

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Pedro Schmidt Ilha**

**CARACTERIZAÇÃO DE RIGIDEZ, DEFORMAÇÃO PERMANENTE,  
FADIGA E ANÁLISES MECANICISTAS DE PAVIMENTOS COM  
MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS EM CAMPO E  
LABORATÓRIO**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2022**

**Pedro Schmidt Ilha**

**CARACTERIZAÇÃO DE RIGIDEZ, DEFORMAÇÃO PERMANENTE, FADIGA E  
ANÁLISES MECANICISTAS DE PAVIMENTOS COM MISTURAS ASFÁLTICAS  
PRODUZIDAS EM CAMPO E LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2022**



**Pedro Schmidt Ilha**

**CARACTERIZAÇÃO DE RIGIDEZ, DEFORMAÇÃO PERMANENTE, FADIGA E  
ANÁLISES MECANICISTAS DE PAVIMENTOS COM MISTURAS ASFÁLTICAS  
PRODUZIDAS EM CAMPO E LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

**Aprovado em 25 de fevereiro de 2022:**

---

**Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)**  
(Examinador)

---

**Lucas Dotto Bueno, Dr. (UFSM)**  
(Examinador)

Santa Maria, RS  
2022



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus avós Nelson e Vânia pelo amor, confiança, educação e todo suporte que me deram desde o meu nascimento. Sem vocês nada seria possível.

Aos meus pais, Juliana e Fabio Augusto, por todo incentivo e carinho.

À minha namorada, Giorgia que divide comigo todas as conquistas da vida.

Aos meus amigos da vida e do laboratório, Pedro Orlando, Silvio Schuster, Pablo Vestena, Lucas Bueno, Fernando Boeira, Cleber Faccin. Durante a minha trajetória, sempre estiveram presentes na minha formação quanto no apoio diário às pesquisas.

Agradeço especialmente ao Luciano Specht, pela tutoria, amizade e orientação nos trabalhos realizados durante toda graduação, que além de ser um grande exemplo de profissional da área, não mede esforços para fomentar inovações na pavimentação.

Ao professor Deividi, que me acolheu no grupo, e me deu bons conselhos para iniciar minha carreira profissional.

Ao GEPPASV, pelo acolhimento desde agosto de 2018, que por sua estrutura, pude realizar pesquisas do mais alto nível e aprender com os melhores do país em pavimentação.

Agradeço também a Rede de Tecnologia em Asfaltos ANP/PETROBRAS e ao CNPq, pelo financiamento das bolsas de iniciação científica que tive no período. De fato, cada centavo investido na educação nos levará a ser uma nação cada vez mais rica e próspera.

A todos que mencionei e a todos que contribuíram indiretamente na pesquisa e em minha formação como Engenheiro Civil, minha eterna gratidão.

## RESUMO

### **CARACTERIZAÇÃO DE RIGIDEZ, DEFORMAÇÃO PERMANENTE, FADIGA E ANÁLISES MECANICISTAS DE PAVIMENTOS COM MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS EM CAMPO E LABORATÓRIO**

Autor: Pedro Schmidt Ilha

Orientador: Luciano Pivoto Specht

Oferecer conforto, durabilidade, economia, agilidade e segurança aos usuários, e consequentemente a sociedade, são finalidades que busca-se concretizar ao dimensionar ou recuperar pavimentos asfálticos. Tendo em vista esse desafio, e buscar correlatar com êxito, o cenário experimental com os fenômenos encontrados em campo, este trabalho buscou avaliar quatro misturas asfálticas reproduzidas em laboratório. A avaliação foi realizada frente aos ensaios laboratoriais de rigidez, resistência a deformação permanente, vida de fadiga, e frente as simulações computacionais do programa *MeDiNa*. As misturas asfálticas laboratoriais foram reproduzidas a partir do estudo de Vestena (2021), que avaliou as misturas usinadas e aplicadas em campo, no trecho experimental monitorado, na BR/116, Pelotas – RS. O trecho estudado para as simulações computacionais divide-se em três segmentos que diferem-se pela camada de rolamento. O segmento 01, onde foi utilizado ligante TLAFlex, possui a mistura denominada TLAf. O segmento 02, com asfalto polimérico altamente modificado por SBS (Stylink HiMA, AMP 65/90-E), possui a mistura denominada HIMA e o segmento 03, onde foi utilizado asfalto polimérico SBS (AMP 55/75-E), possui a mistura denominada SBS. Os resultados obtidos para rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório mostraram-se similares, tanto pelo ensaio de Módulo de Resiliência quanto o ensaio de Módulo Dinâmico. Os valores obtidos para FN, relacionado a deformação permanente, mostraram-se semelhantes para a maioria das misturas, exceto para mistura CONV que está disposta na camada de binder. Para os resultados de fadiga, realizado por compressão diametral, mostrou-se também semelhante quando comparado cada mistura e sua origem. Para as simulações de AT(%) estimado em 180 meses, pelo programa *MeDiNa*, as misturas asfálticas reproduzidas em laboratório se mostraram semelhantes as misturas asfálticas usinadas, diferenciando-se em 11,11% para o segmento 01, 9,01% para o segmento 02 e 17,74% para o segmento 03. As diferenças de coeficientes de fadiga ( $k_1$  e  $k_2$ ) das misturas asfálticas de cada origem não acarretaram mudanças significativas nas simulações pelo programa *MeDiNa*.

**PALAVRAS CHAVE:** Método Mecânico-empírico, Simulação de pavimentos, Fadiga, Deformação Permanente, Comportamento Viscoelástico

## ABSTRACT

### CHARACTERIZATION OF RIGIDITY, PERMANENT DEFORMATION, FATIGUE AND MECHANICAL ANALYSIS OF PAVEMENTS WITH ASPHALT MIXTURES PRODUCED IN THE FIELD AND LABORATORY

Author: Pedro Schmidt Ilha

Advisor: Luciano Pivoto Specht

Offering comfort, durability, economy, agility and safety to users, and consequently society, are purposes that are sought to be achieved when dimensioning or recovering asphalt pavements. In view of this challenge, and seeking to successfully correlate the experimental scenario with the phenomena found in the field, this work sought to evaluate four asphalt mixtures reproduced in the laboratory. The evaluation was carried out by laboratory tests of stiffness, resistance to permanent deformation, fatigue life, and by computer simulations of the MeDiNa program. The laboratory asphalt mixtures are reproduced from the study by Vestena (2021), who evaluated the mixtures machined and applied in the field, in the monitored experimental section, on BR/116, Pelotas - RS. The section studied for the computer simulations is divided into three segments that differ according to the bearing layer. Segment 01, where TLAFlex ligand was used, has the mixture called TLAF. Segment 02, with polymeric asphalt highly modified by SBS (Stylink HiMA, AMP 65/90-E), has the mixture called HIMA and segment 03, where SBS polymeric asphalt (AMP 55/75-E) was used, has the mixture called SBS. The results obtained for the stiffness of the asphalt mixtures machined and reproduced in the laboratory were similar, both by the Resilience Modulus test and the Dynamic Modulus test. The values obtained for FN, related to permanent deformation, were similar for most mixtures, except for the CONV mixture, which is arranged in the binder layer. For the fatigue results, performed by diametral compression, it was also similar when comparing each mixture and its origin. For the simulations of AT(%) estimated by the MeDiNa program, the asphalt mixtures reproduced in the laboratory were similar to the machined asphalt mixtures, differing in 11.11% for segment 01, 9.01% for segment 02 and 17.74% for segment 03. The differences in fatigue coefficients ( $k_1$  and  $k_2$ ) of the asphalt mixtures from each origin did not cause significant changes in the simulations by the MeDiNa program.

**Keywords:** Mechanistic-empirical methodology, Pavement Simulation, Fatigue, Rutting, Viscoelastic Behavior



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes.....	17
Figura 2 – Ciclo de vida de uma estrutura de pavimento .....	18
Figura 3 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações ( $\epsilon$ ) e da temperatura (T).....	19
Figura 4 – Domínios típicos de comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações ( $\epsilon$ ) e do número de ciclos (N).....	19
Figura 5 – Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo .....	23
Figura 6 – Representação gráfica do PSTT: (a) Módulo Dinâmico; (b) Ângulo de fase .....	25
Figura 7 – Calibração da equação por WLF e Polinomial .....	26
Figura 8 – Modelo 2S2P1D .....	27
Figura 9 – Fatores que afetam a resistência à deformação permanente das camadas de concreto asfáltico.....	29
Figura 10 – Gráfico típico do ensaio de <i>creep</i> dinâmico.....	30
Figura 11 – Diferença entre os processos de fadiga e deformação permanente em misturas asfálticas .....	32
Figura 12 – Definição de ruptura em ensaios com deformação controlada .....	34
Figura 13 – Critério de falha da amostra pelo pico do ângulo de fase .....	34
Figura 14 – Função de transferência campo/laboratório do <i>MeDiNa</i> , calibrada para pavimentos brasileiros .....	37
Figura 15 – Função de transferência <i>MeDiNa v.1.1.5.0</i> .....	37
Figura 16 – Planejamento da pesquisa .....	42
Figura 17 – Localização do trecho monitorado .....	44
Figura 18 – Estrutura dos segmentos monitorados.....	45
Figura 19 – Trecho monitorado: (a) Segmento 01; (b) Segmento 02; (c) Segmento 03 .....	45
Figura 20 – Ponto de coleta do material de subleito utilizado no trecho.....	46
Figura 21 – Ensaio triaxial na BGS: (a) equipamento; (b) material; (c) modelo composto.....	49
Figura 22 – Granulometria da Brita Graduada Simples .....	49
Figura 23 – Britagem: (a) bancadas de detonação; (b) britagem.....	50
Figura 24 – Teores de asfalto para as misturas asfálticas.....	51
Figura 25 – Granulometria das misturas asfálticas: (a) CONV; (b) TLAF; (c) HIMA; (d) SBS .....	52
Figura 26 - Preparação da amostra: (a) Compactador giratório; (b) Amostra retificada.....	53
Figura 27 - Latas de ligantes asfálticos .....	54
Figura 28 – Prensa servo-hidráulica UTM-25 .....	56
Figura 29 - Módulo complexo (a) Ensaio; (b) Representação das variáveis.....	57
Figura 30 - Ensaio de <i>Flow Number</i> na amostra .....	59
Figura 31 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral .....	60
Figura 32 - Ensaio de fadiga à compressão diametral .....	61
Figura 33 – Fator de fadiga da mistura (FFM) .....	62
Figura 34 - Interface geral do programa <i>MeDiNa</i> .....	65
Figura 35 – Ferramenta <i>AEMC</i> .....	66
Figura 36 – Cálculo das deformações de tração e3 no <i>AEMC</i> .....	66
Figura 37 - Equação do erro padrão do modelo .....	69
Figura 38 – Resultados de MR para as misturas asfálticas usinadas e de laboratório.....	71
Figura 39 - Resultado de módulo complexo e modelagem 2S2P1D das misturas asfálticas reproduzidas em laboratório: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) Espaço Black; (d) Cole-cole .....	73

Figura 40 - Comparação das constantes 2S2P1D para amostras usinadas e reproduzidas em laboratório: (a) $E_{00}$ ; (b) $E_0$ ; (c) $\tau_E$ ; (d) $\delta$ ; (e) $k$ ; (f) $h$ .....	75
Figura 41 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório da camada de binder disposta em todos segmentos: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole.....	76
Figura 42 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG01: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole.....	77
Figura 43 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG02: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole.....	78
Figura 44 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG03: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole.....	79
Figura 45 - Resultados de FN das misturas asfálticas usinadas e laboratório. ....	80
Figura 46 - Resultados de RT das misturas usinadas e de laboratório.....	81
Figura 47 - Resultados de ciclos para fadiga por compressão diametral pela tensão de tração aplicada.....	82
Figura 48 - Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida.....	83
Figura 49 - Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida para as misturas CONV e HIMA .....	84
Figura 50 - Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida para as misturas TLAf e SBS .....	85
Figura 51 - Classes do <i>MeDiNa</i> para as misturas asfálticas usina e reproduzidas em laboratório e misturas standard .....	87
Figura 52 - AT(%) resultante pelo <i>MeDiNa</i> por N de tráfego: (a) SEG01; (b) SEG02; (c) SEG03.....	89
Figura 53 - AT(%) resultante pelo <i>MeDiNa</i> por meses: (a) SEG01; (b) SEG02; (c) SEG03..	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Complexo.....	21
Tabela 2 – Limites para as classes de via do <i>MeDiNa</i> .....	39
Tabela 3 – Limites de FN para classes de tráfego do <i>MeDiNa</i> .....	40
Tabela 4 – Quantidade de amostras, dimensões e volume dos corpos de prova .....	41
Tabela 5 – Caracterização do material de subleito do trecho .....	47
Tabela 6 – Coeficientes de Módulo de Resiliência e deformação permanente do subleito .....	48
Tabela 7 – Caracterização dos agregados utilizados nas misturas asfálticas de campo (Vestena, 2021) e laboratório.....	51
Tabela 8 - Informações contidas no laudo dos ligantes.....	55
Tabela 9 – Coeficientes k1 e k2 para as misturas asfálticas usina e reproduzidas em laboratório .....	64
Tabela 10 – Condições aplicadas ao programa <i>MeDiNa</i> .....	64
Tabela 11 – Queda de rigidez das misturas asfálticas .....	71
Tabela 12 – Calibração 2S2P1D e WLF para as misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório.....	74
Tabela 13 – Resultados de ciclos para FN e dos coeficientes de <i>Francken</i> das misturas usinadas e reproduzidas em laboratório .....	80
Tabela 14 – Resultados de FFM para as misturas usinadas e reproduzidas em laboratório .....	86
Tabela 15 – Dano médio resultante por estrutura pelo <i>AEMC</i> e fS estimado pelo <i>MeDiNa</i> ...	88
Tabela 16 – Diferença de simulações com 95% de confiabilidade .....	91

