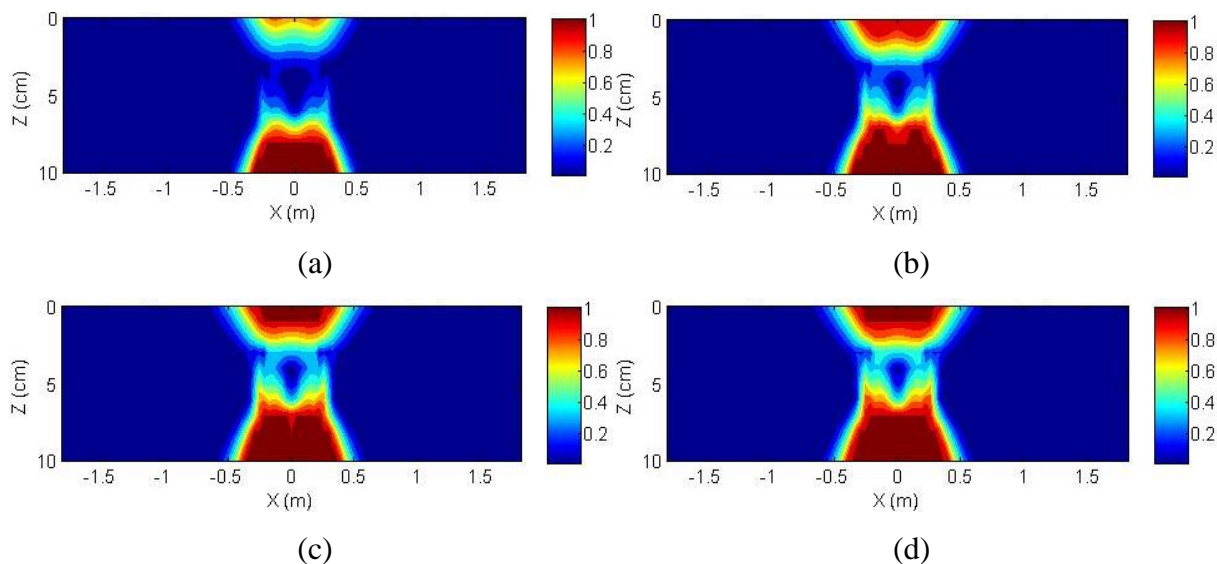


Figura D- 33 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

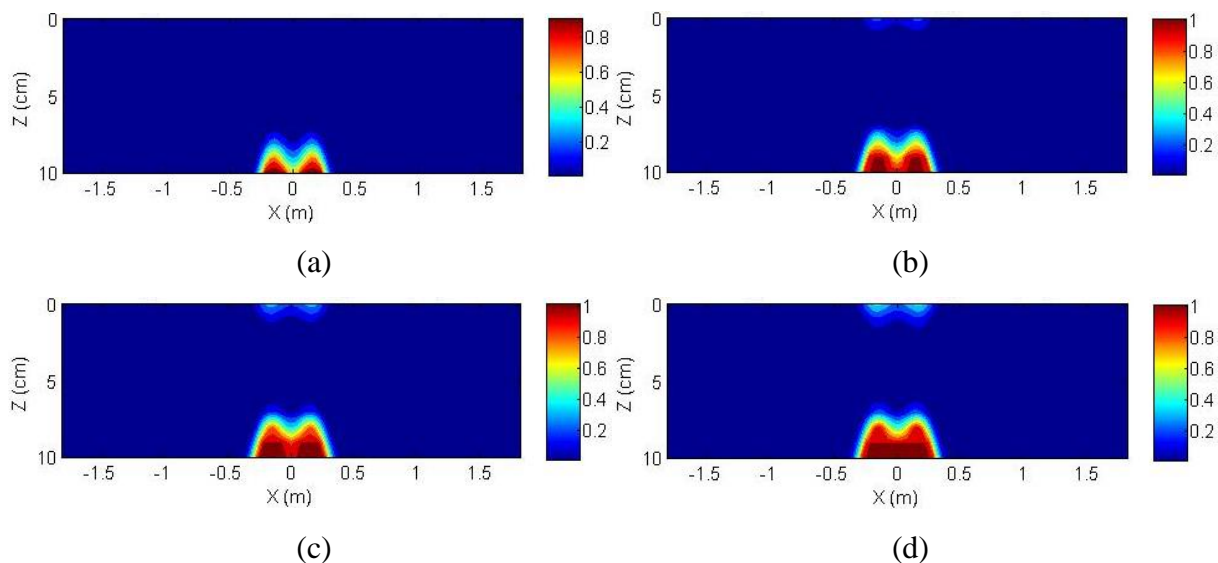


Figura D- 34 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

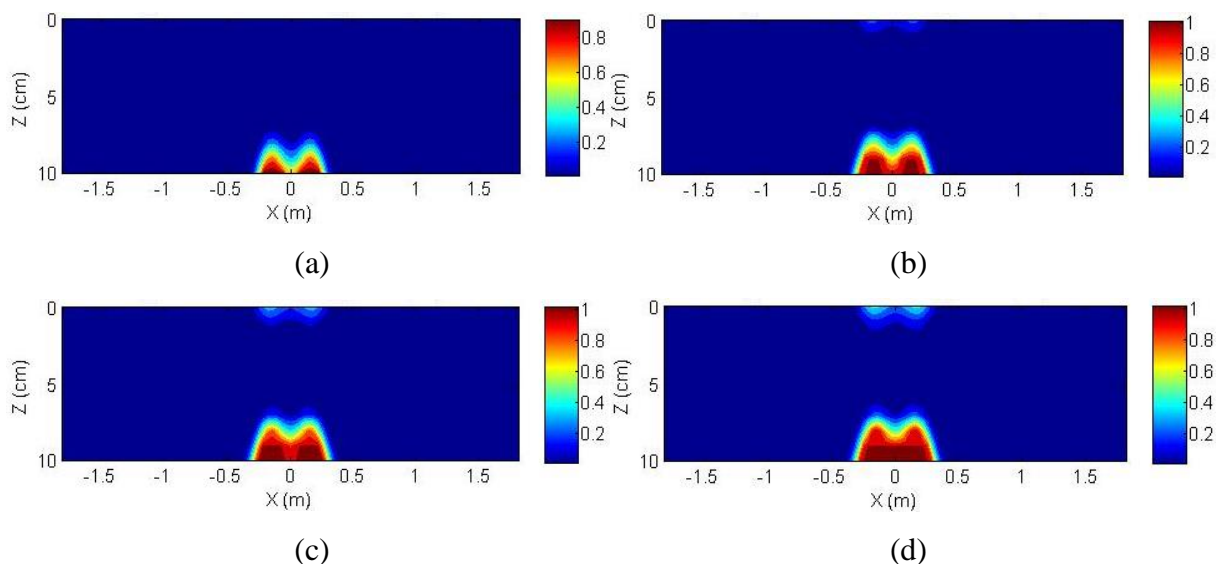