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	17
2.1.1	Rigidez em Misturas Asfálticas .....	20
2.1.2	Deformação Permanente em Misturas Asfálticas .....	28
2.1.3	Fadiga em Misturas Asfálticas.....	31
2.2	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL .....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	41
3.2	MATERIAIS.....	43
3.2.1	Características e estrutura do trecho experimental .....	43
3.2.2	Subleito, Sub-base e Base .....	46
3.2.3	Misturas Asfálticas .....	50
3.2.4	Ligantes Asfálticos .....	54
3.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	55
3.3.1	Módulo de Resiliência.....	56
3.3.2	Módulo Dinâmico.....	57
3.3.3	Flow Number.....	58
3.3.4	Fadiga por Compressão Diametral .....	60
3.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	62
3.4.1	Programa <i>MeDiNa</i> .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
4.1	MISTURAS ASFÁLTICAS .....	70
4.1.1	Rigidez .....	70
4.1.2	Deformação Permanente .....	79
4.1.3	Fadiga.....	81
4.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	87
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>92</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	92
5.2	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.....	93
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>102</b>
	Apêndice A – Resultados de deformação inicial por ciclos para fadiga .....	102
	Apêndice B – Resultados de tensão de tração por ciclos para a fadiga.....	104

## 1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário, predominante no Brasil, exerce um papel fundamental para estabelecer as relações econômicas, sociais e de segurança nacional. Esse modal, muitas vezes sobrecarregado, é vital para estabelecer o transporte de pessoas, bens e serviços. Oferecer conforto, durabilidade, economia, agilidade e segurança aos usuários, e consequentemente a sociedade, são finalidades que buscam concretizar ao dimensionar ou recuperar pavimentos asfálticos.

Almeida Júnior (2016) afirma que diante da importância das estradas no cenário econômico e social do país, é vital que os pavimentos proporcionem aos usuários conforto e segurança. Entretanto, as condições das rodovias pavimentadas, em sua maioria, não atendem esses dois critérios, pois a ação de degradação sobre o pavimento aumentou e não houve evolução das técnicas e tecnologias para projeto, construção e restauração do revestimento e das demais camadas do pavimento de forma a melhorar o desempenho frente à ação do tráfego.

Segundo Boeira (2018), de maneira a atender à crescente demanda de durabilidade aliada à escassez de recursos do setor rodoviário, o desempenho de revestimentos do tipo concreto asfáltico (CA), muito utilizado em rodovias brasileiras de volume médio a alto de tráfego, tem sido extensivamente estudado pelo meio acadêmico, tanto seus componentes individuais (ligantes e agregados) quanto a mistura.

Aliado à falta de recursos no setor rodoviário, outros fatores contribuem para o deterioramento das rodovias pavimentadas por concreto asfáltico no Brasil, como:

- Aumento da frota de veículos comerciais.
- Excesso de cargas transportadas por eixo aliado a falta de operação de balanças de fiscalização.
- Aumento da pressão de inflação dos pneus.
- Clima tropical, predominando temperaturas elevadas na maior parte do ano.
- Incompatibilidade no dimensionamento de projeto de pavimentos.
- Escolha incorreta de materiais.
- Restrições orçamentárias.

Esse conjunto de fatores contribui para o aparecimento de deteriorações prematuras no pavimento, como defeitos associados à fadiga e deformação permanente. Conforme a literatura (RODRIGUES, 1991; NASCIMENTO, 2015; CNT, 2019), podemos concluir que o trincamento por fadiga representa maior parte dos defeitos encontrados no Brasil, sendo ele um

fenômeno de natureza complexa. Contudo os efeitos associados a deformação permanente ainda são notórios.

A fim de mitigar os efeitos de trincamentos por fadiga e afundamentos relacionados deformação permanente em concretos asfálticos, e de fato, realizar mudanças para desenvolver e qualificar as estruturas do sistema rodoviário brasileiro, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Rede de Tecnologia em Asfaltos/ANP/PETROBRAS financiam junto às universidades, dentre elas a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) representada pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), o desenvolvimento de um Novo Método de Dimensionamento Nacional de rodovias (MeDiNa), que atualmente está em processo de estruturação e implementação pelo DNIT. O método é fruto de anos de evolução, abordados em trabalhos de Franco (2007), Nascimento (2008), Guimarães (2009), Nascimento (2015), Fritzen (2016) e Franco e Motta (2018).

Fritzen (2016) afirma que é do conhecimento que os órgãos rodoviários no Brasil necessitam de um método de dimensionamento mais adequado à realidade técnica–científica do país, que seja de natureza mecanística–empírica. Engenheiros rodoviários vêm buscando um entendimento mais analítico do problema e tentando, com isso, reduzir a parcela de empirismo que é inevitável no atual estado da arte. Isto é diferente dos métodos puramente empíricos que são baseados em regras ou estudos desenvolvidos a partir de acompanhamentos observados em campo, muitas vezes replicados para regiões diferentes das definidas nos estudos originais.

O comportamento dos materiais asfálticos e suas respostas às ações do tráfego e clima são difíceis de serem reproduzidas em laboratório devido a influência de inúmeras variáveis. Mesmo assim, busca-se, por meio de ensaios mecânicos, avaliar o comportamento correlacionando-os com o desempenho em campo (FACCIN, 2018).

Em se tratando do *MeDiNa*, e sabendo que o programa está calibrado baseado em misturas asfálticas reproduzidas em laboratório, temos alguns pontos a serem explorados para melhor calibrarmos o programa:

- O fato de ter que reproduzir em laboratório a granulometria, envelhecimento e toda variabilidade intrínseca a esse processo, pode acarretar divergências nas simulações pelo programa?
- As misturas asfálticas usinadas podem reproduzir com maior fidelidade o que as simulações preveem?

Tendo em vista esse desafio, e buscar correlatar com êxito, o cenário experimental com os fenômenos encontrados em campo, este trabalho buscou avaliar quatro misturas asfálticas reproduzidas em laboratório. A avaliação foi realizada frente aos ensaios laboratoriais de rigidez, resistência a deformação permanente, vida de fadiga, e frente as simulações computacionais do programa *MeDiNa*. As misturas asfálticas laboratoriais são reproduzidas a partir de estudos de Vestena (2021), que avaliou as misturas usinadas e aplicadas em campo na BR/116, Pelotas – RS.

Buscando contemplar e somar estudos sobre a calibração do novo método nacional, a pesquisa traz uma análise dos ensaios laboratoriais, comparando as misturas asfálticas contendo a parcela de envelhecimento de usinagem e a parcela de envelhecimento laboratoriais. Somado a isso, e analisando o macro cenário, buscou-se também contribuir em prol da técnica de pavimentação brasileira, visto a importância socioeconômica do modal rodoviário para o país.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral comparar misturas asfálticas de campo e misturas asfálticas reproduzidas em laboratório frente aos ensaios laboratoriais e simulações mecânicas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de contemplar o objetivo geral da pesquisa, elaborou-se uma série de objetivos específicos para a melhor compreensão do trabalho:

- Reproduzir em laboratório, a partir das coletas de ligantes e agregados, as quatro misturas asfálticas estudadas por Vestena (2021) aplicadas na BR-116 em Pelotas/RS.
- Caracterização laboratorial das quatro misturas asfálticas frente a rigidez, resistência à deformação permanente e vida de fadiga.
- Avaliação comparativa dos resultados encontrados: usinagem versus laboratório.

- Simular computacionalmente, via software *MeDiNa*, utilizando a estrutura do pavimento composta em campo, apenas alterando as propriedades das misturas asfálticas encontradas nos ensaios.



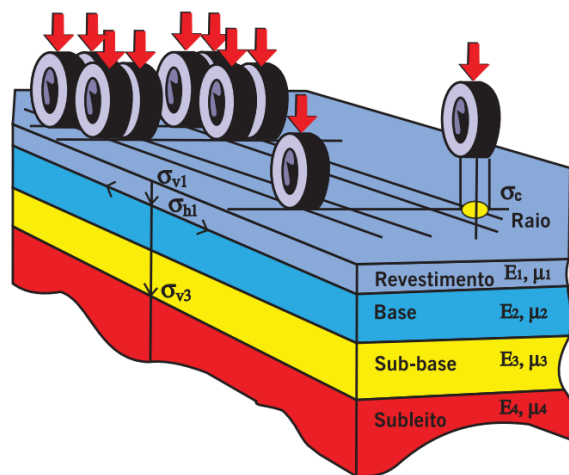
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas tratados nesta pesquisa. Primeiramente, algumas considerações sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas, abordando conceitos de: rigidez, fadiga e deformação permanente. Em seguida, ponderações acerca da análise mecanicista.

### 2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2010). Na grande maioria das rodovias brasileiras, encontramos o revestimento asfáltico como camada de revestimento superficial, destinada diretamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego, ilustrado pela Figura 1. Logo, entender e caracterizar o comportamento dos materiais asfálticos empregados nos pavimentos confere maior expertise em dimensionar ou restaurar pavimentos.

Figura 1 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes

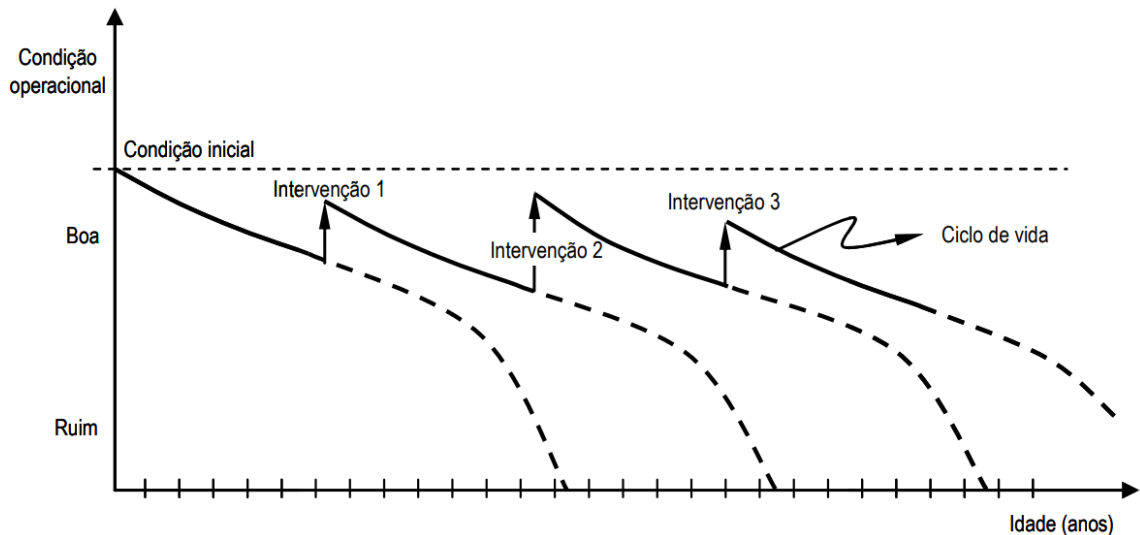


Fonte: Albernaz (1997)

Com os conceitos de serventia e os tipos de ruptura é possível compreender o ciclo de vida de um pavimento. Uma estrutura de pavimento é projetada para que possua uma condição operacional adequada ao longo de um período de projeto determinado. Essa condição operacional vai sendo degradada ao longo do tempo devido aos problemas construtivos, à

passagem das cargas e às ações climáticas. Quando o pavimento sofre qualquer intervenção de manutenção, conservação ou reabilitação, a sua condição operacional se mantém satisfatória por mais tempo, conforme ilustrado na Figura 2. Esse ciclo de degradação e conservação é chamado de ciclo de vida do pavimento (FRANCO, 2007).