Figura D- 35 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

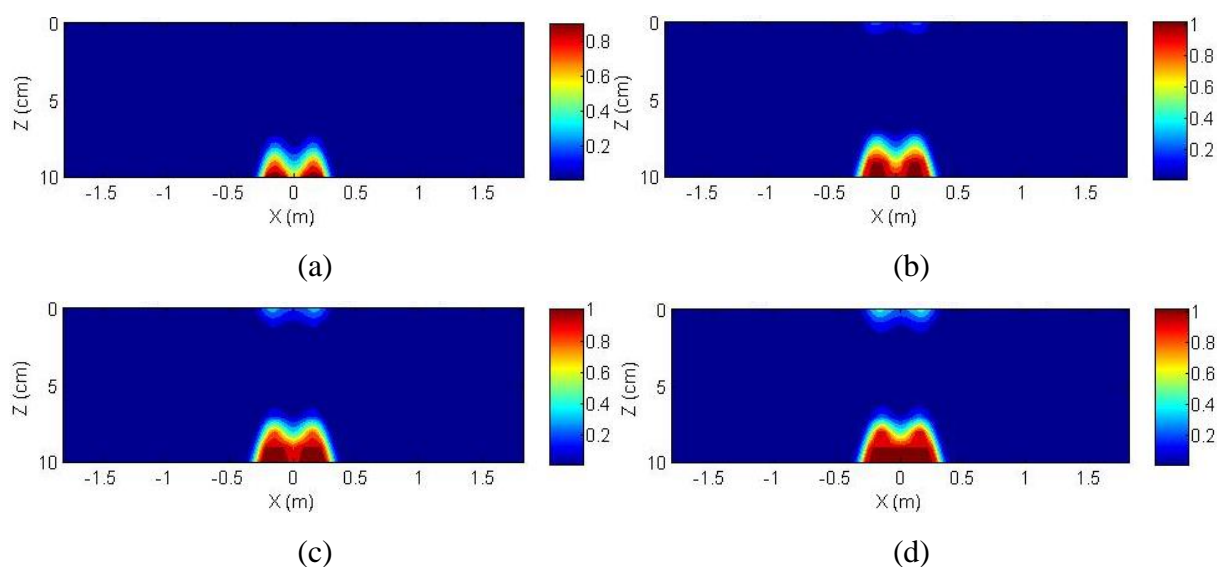


Figura D- 36 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 1 (EX1), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