Figura 2 – Ciclo de vida de uma estrutura de pavimento

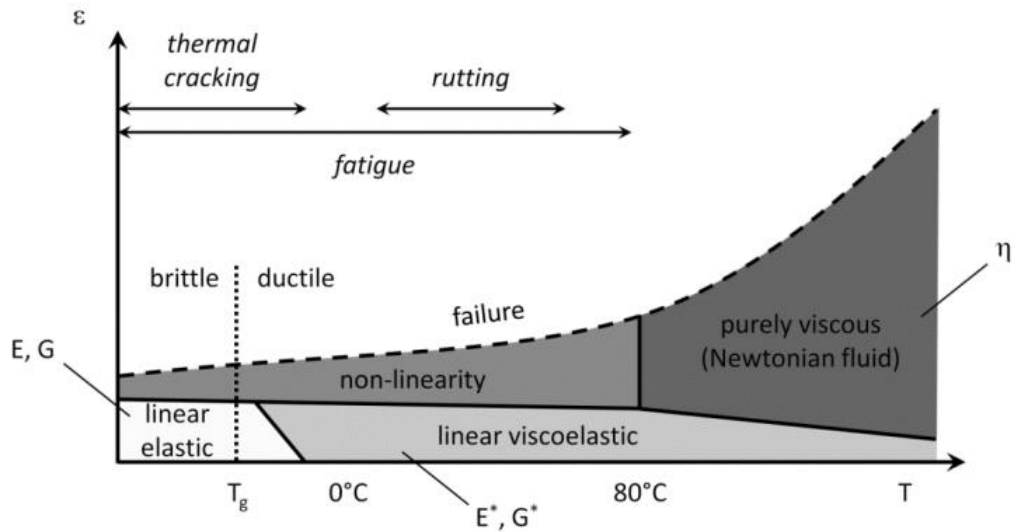


Fonte: Franco (2007)

Conforme afirma Mangiafico (2014), em um nível macroscópico, o material asfáltico pode ser considerado como um material contínuo, homogêneo, isotrópico. Seu comportamento influenciado por três fatores: temperatura, amplitude de deformações e número de ciclos de carga (OLARD *et al.*, 2015). Dependendo da grandeza desses valores, diferentes domínios de comportamento mecânico podem ser admitidos (DI BENEDETTO, DELAPORTE e SAUZÉAT, 2017).

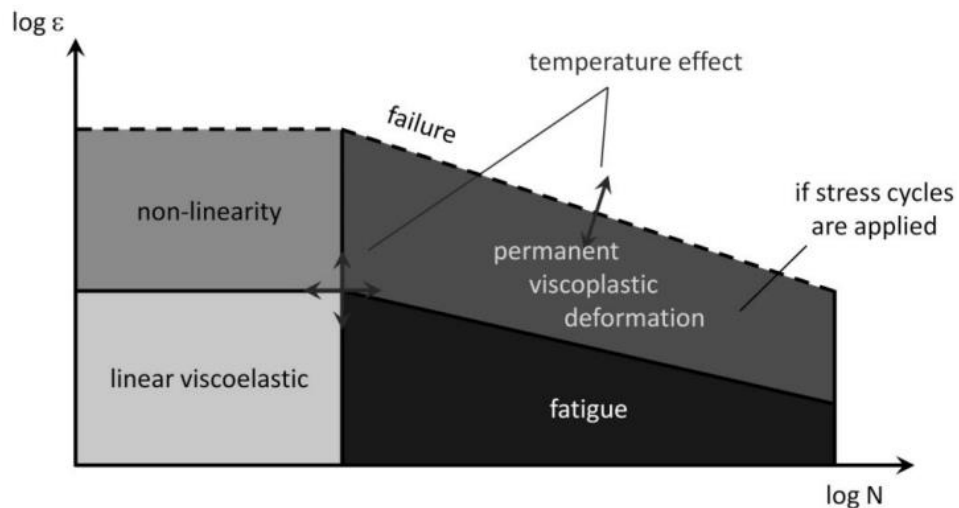
Diante disso, na Figura 3, são apresentados domínios do comportamento mecânico, em função dos intervalos de amplitude de deformação ( $\epsilon$ ) e da temperatura ( $T$ ). E na Figura 4, os domínios de comportamento para amplitude de deformação ( $\epsilon$ ) pelo número de ciclos ( $N$ ).

Figura 3 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações ( $\epsilon$ ) e da temperatura ( $T$ )



Fonte: Mangiafico (2014)

Figura 4 – Domínios típicos de comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações ( $\epsilon$ ) e do número de ciclos ( $N$ )



Fonte: Mangiafico (2014)

Quando materiais viscoelásticos são submetidos a carregamentos rápidos, exibem um comportamento próximo ao de sólidos elásticos, em contraponto, quando são aplicadas cargas lentas, o material apresenta deformações lentas com o passar do tempo, assemelhando-se a fluidos viscosos (BABADOPULOS, 2014).

Em publicações de Specht *et al.* (2017) e Renauld (1996), os autores descrevem que, misturas asfálticas herdam as características viscoelásticas e termosusceptíveis dos ligantes

asfálticos, e dependendo do tipo e o teor, apresentam-se mais ou menos susceptíveis a variação de temperatura, frequência e do tempo de aplicação de carga. Kim (2009) relata que a temperatura afeta diretamente o material asfáltico de duas maneiras: Alteração da rigidez e o efeito das movimentações térmicas durante as mudanças de temperatura. Schuster (2018, p. 26) expõe a descrição desses comportamentos:

Em condições de aumento de temperatura, o ligante asfáltico passa a apresentar uma menor viscosidade, levando conseqüentemente a uma perda de rigidez da mistura. De mesmo modo, à medida que perdemos temperatura, a mistura se torna mais rígida, seguindo o comportamento do ligante. Para maiores temperaturas, e menor rigidez, o problema de deformação permanente se evidencia, havendo densificação e/ou cisalhamento da massa. Já para rigidezes elevadas, a baixas e médias temperatura, o micro dano acumulado, em um material que tem sua ductilidade diminuída com o decréscimo da temperatura, leva a ocorrência do problema de fadiga do revestimento asfáltico. Variações bruscas de temperatura, particularmente em intervalos próximos do ponto de vitrificação do ligante, quando a mistura apresenta um comportamento próximo do elástico linear, já de caráter frágil, podem levar a ocorrência de fraturas térmicas.

Do mesmo modo, como os materiais apresentam uma característica tempo-dependente, suas propriedades de rigidez também serão afetadas pelo tempo de aplicação das cargas e suas amplitudes. Assim, os materiais asfálticos são classificados como viscoelásticos, ou seja, podem armazenar e dissipar energia mecânica em resposta a uma deformação (VESTENA, 2021).

### **2.1.1 Rigidez em Misturas Asfálticas**

Segundo Kim (2009) a rigidez em misturas asfálticas é um parâmetro representado pela inclinação da curva tensão-deformação, sendo essa uma propriedade única do material, independente do ensaio e geometria das amostras.

Para abordar o comportamento das misturas asfálticas frente rigidez, faz-se o uso de dois conceitos: rigidez de mistura asfálticas pelo módulo de resiliência e rigidez de misturas asfálticas pelo módulo dinâmico. Ambos os métodos de caracterização de rigidez diferem-se em alguns parâmetros: carregamento, temperatura, frequência e dimensão do corpo de prova. A Tabela 1 discretiza esses parâmetros.

Tabela 1 – Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Complexo

<b>Parâmetro</b>	<b>Módulo de Resiliência</b>	<b>Módulo Complexo</b>
Carga	Carregamento repetido (0,1s de aplicação e 0,9s de repouso)	Carregamento dinâmico (tempo de aplicação e repouso dependente da frequência utilizada)
Tensão gerada	Compressão diametral gerando um estado de tensão biaxial	Carregamento de compressão axial senoidal
Temperatura	25°C	.-10°C, 4°C, 21°C, 37°C,54°C
Frequência	1Hz	25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01Hz
Dimensão do corpo de prova	100mm diâmetro e 63,5 altura	100mm diâmetro e 150mm ou uma relação de 2 para 1

Fonte: Adaptado de Boeira (2018)

De maneira geral, analisando o cenário nacional, o módulo de resiliência, por ser mais simplório comparado ao módulo dinâmico, é mais explorado no meio rodoviário de obras e o Estado da Prática. Em contrapartida, o ensaio de módulo dinâmico é usado extensivamente apenas no meio acadêmico. Ainda não tem-se perspectivas concretas para o uso desse conceito, mas é de interesse do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT, incorporar, em níveis mais avançados do MeDiNa, esse método mais qualitativo para as simulações no software.

Bernucci *et al.* (2010) relata que os estudos sobre a rigidez e o comportamento dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, onde seus estudos foram pioneiros em relacionar as deformações recuperáveis com fissuras surgidas material asfáltico. Francis também é o autor pioneiro, que adotou o termo “resiliência” para abordar esse conceito. O termo “módulo de resiliência” foi criado para não ser erroneamente confundido com módulo de Young, determinado estatisticamente, normalmente associado a um comportamento de materiais elásticos.

Núñez *et al.* (2007) comentam que o módulo de resiliência é um fator importante na definição do dimensionamento racional de pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto da mistura. Acrescentam também que, a rigidez expressa pelo módulo é a razão entre a tensão

de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas asfálticas são submetidas a carregamentos repetidos, de curta duração.

Sabendo dessa necessidade de caracterizarmos o material asfáltico perante inúmeras frequências de carregamento e temperatura, simulando assim seu real comportamento em campo, que novas pesquisas abordam o módulo complexo e o seu valor absoluto, módulo dinâmico  $|E^*|$ , em detrimento ao módulo de resiliência (MR). Para Cardona *et al.* (2015), o comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas pode ser completamente definida por meio do módulo complexo ( $E^*$ ).

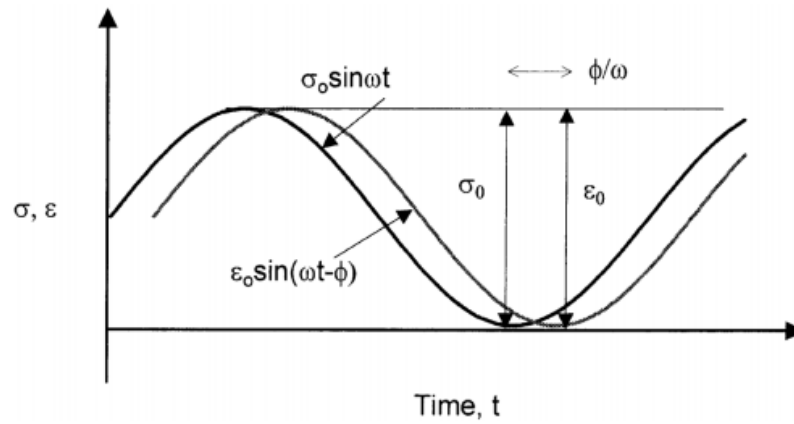
O módulo complexo vem sendo estudado como uma alternativa ao módulo de resiliência na caracterização de misturas asfálticas devido à importância de se considerar os efeitos de diferentes temperaturas e frequência de carregamento no comportamento de revestimentos asfálticos. Dessa forma, é possível determinar as características elásticas e propriedades viscoelásticas lineares do material (CHRISTENSEN, 1982).

Kim *et al.* (2004) relata que o ensaio de módulo complexo é o que melhor avalia a propriedade de rigidez do material asfáltico devido a sua homogeneidade. Sobre a aplicação de um carregamento senoidal contínuo, e variando temperaturas e frequências, determina-se propriedades relacionando tensão/deformação. Somado a isso, segundo Specht *et al.* (2017), a utilização de uma única frequência de carga e uma única temperatura no ensaio de MR negligencia a susceptibilidade à temperatura, herdada do ligante asfáltico, e sua essência viscoelástica, dependência de frequência ou tempo.

Em termos de escala, os autores Babadopulos *et al.* (2016) e Di Benedetto *et al.* (2001) afirmam que misturas asfálticas podem ser cerca de mil vezes mais rígidas, quando testadas em baixas temperaturas, e comparadas aos resultados encontrados em altas temperaturas.

Deste modo, a parcela elástica do comportamento é caracterizada pelo módulo complexo, que é definido pela relação tensão deformação durante o carregamento senoidal contínuo. Já a parcela viscosa é composta pelo ângulo de fase ( $\theta$ ), que varia de  $0^\circ$  (puramente elástico) até  $90^\circ$  (puramente viscoso). Esse último parâmetro está diretamente ligado as parcelas viscoelásticas solicitadas e pode ser verificado através da defasagem entre o pico de tensão e o pico de deformação, ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo



Fonte: Witczac et al. (2002)

A Equação 1 define matematicamente o conceito de módulo complexo, a Equação 2 define o módulo dinâmico, e a Equação 3 define o ângulo de fase.

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (1)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (3)$$

Onde:

$t_i$ : fração de tempo entre os picos de tensão e deformação.

$t_p$ : tempo de um ciclo de carga.

Como  $E^*$  é um número complexo, sua parte real e sua parte imaginária podem ser isoladas, respectivamente como  $E_1$  e  $E_2$ , como segue abaixo na Equação 4.

$$E^* = E_1 + E_2 = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi \quad (4)$$

Os dados obtidos através do ensaio de módulo complexo podem ser apresentados em diferentes tipos de gráficos, sendo os principais deles: plano Cole-Cole (E1 por E2), diagrama de Black (Módulo por ângulo de fase), e as curvas mestras de módulo dinâmico e de ângulo de fase.

#### 2.1.1.1 Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT)

Sabendo que a temperatura e frequência de carregamento está diretamente ligada a resposta do material asfáltico, no que diz a respeito da rigidez do material, que Ferry (1980) observou que para diversos materiais viscoelásticos lineares, os valores de módulo complexo quando plotado módulo dinâmico por ângulo de fase, seja em Diagrama Black ou Cole-Cole, os gráficos tendem a formar uma curva única, independente da temperatura ou frequência submetida.

Materiais que obedecem ao comportamento descrito anteriormente, são nomeados de termoreologicamente simples, e a influência dos parâmetros temperatura (T) e frequência de pulsação ( $\omega$ ) podem ser reduzidos a um único parâmetro, conforme apresentado na Equação 5 (CORTÉ e DI BENEDETTO, 2005). Isso implica que valores de módulo complexo medidos por diferentes composições de T e  $\omega$ , podem resultar em valores iguais. Portanto, por existir essa equivalência de efeitos entre as duas variáveis no comportamento do material, esta propriedade é chamada Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT).

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega f(T)) = E^*(g(\omega)T) \quad (5)$$

O PSTT permite criar curvas únicas de módulo dinâmico ou de ângulo de fase, a partir de suas isotermas, estando todo o comportamento do material descrito em uma curva mestra, representando uma única temperatura.

O procedimento consiste em escolher uma temperatura referência ( $T_{ref}$ ) arbitrariamente, normalmente é escolhida a temperatura mediana às ensaiadas. Então, as isotermas são transladadas ao longo do eixo da frequência (horizontal), de forma a superpor todos os pontos na mesma ordenada, de forma a gerar uma curva mais suave possível. Matematicamente, a translação ocorre multiplicando as frequências de todos os pontos de cada isoterma por um coeficiente ( $a_T(T)$ ), chamado *shift factor*, que dependerá de cada temperatura das isotermas a

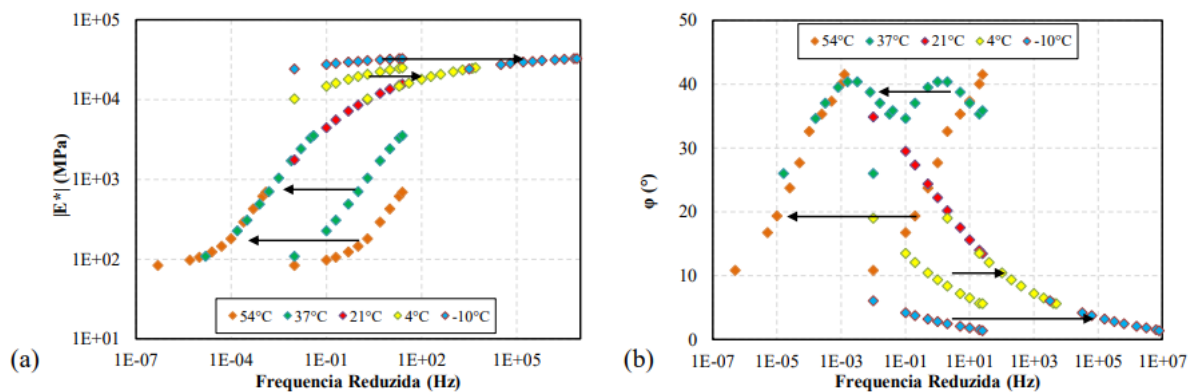


serem transladadas, seguindo a Equação 6. Assim, o módulo dinâmico pode ser definido como uma função da frequência angular ( $\omega$ ) e os *shift factors* ( $a_T(T)$ ), em termos de frequência reduzida, para cada temperatura referência ( $T_{ref}$ ), onde  $a_T(T_{ref}) = 1$ .

$$a_T(T) = \frac{f(T)}{f(T_{ref})} \quad (6)$$

Graficamente, o resultado de uma superposição é ilustrado na Figura 6, onde cada cor representa uma isoterma, e quando transladadas formam um acurva mestra de módulo dinâmico (a) e ângulo de fase (b) para uma  $T_{ref}$  de 21°C.

Figura 6 – Representação gráfica do PSTT: (a) Módulo Dinâmico; (b) Ângulo de fase



Fonte: Vestena (2021)

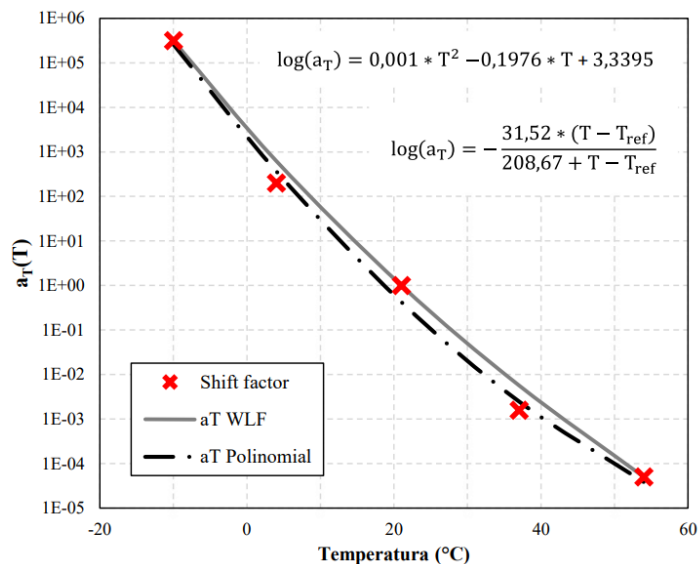
Duas equações são as mais utilizadas na literatura para descrever os valores de  $a_T$  como função da temperatura. A primeira é a Equação 7, proposta por William, Landel e Ferry (1955), também conhecida como WLF, onde duas constantes são calibradas para cada material avaliado:  $C_1$  e  $C_2$ . A segunda é uma regressão empírica na forma polinomial, demonstrado pela Equação 8, onde existem três constantes a serem calibradas:  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ .

$$\log(a_T) = -\frac{C_1 * (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (7)$$

$$\log(a_T) = a_1 * T^2 + a_2 * T + a_3 \quad (8)$$

A calibração é realizada nas temperaturas ensaiadas em laboratório, de forma que quanto mais temperaturas são ensaiadas, mais representativo é a minha superposição para o material. Então, como apenas um número limitado de temperaturas e frequências é testado em laboratório, este princípio é interessante, pois permite acessar valores não ensaiados. A Figura 7 apresenta os valores calibrados para a mistura apresentada acima. É importante notar que, a primeira equação obriga a curva a passar pela  $T_{ref}$ . Isso pode significar em mais precisão quando extrapolando valores quando se tratando de temperaturas próximas a temperatura de referência. Enquanto a segunda apresenta erros relativos mais bem distribuída ao longo das diferentes temperaturas avaliadas.

Figura 7 – Calibração da equação por WLF e Polinomial



Fonte: Vestena (2021)

### 2.1.1.2 Modelagem 2S2PID

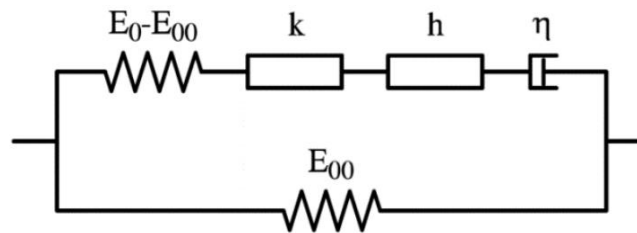
A partir dos resultados obtidos com o ensaio de módulo complexo, é realizada a modelagem físico-matemática para que se obtenha as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas em frequências e temperaturas nas quais não foram ensaiadas, não acarretando assim a realização de novos ensaios.

Segundo Pagliosa (2004), combinações de elementos mecânicos como molas (elásticos) e amortecedores (viscosos) podem retornar em modelos físico-matemáticos que simplificam o comportamento viscoelástico de materiais em fórmulas matemáticas contínuas. Embora sejam

apenas fenomenológicos, esses modelos são ferramentas úteis quando necessário prever o comportamento de um material em condições mais complexas.

Sabendo da necessidade de representar o comportamento em altas temperaturas e baixas frequências, onde a modelagem de Huet-Sayegh (1965) não englobava esse domínio puramente viscoso, que Olard e Di Benedetto (2003) propuseram o modelo 2S2P1D (*2 springs, 2 parabolic elements, 1 dashpot*), Figura 8.

Figura 8 – Modelo 2S2P1D



Fonte: Mangiafico (2014)

Portanto, os valores de módulo complexo os quais são submetidos a modelagem, dado pela Equação 9, são expressos em função do pulso  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ), onde  $f$  é a frequência de carregamento. O coeficiente  $\beta$  é relacionado a viscosidade do amortecedor linear, e definido pela Equação 10.

$$E^*(i\omega\tau_E) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (9)$$

$$\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau \quad (10)$$

A vantagem de se utilizar análogos mecânicos que representam os materiais asfálticos como um todo é que existem coeficientes que são relativos a apenas uma escala. Di Benedetto *et al.* (2004b) cita que os coeficientes  $k$ ,  $h$ ,  $\delta$  e  $\beta$  são relativos apenas ao ligante asfáltico, podendo ser extrapolado para outras misturas que utilizem o mesmo asfalto. Portanto, portando apenas os dados de rigidez de um ligante, e conhecendo os valores de  $E_0$  e  $E_{00}$  do esqueleto pétreo, é possível prever o módulo complexo de uma mistura asfáltica. Por outro lado, uma dificuldade associada a este modelo é a necessidade de os sete parâmetros serem calibrados manualmente, o que pode levemente interferir nos valores dos coeficientes em função do nível de experiência do usuário associada ao modelo. (MANGIAFICO, SAUZÉAT e DI BENEDETTO, 2019).