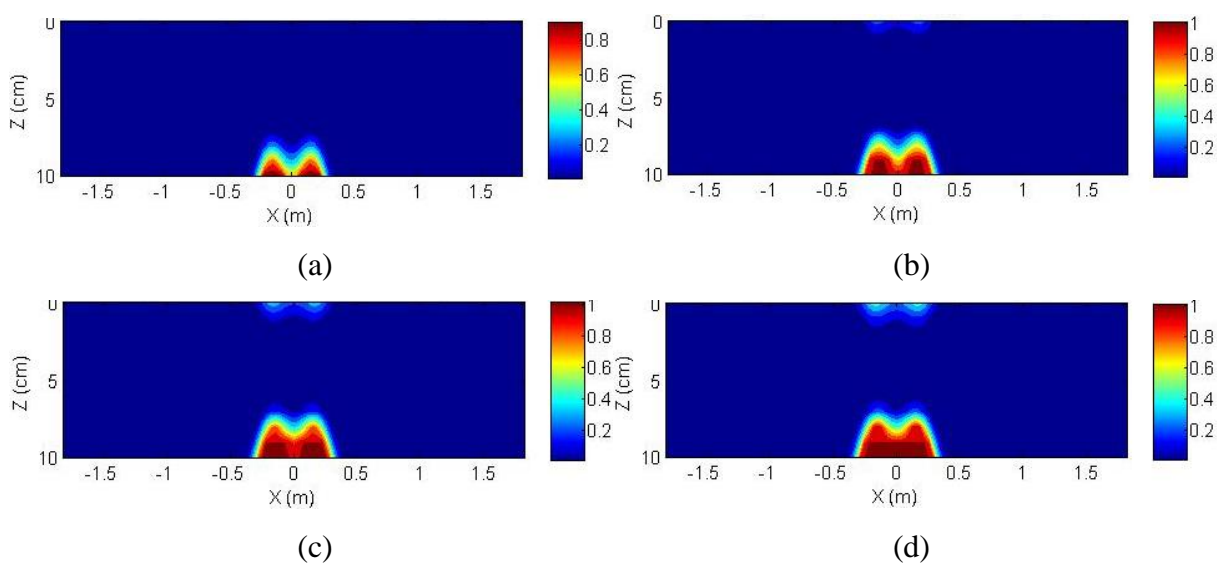


Figura D- 37 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

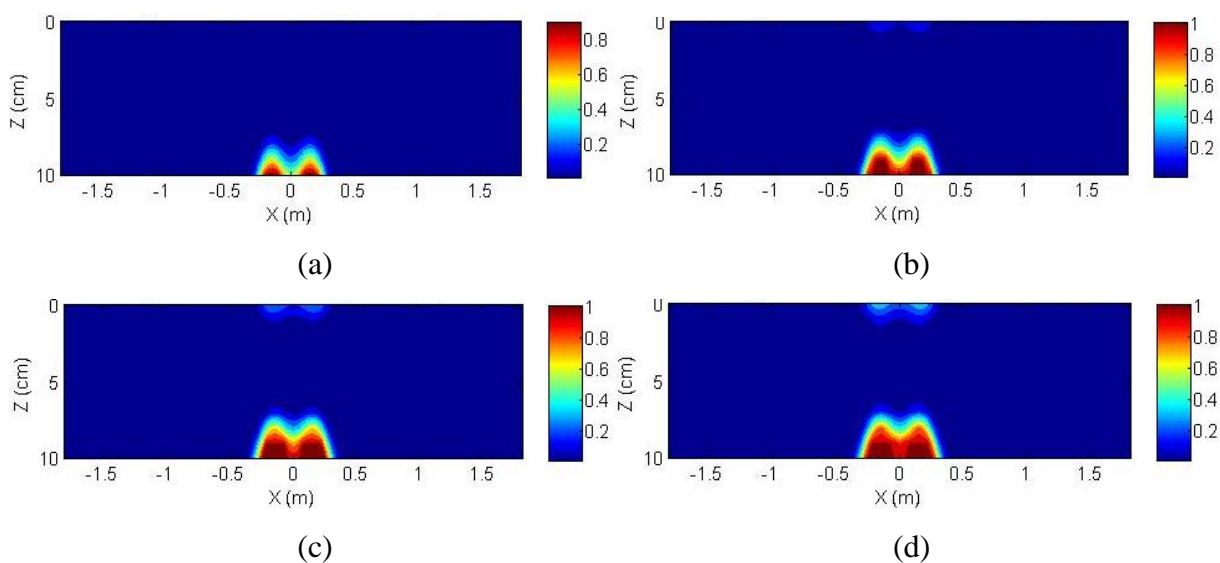


Figura D- 38 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+7,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