### 2.1.2 Deformação Permanente em Misturas Asfálticas

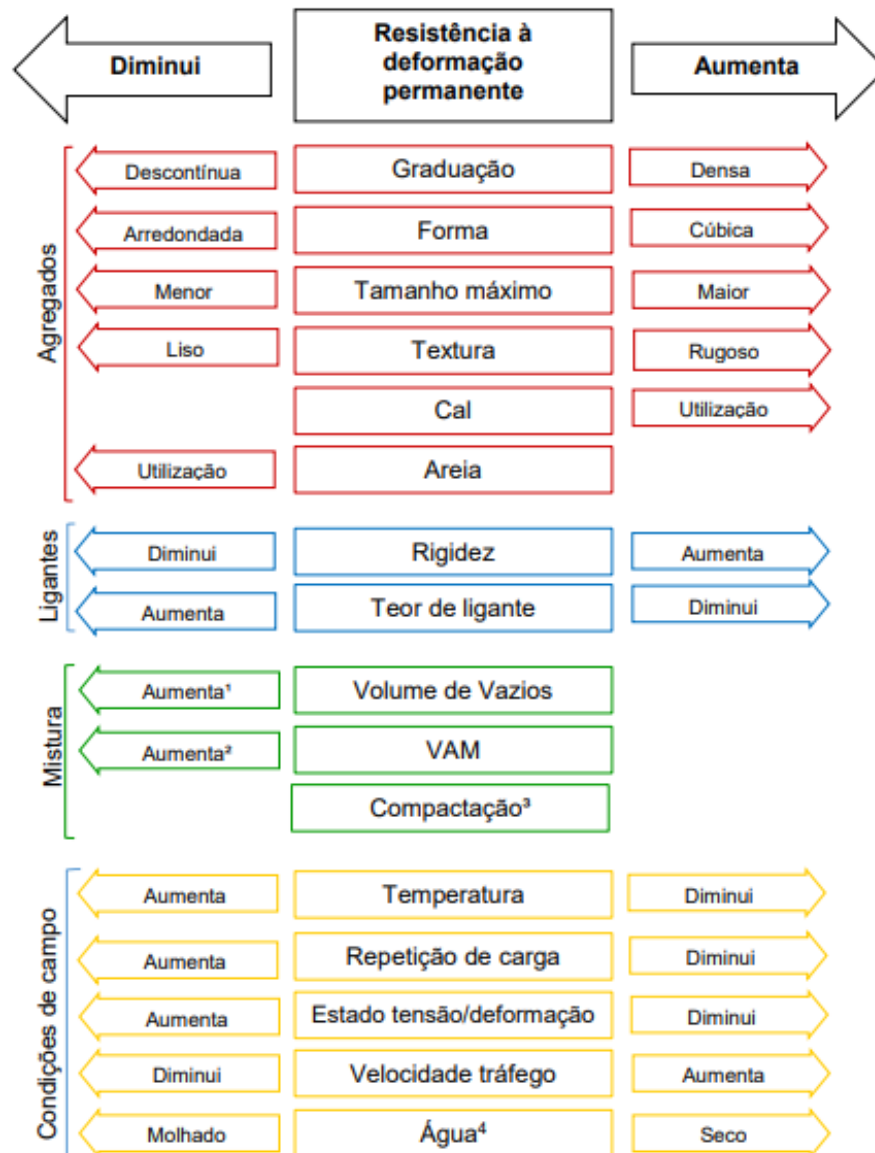
A deformação permanente no revestimento asfáltico pode ser definida como depressões longitudinais nas trilhas de roda devido ao acúmulo de pequenas deformações não recuperáveis decorrentes da aplicação de carga repetida (tráfego de veículos), principalmente em altas temperaturas. Simultaneamente, ocorre deformação viscosa do ligante e deformação plástica da estrutura mineral. Atualmente, diante do aumento no volume de tráfego e das cargas por eixo, este tipo de dano torna-se frequente, reduzindo a vida útil do pavimento, conforto ao rolamento e segurança dos usuários e os custos operacionais (HUNTER *et al.*, 2015).

Deformação permanente pode ser tanto atribuída aos materiais asfálticos, como às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não asfálticas podem apresentar deformações principalmente por densificação adicional pelo tráfego ou por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma boa seleção de materiais, compactações adequadas, e um bom projeto estrutural (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No revestimento asfáltico, a deformação permanente ocorre devido às características viscoplásticas do material. A origem desse efeito está associada à variação de volume de vazios ocasionada pela ação do tráfego e pela temperatura, notadamente devido ao comportamento plástico do material quando submetido a determinado estado de tensão. Portanto, é uma instabilidade de concreto asfáltico ocasionada pela excessiva fluência da mistura, e agravada por temperaturas elevadas e/ou velocidade baixa de operação dos veículos (BOEIRA, 2018).

As características individuais de cada mistura, como volume de vazios, VAM, teor de ligante, também influenciam consideravelmente o comportamento frente à deformação permanente. Além disso, as condições que o pavimento é exposto influenciam diretamente o seu desempenho, podendo-se citar a temperatura, o estado de tensões e o volume de tráfego (MOURA, 2010). A Figura 9 sintetiza todos esses fatores, e é resultado da vasta revisão da literatura, encontrada em Faccin (2018).

Figura 9 – Fatores que afetam a resistência à deformação permanente das camadas de concreto asfáltico



Fonte: Faccin (2018)

Existe um consenso na literatura de que, dentre os principais fatores atrelados à deformação permanente em misturas asfálticas, o esqueleto mineral de agregados exerce maior influência sobre o método de ruptura, que o ligante asfáltico (ROBERTS *et al.*, 1996; FWHA, 2002). Entretanto, pesquisas mais recentes estão apontando que a parcela do ligante asfáltico é igualmente importante (JOLIET e MALOT, 2000). O teor de asfalto na mistura, as propriedades reológicas dos ligantes e principalmente as suas modificações exercem papel fundamental neste

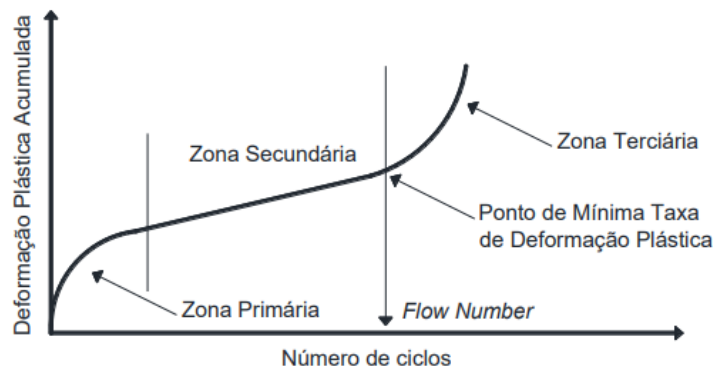
modo de ruptura (CORTÉ *et al.*, 1994; MAHMOUD e BAHIA, 2004; NASCIMENTO, 2008; MOURA, 2010; ALMEIDA Jr. *et al.*, 2017).

Para caracterizarmos os materiais asfálticos frente a deformação permanente, faz-se o uso de dois diferentes métodos:

- Ensaio de *creep* dinâmico: Uniaxial de cargas repetidas - *Flow Number*
- Simuladores de tráfego laboratoriais: Asphalt Pavement Analyzer (APA), simulador de tráfego francês - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e Hamburg Wheel Track Test (HWTT)

Nos chamados ensaios de *creep*, os corpos de prova são submetidos a tensões horizontais e/ou verticais e suas deformações são medidas em proporção à altura do corpo de prova. O *Flow Number* é um ensaio de *creep* dinâmico e tem se tornado um dos ensaios mais importantes para avaliar o desempenho frente à deformação permanente (FACCIN, 2018). Abaixo, a Figura 10 ilustra o comportamento típico de materiais asfálticos submetidos a deformação plástica acumulada.

Figura 10 – Gráfico típico do ensaio de *creep* dinâmico



Fonte: Adaptado de Budny (2012)

O *Flow Number* é um parâmetro gerado pelo ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento que melhor relaciona a deformação permanente, de acordo com o *Report 465* (WITZCZAK *et al.*, 2002).

A importante investigação do comportamento de misturas asfálticas frente a deformação permanente, seja ela por meio de tipos de ensaio ou pesquisas avaliando a influência de diversos fatores, fez com que tivéssemos domínio de conhecimento e possibilitaram a aplicação desses conceitos para outras esferas, como a do dimensionamento de pavimentos asfálticos através do *MeDiNa*. No software, o FN é utilizado mais como uma ferramenta de seleção/incusão, do que um dado de entrada no dimensionamento.

### 2.1.3 Fadiga em Misturas Asfálticas

Segundo Yoder e Witczak (1975), o fenômeno da fadiga em misturas asfálticas se caracteriza por formar trincas devido ao carregamento repetido do tráfego, em níveis de tensão ou deformação inferiores ao estado último de ruptura dos materiais. Balbo (2010) ainda comenta, que níveis de deformação aplicados ao material, isoladamente, não são suficientes para a atingir a falha por fadiga. Pinto (1991) descreve o fenômeno como o processo de deterioração estrutural quando submetido a um estado repetido de tensões e deformações, resultando na perda da resistência, gerando trincas ou mesmo a fratura completa do material após um número de repetições suficientes do carregamento. Em Cervo (2004), a fadiga é considerada como a deterioração através de carregamentos cíclicos com tensões menores que a respectiva tensão de ruptura do material. Esses carregamentos levam ao surgimento e evolução de microfissuras que podem ir a causar a ruína da estrutura. Bernucci *et al.* (2010) define fadiga como a diminuição gradual da resistência do material pelo efeito de sucessivas solicitações de carga, levando ao desenvolvimento de trincas.

Sabendo que para alguns materiais, se não excedido um limite mínimo de carregamento, a vida de fadiga tende ao infinito, ou seja, não ocorreria fadiga ou teríamos horizontes muitos distantes não viabilizando maiores análises. Para isso, aplica-se a hipótese de Palmgren-Miner (PALMGREN, 1924; MINER, 1945), expressa Equação 11, na onde a contribuição relativa de cada aplicação separadamente é considerada linearmente cumulativa ao dano final da amostra, sendo ele limitado de 0 a 1.

$$FADIGA = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} \quad (11)$$

Onde:

n: número de ciclos aplicados com determinada amplitude S

N: número de ciclos de ruptura para amplitude S

K: número de diferentes amplitudes S aplicadas

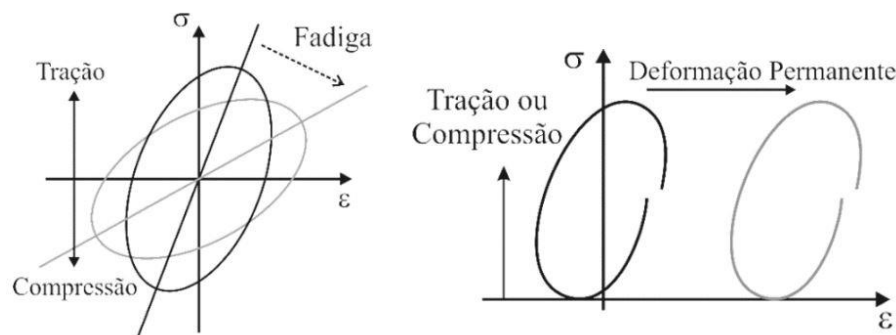
A caracterização do dano por fadiga e o processo de trincamento são abordados por duas teorias: a mecânica da fratura e mecânica do dano contínuo. A mecânica da fratura relaciona o

fenômeno de formação das microtrincas para representar o comportamento do material. Já a mecânica do dano contínuo representa os fenômenos da microescala globalmente, utilizando propriedades fundamentais das misturas asfálticas para caracterizar o comportamento. (UNDERWOOD, 2011).

Sabe-se que o acúmulo irreversível de dano, ao longo da vida do pavimento, acaba definindo planos de fratura e discontinuidades, levando a perda de rigidez e integridade do material. Em um processo retroalimentado, essa perda de rigidez gera maiores deformações, e o seu acúmulo, o fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO et al., 2004a).

Di Benedetto et al. (2004a) expõe que as misturas asfálticas estão submetidas em um curto espaço de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos. Com o carregamento surgem micro trincas na superfície inferior do revestimento asfáltico, resultando na perda de rigidez do material. Essa perda de rigidez leva, conseqüentemente, a maiores deformações e o acúmulo destas resulta no fenômeno de fadiga. A sensibilidade do material e as distintas características de intensidade e frequência de carregamento levam a compreensão dos comportamentos ainda mais complexa. Na Figura 11, temos a distinção desses comportamentos, onde não deve confundir fadiga com deformação permanente.

Figura 11 – Diferença entre os processos de fadiga e deformação permanente em misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2004a)

Por outro lado, o processo de fadiga é mais complexo que apenas analisar as camadas separadamente. Em um pavimento, as repetições de cargas geradas pelo tráfego geram tensões verticais de compressão e tensões de tensão nas fibras inferiores das camadas por flexão (MEDINA e MOTTA, 2015). Como o processo de fadiga depende das magnitudes de tensões e deformações impostas nas camadas, a análise de fadiga será influenciada pela rigidez de cada uma das camadas do pavimento.



Segundo Hintz (2012), o trincamento é forma mais comum de ocorrência, sendo as principais formas do tipo topo-base ou base-topo da camada. Para Boeira (2018), normalmente as trincas surgem primeiramente na superfície inferior da camada asfáltica, onde as forças de tração são maiores, e posteriormente, propagam-se para a superfície do pavimento na forma de trincas interligadas, danificando o pavimento. Esse fenômeno deve ser controlado já nas primeiras idades, visto que acarretam graves problemas progressivos na estrutura do pavimento, devido à facilidade de entrada da água.

O fenômeno da fadiga em pavimentos asfálticos é de natureza complexa e tem sua base de influência atrelada a diversos fatores, já conhecidos pela literatura:

- Escolha do ligante asfáltico adequado (IWANAGA, 2007).
- Presença de modificadores no ligante asfáltico (SPECHT, 2004; FERNANDES JUNIOR, 1994; SPECHT e CERATTI, 2003).
- Teor de ligante asfáltico (PINTO, 1991; CAPITÃO, 2004).
- Distribuição granulométrica atrelada as propriedades do agregado (SOARES *et al.*, 2000).
- Volume de vazios em pista e grau de compactação (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004; SANTOS, 2005; MONISMITH, 1969).
- Envelhecimento do ligante asfáltico (RAAD *et al.*, 2001; GIGANTE, 2007; TONIAL *et al.*, 2001; FONTES, 2009).
- Condições climáticas (BALBO, 2010; MEDINA E MOTTA, 2015).
- Intensidade e frequência de carregamento (YU E ZOU, 2013; PREUSSLER E PINTO, 2010; SOARES, 2007; BALBO, 2010).
- Capacidade estrutural dos pavimentos como conjunto de camadas (FONTES, 2009).

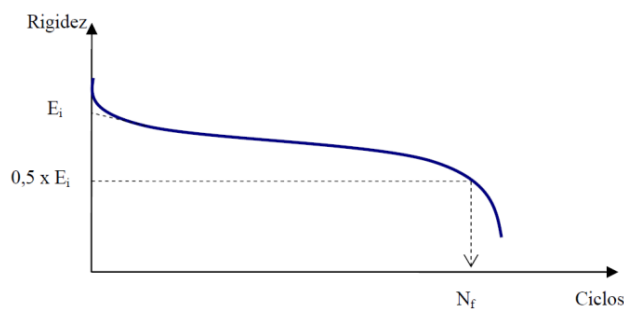
De modo a caracterizar o dano por fadiga de uma mistura asfáltica, é necessário entender a relação tensão-deformação, e compreender também a evolução do dano e da perda de rigidez dos materiais asfálticos. Entretanto isso é uma tarefa complexa, uma vez que as variáveis são muitas e a obtenção da resposta nos ensaios de fadiga em laboratório é difícil, visto a alta dispersão dos resultados e dificuldade da integração campo-laboratório. (SCHUSTER, 2018)

Para a análise das misturas asfálticas no que se refere a fadiga, a utilização de um critério de falha é de extrema importância, visto que é este que irá caracterizar a vida de fadiga da mistura avaliada, sendo um parâmetro importante para a verificação do desempenho das

misturas asfálticas frente ao trincamento por fadiga, podendo influenciar diretamente no resultado (SYBILSKI e BAÑKOWSKI, 2008; BOEIRA, 2018). A norma brasileira DNIT 183/2021 discretiza como critério a ruptura total da amostra.

De maneira geral, a maioria dos pesquisadores utiliza uma caracterização clássica, oriunda de ensaios a deformação controlada, arbitrada na queda de 50% do módulo, Figura 12, como critério de falha de uma amostra, não levando em conta outros efeitos durante o teste (DI BENEDETTO *et al.*, 2004a; KIM, LEE e LITTLE, 1997).

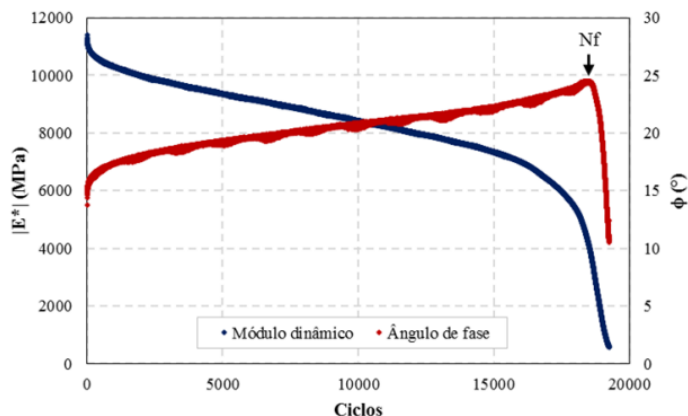
Figura 12 – Definição de ruptura em ensaios com deformação controlada



Fonte: Adaptado de Di Benedetto et al. (1997)

Outro critério de falha, proposto por Reese (1997), é o critério de falha pelo pico do ângulo de fase, que consiste em identificar o ponto de inflexão dos valores do ângulo de fase, representando uma mudança no comportamento mecânico do material devido ao acúmulo de dano por fadiga, Figura 13. Este critério é consideravelmente mais preciso e lógico do que simplesmente determinar a falha de maneira clássica, pela redução arbitrária de 50% do valor inicial de rigidez (KIM *et al.*, 2003).

Figura 13 – Critério de falha da amostra pelo pico do ângulo de fase



Fonte: Vestena (2019)

## 2.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais (FRANCO, 2007).

A necessidade de estruturar qualitativamente as modelagens mecanísticas vem da busca incessante de melhorar a maneira em que se dimensiona pavimentos no Brasil. Desse modo, busca-se caracterizar e analisar o desempenho de novos materiais, por exemplo, o uso de ligantes modificados, que o método do DNER de 1981 não leva em consideração na sua base teórica.

O método ainda vigente no país foi estabelecido em 1966, pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza, sofrendo pequenas alterações em 1981 (SOUZA, 1981). Por utilizar um índice desenvolvido na Califórnia nos anos de 1928 e 1929 para proteger o subleito contra o cisalhamento com determinada capacidade de suporte, ele é chamado de Método CBR. É utilizado para quantificar as espessuras das camadas granulares, e de subleito em parâmetros de projeto.

Um método de dimensionamento é dito mecanístico quando utiliza teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e das ações climáticas na estrutura. Então, a parcela empírica pode ser minimizada pelo acompanhamento sistemático de trechos experimentais de campo ajustados com ensaios mecânicos usuais, gerando Funções de Transferência (FRITZEN, 2016).

Os modelos matemáticos obtidos de regressões de dados de ensaios em laboratório e que tentam traduzir as tensões, as deformações e os deslocamentos em danos nos pavimentos podem ser considerados o elo mais fraco no método mecanístico de dimensionamento de pavimentos. Apesar do avanço das pesquisas e das técnicas de ensaios no campo e no laboratório, o fator de calibração entre o campo e o laboratório, ponto onde se encontra o empirismo, ainda não deixou de ser utilizado no Brasil.

Segundo Franco (2007), o método mecanístico-empírico vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, onde seja possível

utilizar materiais dos quais não se tem um devido conhecimento em campo, além de se considerar os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos foram desenvolvidos.

Franco (2020), em uma apresentação para a Rede de Tecnologia em Asfalto, expõe as principais vantagens de se utilizar um método mecanístico-empírico no contexto brasileiro:

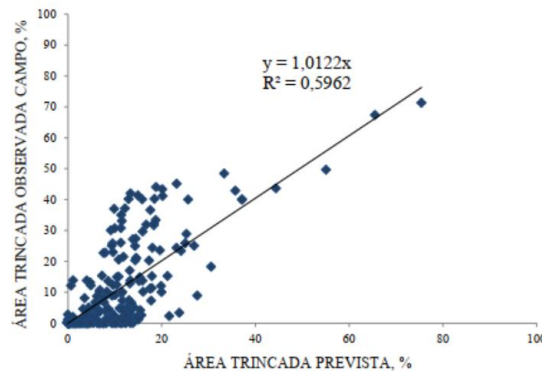
- Pode ser utilizado como um documento oficial que justifica ganhos de engenharia, quando se for necessário argumentar a escolha de materiais mais caros, porém de qualidade superior;
- Propicia justificativa de utilização de materiais locais por meio de uma análise confiável, podendo reduzir custos relacionados a distância de transporte;
- Utiliza critério de fadiga para dimensionamento de reforços de pavimentos;
- Verifica a necessidade de reforço nas camadas existentes num processo de reforço de pavimento, por meio da retroanálise e verificação de esforços;
- Pode auxiliar o processo de análise de custos totais relacionado a pavimentação, podendo serem simuladas diversas opções de estrutura de forma rápida e confiável.

Sabendo das dificuldades no dimensionamento e a demanda por estruturas melhores dimensionadas que o MeDiNa foi se estruturando. O software é fruto do amadurecimento dos trabalhos desenvolvidos por Franco (2000), com o desenvolvimento do primeiro sistema automático de dimensionamento de espessuras, chamado *PAVE2000*, considerando a carga, clima e um período de análise.

Posteriormente em Franco (2007), com o desenvolvimento do *SisPav* que permitiu a análise linear e não linear das camadas, baseado na rotina do *Jacob Uzan Layered Elastic Analsys* (JULEA), encontrado em Uzan (1978) e Guimaraes (2009) com o método de previsão de deformação permanente em solos tropicais utilizando os ensaios triaxiais.

Em seguida, Fritzen (2016) abastece o software do *SisPav* com um banco de dados de uma Função de Transferência calibrada com 45 segmentos experimentais de revestimento de concreto asfáltico do Projeto Fundação. O projeto consistiu em 13 segmentos monitorados distribuídos nos estados do Rio de Janeiro (RJ), Rio Grande do Sul (RS), São Paulo (SP) e Ceará (CE), os quais foram validados pelo monitoramento pela Rede de Tecnologia em Asfaltos. A Figura 14 ilustra a relação entre área trincada prevista e área trincada observada pela função de transferência campo/laboratório de Fritzen (2016).

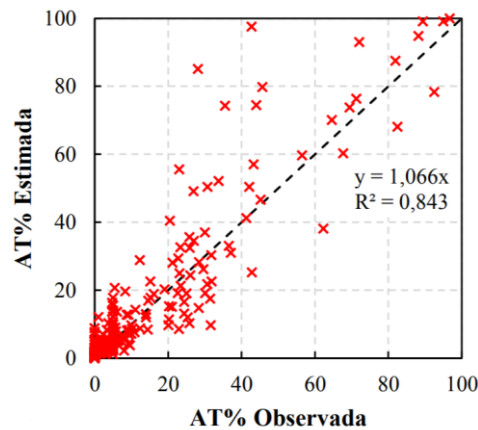
Figura 14 – Função de transferência campo/laboratório do *MeDiNa*, calibrada para pavimentos brasileiros



Fonte: Fritzen (2016)

A função de transferência, Figura 15, sofreu alterações desde o trabalho original de Fritzen (2016), e atualmente a versão do *programa MeDiNa v.1.1.5.0*, de dezembro de 2020, está calibrada utilizando 34 segmentos do Projeto Fundão e um segmento da cidade de Santa Maria (RS).

Figura 15 – Função de transferência *MeDiNa v.1.1.5.0*



Fonte: Vestena (2021)

O *MeDiNa* é um software de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. O programa é fruto de vários Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades do Brasil (FRANCO e MOTTA, 2020).

Em 2018, o programa desenvolvido em C++, com base na rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas, ganha o nome de Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), em homenagem ao professor Jacques de Medina, com o apoio do DNIT. As hipóteses utilizadas no programa de análise mecanístico-empírico são (FRANCO e MOTTA, 2020):

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carrega ocorrem apenas tensões normais;
- A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- À grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

No programa, há a possibilidade de dimensionar um pavimento novo, calcular reforços para pistas existentes ou apenas analisar uma estrutura em questão. Para diferentes importâncias de vias, são determinados diferentes critérios de confiabilidade, limites de área trincada e deformação permanente das camadas granulares e subleito, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Limites para as classes de via do *MeDiNa*

Tipo de via	Confiabilidade	Área Trincada	Deformação Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Franco e Motta (2020)

Para as camadas de materiais granulares e subleito, são requeridos ensaios de módulo de resiliência triaxiais, exposto na Equação 12, e ensaios de deformação permanente regidos pelo modelo de Guimarães (2009), exposto na Equação 13.

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3} \quad (12)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência do material, em MPa.

$k_1, k_2, k_3$ : constantes a serem calibradas.

$\sigma_3$ : tensão confinante.

$\sigma_d$ : tensão desvio.

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 * \sigma_3^{\psi_2} * \sigma_d^{\psi_3} * N^{\psi_4} \quad (13)$$

Onde:

$\varepsilon_p$ : deformação equivalente acumulada.

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ : constantes a serem calibradas.

N: número de equivalências do eixo padrão rodoviário.