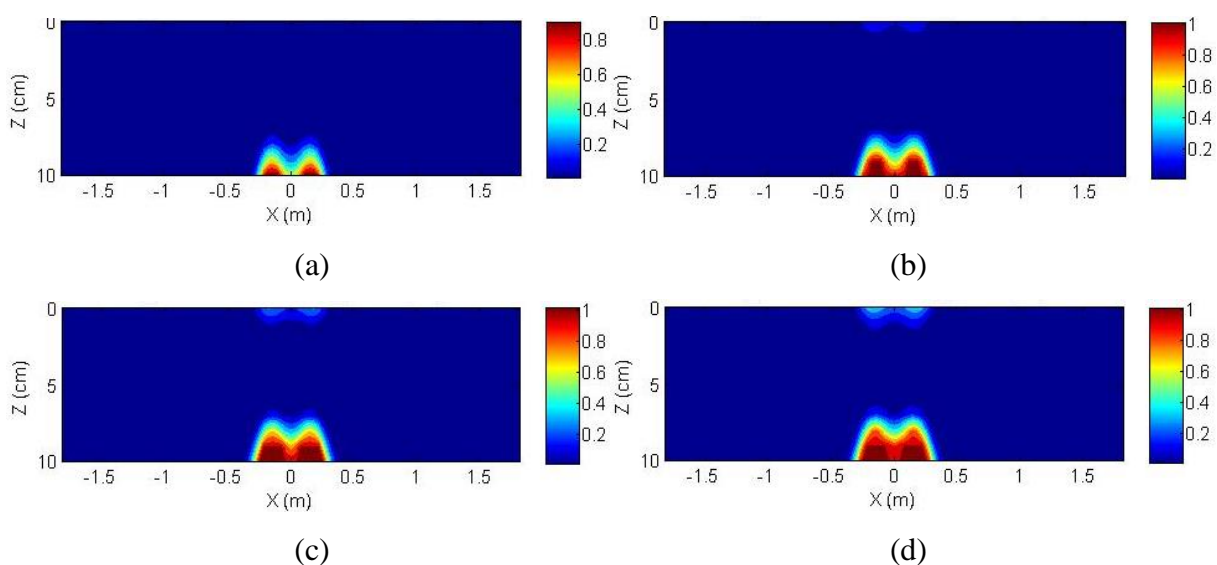


Figura D- 39 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+10%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

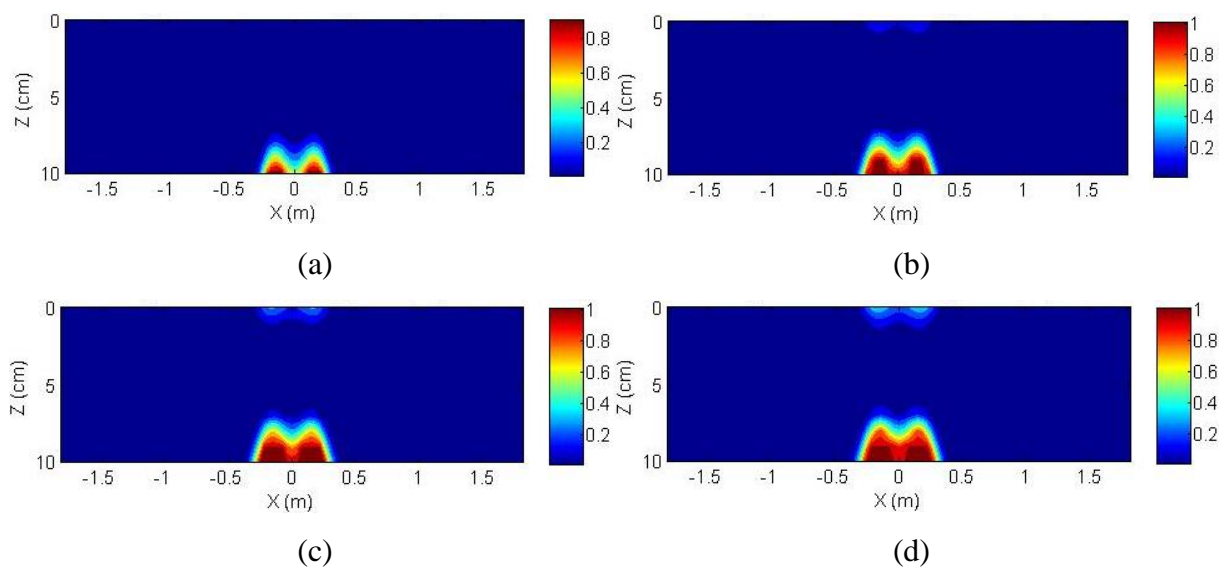


Figura D- 40 – Dano médio acumulado na camada de revestimento para a mistura Extraído trecho 2 (EX2), CML+12,5%, utilizando o critério de ruptura do D^R : (a) 12 meses, (b) 60 meses, (c) 120 meses e (d) 180 meses.