Para a estimativa do carregamento do tráfego, o programa considera o eixo padrão rodoviário, onde a carga das rodas uniformemente distribuída em uma área circular entre pneu e pavimento, com pressão de contato igual à pressão de inflação dos pneus. O eixo padrão

rodoviário é utilizado nas análises e no dimensionamento das estruturas do pavimento, visto que suas calibrações de fadiga utilizaram a evolução estimada de passagens desse.

Para os materiais asfálticos, a caracterização faz-se pela curva de fadiga por compressão diametral, módulo de resiliência e *flow number*. Na caracterização frente a deformação permanente, temos os limites de FN propostos para cada utilização em determinado tráfego, exposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de FN para classes de tráfego do *MeDiNa*

<b>Classe</b>	<b><i>Flow Number</i> (ciclos)</b>	<b>N (condições normais)</b>	<b>N (condições severas)</b>
1	FN > 100	N < 10 <sup>6</sup>	Não recomendado
2	100 ≤ FN < 300	10 <sup>6</sup> ≤ N < 10 <sup>7</sup>	N < 10 <sup>6</sup>
3	300 ≤ FN < 750	10 <sup>7</sup> ≤ N < 10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup> ≤ N < 10 <sup>7</sup>
4	750 ≤ FN < 2000	N ≥ 10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> ≤ N < 10 <sup>8</sup>
5	FN ≥ 2000	-	N ≥ 10 <sup>8</sup>

Fonte: Nascimento (2014) apud Franco e Motta (2020)

Para a caracterização frente a fadiga, o Manual de Utilização do programa *MeDiNa* (2020) cita que o programa permite apenas as relações do número de ciclos com a deformação específica resiliente de tração, conforme a Equação 14.

$$N_{fad} = k_1 * \varepsilon_t^{k_2} \quad (14)$$

O programa ainda retorna como resultado de cada análise a evolução mensal dos danos por fadiga, o resumo da deformação permanente ao final do período analisado e as bacias de deflexão estimadas para controle executivo.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados o planejamento adotado, os materiais utilizados, os ensaios realizados e a metodologia de simulação computacional para que os objetivos da pesquisa fossem atingidos.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

De um trecho monitorado já em operação, localizado na BR-116/RS, nas proximidades de Pelotas/RS, fez-se a coleta dos seguintes materiais: Ligantes asfálticos, agregados e concreto asfáltico usinado. A caracterização do ligante asfáltico, monitoramento do trecho e a caracterização das misturas usinadas foram realizadas no estudo de Vestena (2021).

A partir da coleta dos agregados e ligantes asfálticos, a pesquisa deste trabalho foi realizada reproduzindo em laboratório as mesmas características das misturas de campo estudadas por Vestena (2021) e executando os ensaios de módulo de rigidez, fadiga e deformação permanente. Na sequência, esses dados foram introduzidos em uma metodologia de análise e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos, realizados pelo programa *MeDiNa* (Método de Dimensionamento Nacional). A Figura 16 ilustra o planejamento adotado.

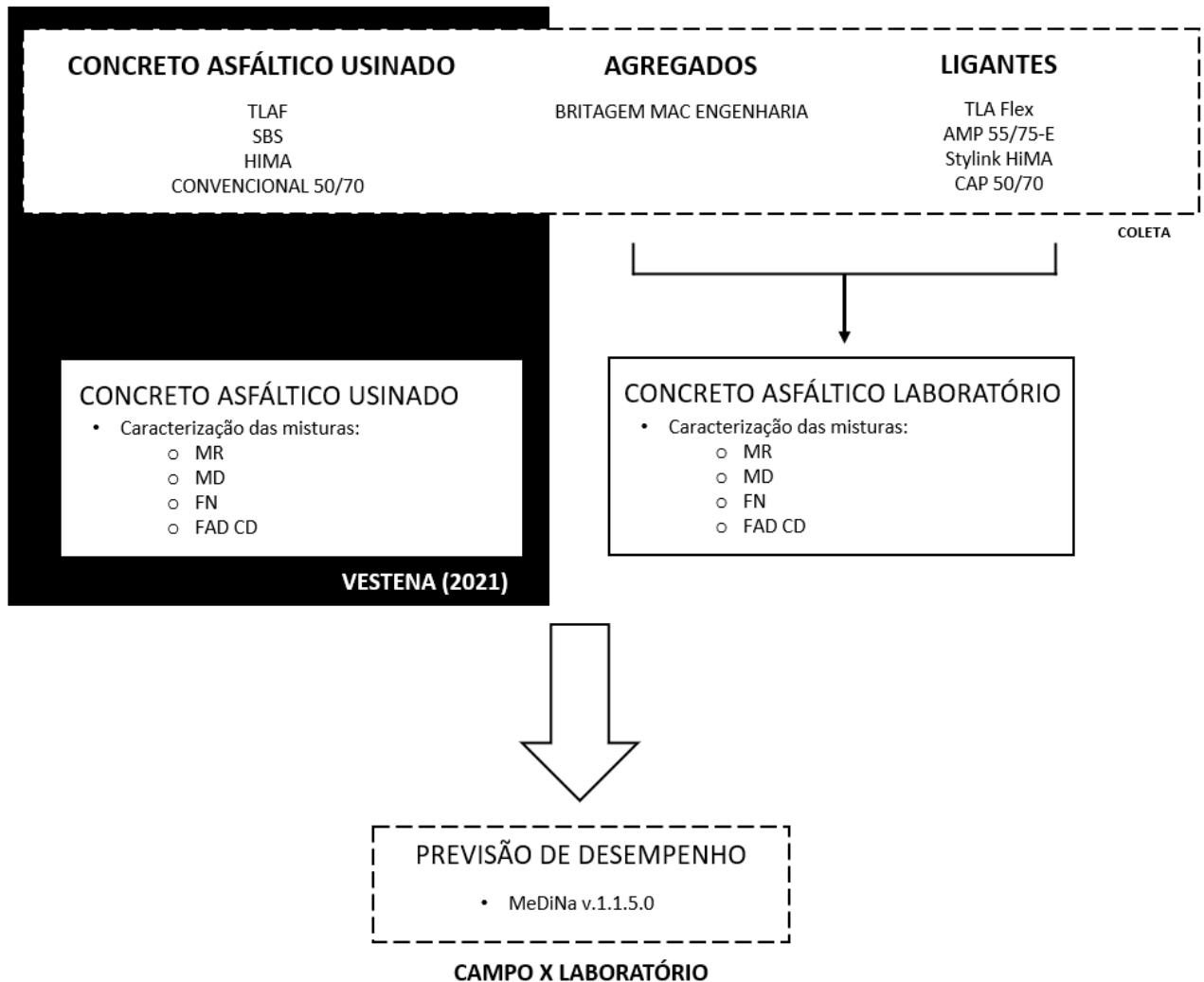
Após o processo de quarteamento dos agregados, fez-se o peneiramento do material para ajuste granulométrico, mistura com o ligante asfáltico e a moldagem dos corpos de prova. Ao final de todo processo, foram moldadas 23 amostras por mistura, totalizando 92 corpos de prova moldados. A Tabela 4 expõe o volume de trabalho realizado para esta pesquisa.

Tabela 4 – Quantidade de amostras, dimensões e volume dos corpos de prova

Ensaio	Número de corpos de prova	Dimensões (d x h)	Volume de Vazios
Módulo de Resiliência	3	10 x 6,4 cm	4,0 ± 1,0 %
Módulo Complexo	3	10 x 15 cm	5,5 ± 0,5 %
<i>Flow Number</i>	2	10 x 15 cm	7,0 ± 0,5 %
Fadiga Compressão Diametral	15	10 x 6,3 cm	4,0 ± 0,5%
Total por mistura	23		
Total da pesquisa	92		

Fonte: Autor

Figura 16 – Planejamento da pesquisa



Fonte: Autor

Com a coleta já realizada por Vestena (2021) e estocagem do material nas dependências do GEPPASV/UFSM, iniciou-se as ações necessárias. O planejamento foi dividido em duas fases laboratoriais, subdivididas em etapas de preparação de amostras e ensaios, além de uma última fase de compilação e análise de dados. A seguir estão apresentadas as fases:

a) Fase laboratorial – Preparação de amostras:

- Peneiramento dos agregados para encaixe granulométrico idêntico ao encontrado em Vestena (2021);
- Moldagens de corpos de prova com respectivos teores de betume encontrados em Vestena (2021)
- Verificação do volume de vazios dos corpos de prova segundo as normas estabelecidas

- b) Fase laboratorial – Ensaios:
- Realização dos ensaios de rigidez: Módulo Dinâmico e Módulo de Resiliência
  - Realização dos ensaios de resistência a deformação permanente: Flow Number.
  - Realização dos ensaios de fadiga: Fadiga por compressão diametral
- c) Fase compilação e análise de dados:
- Modelagem LVE (2S2P1D e Sigmoidal);
  - Ajustes coeficientes de Francken;
  - Comparativo com dados encontrados em Vestena (2021);
  - Simulação pelo software *MeDiNa*

## 3.2 MATERIAIS

Esse item trata da caracterização de cada material utilizado na pesquisa. A abordagem mais detalhada, encontra-se nos estudos de Vestena (2021), onde tem-se a completa caracterização do trecho experimental, bem como suas estruturas, dados de tráfego e clima, avaliação funcional e levantamento das patologias encontradas em campo.

Para efetuar a simulação pelo software *MeDiNa*, deve-se estabelecer as caracterizações necessárias para termos resultados qualitativos e fiéis com os fenômenos encontrados em campo. A partir disso, faz-se necessária a abordagem do trecho experimental, bem como suas estruturas do pavimento caracterização dos materiais empregados.

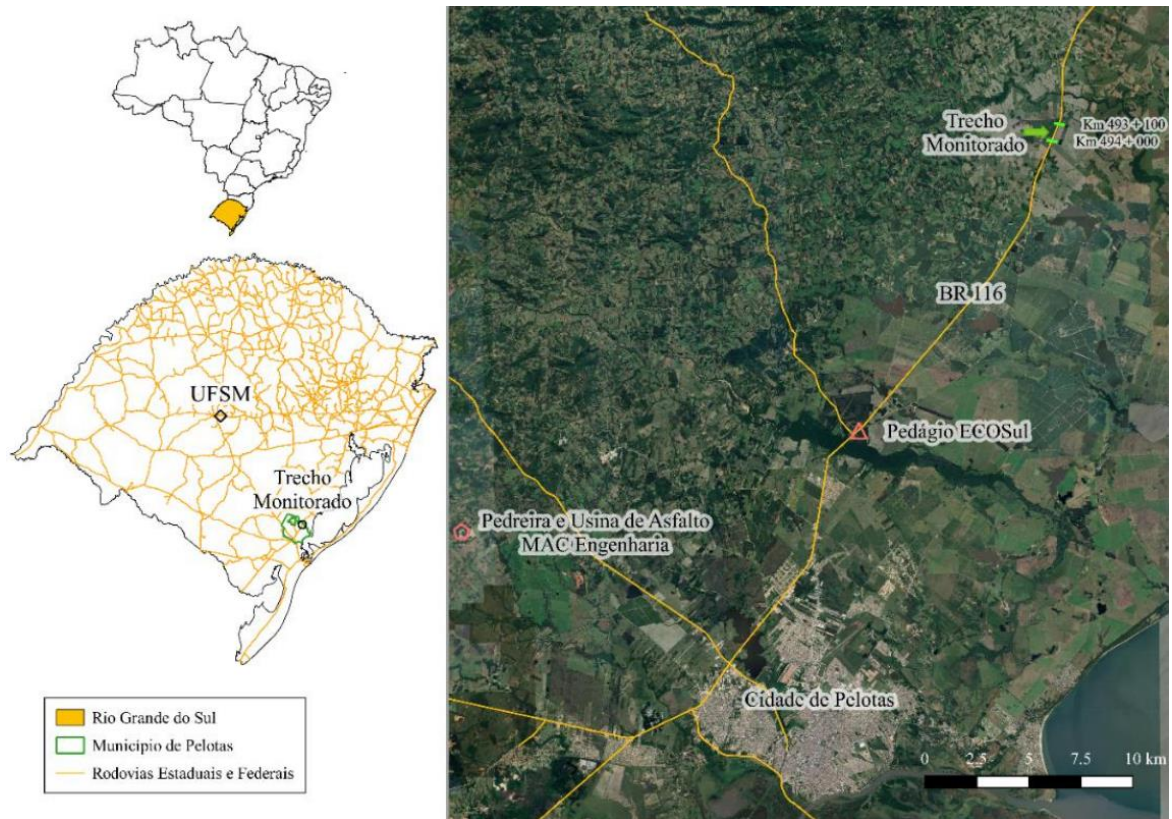
Salienta-se também que os agregados britados, tanto do material de sub-base, base e misturas asfálticas, bem como a usinagem das misturas asfálticas (VESTENA, 2021) são provenientes da mesma pedreira e usina de asfalto.

### 3.2.1 Características e estrutura do trecho experimental

O trecho experimental abordado neste estudo, é oriundo de um trecho monitorado em operação na BR 116/RS, aberto ao tráfego em 12 de agosto de 2019, cerca de 30 km da cidade de Pelotas. Caracteriza-se por ser uma importante via de acesso ao porto marítimo de Rio Grande/RS, ligando a região metropolitana ao escoamento de cargas ao porto. A Figura 17 ilustra a localização descrita acima. Trata-se de um trecho de duplicação da BR 116/RS, de responsabilidade de execução pela MAC Engenharia, de coordenadas geográficas 31 29' 37'' S, 52 12' 53'' O, com altitude de 29 metros acima do nível do mar. A via apresenta pista dupla

com duas faixas para cada sentido do tráfego, entre os km 494+000 e 493+100, divididos em três segmentos de 300 metros, sentido Pelotas-Porto Alegre/RS.

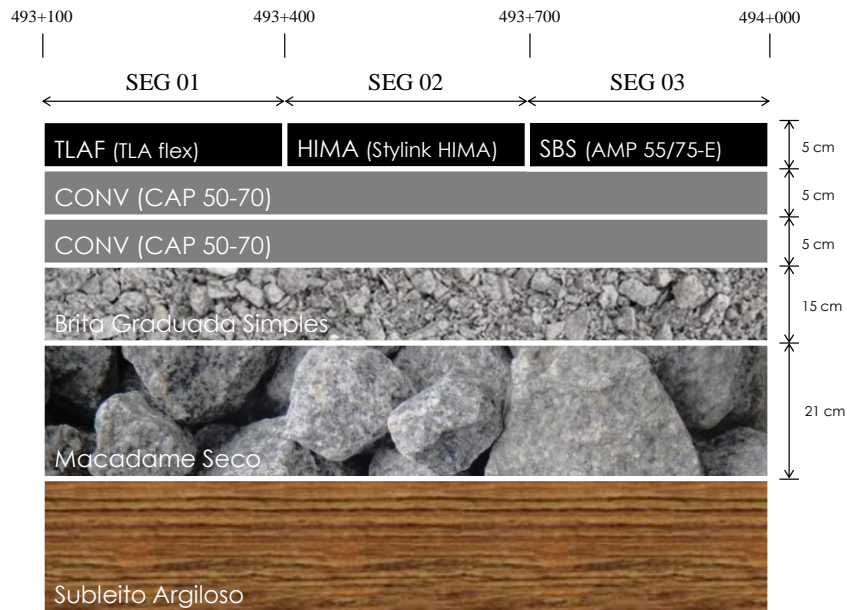
Figura 17 – Localização do trecho monitorado



Fonte: Vestena (2021)

Em relação à estrutura do trecho, ilustrado na Figura 18, tem-se os segmentos compostos por subleito argiloso, 21 cm de macadame seco de sub-base, 15 cm de brita graduada simples (BGS), duas camadas de 5 cm de mistura asfáltica de *binder* com asfalto convencional (ligante CAP 50-70), com a mistura denominada CONV, e uma camada final de rolamento de 5 cm de asfalto modificado.

Figura 18 – Estrutura dos segmentos monitorados



Fonte: Vestena (2021)

A divisão foi realizada em três segmentos de 300 m cada, onde cada camada final de rolamento possui um asfalto modificado diferente. O segmento 01, onde foi utilizado ligante TLAFlex, possui a mistura denominada TLAF; o segmento 02, com asfalto polimérico altamente modificado por SBS (Stylink HiMA, AMP 65/90-E), possui a mistura denominada HIMA; e o segmento 03, onde foi utilizado asfalto polimérico SBS (AMP 55/75-E), possui a mistura denominada SBS. A Figura 19 representa a segmentação in loco

Figura 19 – Trecho monitorado: (a) Segmento 01; (b) Segmento 02; (c) Segmento 03



Fonte: Vestena (2021)

Quanto ao tráfego, salienta-se a importância da existência de uma praça de pedágio da Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S. A., ECOSul, localização também evidenciada na Figura 17, seguida de um posto de pesagem da ANTT, a 17 km ao sul dos segmentos tem relevância na escolha da localização dos segmentos. Dessa forma, os dados de contagem da Praça Retiro, sentido Porto Alegre/RS, desde a abertura em 12/08/2019 até 31/07/2021 foram disponibilizados pela empresa, e utilizados na determinação do tráfego presente na rodovia.

Os valores utilizados para número N de tráfego nas simulações computacionais foram os mesmos utilizados em Vestena (2021). Toda metodologia de cálculo, valores de Volume Diário Médio (VDM) estão expostos na pesquisa de Vestena (2021).

### 3.2.2 Subleito, Sub-base e Base

Os módulos (MR) do subleito, base e sub-base foram determinados por retroanálise utilizando os resultados dos levantamentos deflectométricos do equipamento de FWD, para cada um dos segmentos separadamente. Esse levantamento foi realizado logo antes à abertura ao tráfego. Concomitante a isso, foram realizados ensaios triaxiais para determinação dos módulos não-lineares (VESTENA, 2021).

Quanto ao material de subleito, ilustrado na Figura 20, coletado junto ao aterro da rodovia, no km 493+100, foi caracterizado no trabalho de Santos (2020), resumido na tabela. De acordo com a caracterização SUCS, esse material é designado como argila inorgânica de baixa e média plasticidade. Pela classificação da AASHTO/TRB, esse material não apresenta bom comportamento como subleito rodoviário, tendendo a ter um comportamento expansivo (A-7- 6).

Figura 20 – Ponto de coleta do material de subleito utilizado no trecho



Fonte: Santos (2020)

Pela classificação MCT para solos tropicais, esse apresenta comportamento solo argiloso não-laterítico (NG'). Segundo Nogami e Villibor (2000), solos NG' não são adequados para utilização como base ou sub-base pela sua elevada plasticidade, compressibilidade e expansibilidade. É considerado o sexto na ordem de prioridade, das sete classes MCT, para emprego em subleitos rodoviários segundo Nogami e Villibor (1995). Os solos do grupo laterítico argiloso (LG') tendem a apresentarem um bom comportamento ao serem empregados em subleitos rodoviários. Dessa forma, ao classificar esse material de acordo com a MCT-M, proposta por Vertamatti (1998), constatou-se que esse está no grupo de solos argilosos transicionais (TG'), situando-se entre o LG' e NG', podendo apresentar características dos dois grupos.

Com base na massa específica aparente seca máxima e na umidade ótima ( $W_{ótima}$ ), a autora compactou três corpos de prova na energia intermediária, utilizando compactador mecânico por impacto, seguindo os preceitos da norma DNIT 134 ME (DNIT, 2018a). Além disso, a autora avaliou a condição de amostra moldada na condição umidade ótima, e acrescentado 2% de água ao material ( $W_{ótima+2\%}$ ), e moldou corpos de prova com 2% a mais de umidade, adicionando mais 2% de umidade ( $W_{ótima+4\%}$ ). Essas foram as metodologias utilizadas para obtenção dos resultados de módulo de resiliência triaxial pelo modelo composto, em que os módulos típicos ( $\sigma_3 = 0,05$  MPa e  $\sigma_d = 0,10$  MPa) encontrados estão também apresentados na Tabela 5. Os valores dos coeficientes do modelo composto de módulo de resiliência e do modelo de Guimarães (2009) de deformação permanente estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 – Caracterização do material de subleito do trecho

Propriedade	Resultado	Propriedade	Resultado	
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,649	Energia de compactação	Intermediária	
Limite de Liquidez (%)	47	Molde tripartido ( $d \times h$ )	10 x 20 cm	
Limite de Plasticidade (%)	25	Massa específica aparente seca	1780	
Índice de Plasticidade (%)	22	máxima (kg/m <sup>3</sup> )		
Classificação Textural	Areia argilosa	Umidade ótima (%)	16,90	
Classificação SUCS	CL	Expansão (%)	1,50	
Classificação AASHTO/TRB	A-7-6	mini-CBR (%)	16,4 <sup>1</sup> /20,7 <sup>2</sup>	
Classificação MCT	NG'	Módulo de Resiliência <sup>3</sup> (MPa)	$W_{ótima}$	365
Classificação MCT-M	TG'		$W_{ótima+2\%}$	89
Classificação Resiliente	Tipo I		$W_{ótima+4\%}$	66

Nota: <sup>1</sup> método das correlações; <sup>2</sup> método das cargas padrão; <sup>3</sup> módulos típicos ( $\sigma_3 = 0,05$  MPa e  $\sigma_d = 0,10$  MPa)  
Fonte: Santos (2020)



Tabela 6 – Coeficientes de Módulo de Resiliência e deformação permanente do subleito

Material	Coefficientes MR	R <sup>2</sup>	Coefficientes $\epsilon_p$	R <sup>2</sup>
$W_{\acute{o}tima}$	$k_1 = 403,47$ $k_2 = 0,157$ $k_3 = -0,161$	0,78	$\psi_1 = 0,029$ $\psi_2 = -0,706$ $\psi_3 = 2,005$ $\psi_4 = 0,098$	0,97
$W_{\acute{o}tima+2\%}$ (Subleito SEG02 e SEG03)	$k_1 = 80,18$ $k_2 = 0,293$ $k_3 = -0,427$	0,94	$\psi_1 = 0,182$ $\psi_2 = -0,332$ $\psi_3 = 2,328$ $\psi_4 = 0,101$	0,91
$W_{\acute{o}tima+4\%}$ (Subleito SEG01)	$k_1 = 39,34$ $k_2 = 0,184$ $k_3 = -0,466$	0,74	$\psi_1 = 0,472$ $\psi_2 = 0,178$ $\psi_3 = 1,803$ $\psi_4 = 0,161$	0,63

Fonte: Santos (2020) apud Vestena (2021)

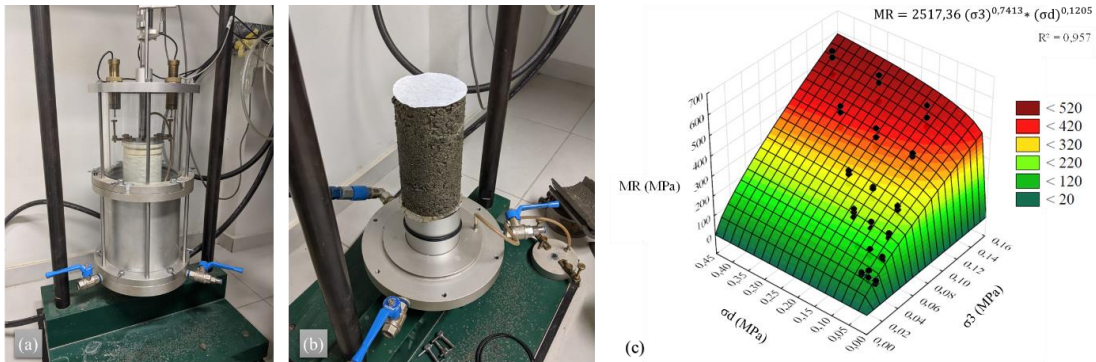
Quanto ao material constituído na BGS, tem-se a caracterização abordada em Vestena (2021), onde foi-se coletado material e levado ao laboratório, com a finalidade de verificação do seu módulo de resiliência pelo equipamento triaxial de cargas repetidas. A caracterização faz parte das informações necessárias que o programa *MeDiNa* requisita para a estrutura do pavimento.

Assim, em laboratório, o material foi quarteado e passado na peneira 1”, para melhorar a homogeneidade. A umidade aplicada e densidade objetivada foram as encontradas nos laudos de execução, tentando reproduzir o que ocorreu em campo. Seguindo as recomendações da norma DNIT 134 ME (DNIT, 2018a), amostras foram compactadas por impacto no molde tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na energia modificada, em dez camadas uniformes, com 56 golpes por camada (Figura 21.a).

Os resultados do ensaio foram aplicados no programa *Statistica* v.10, e a partir de uma regressão múltipla não-linear, foram obtidos os coeficientes do modelo composto de MR, em que  $k_1 = 2517,36$ ;  $k_2 = 0,7413$ ;  $k_3 = 0,1205$  e  $R^2 = 0,957$  (Figura 21.c).



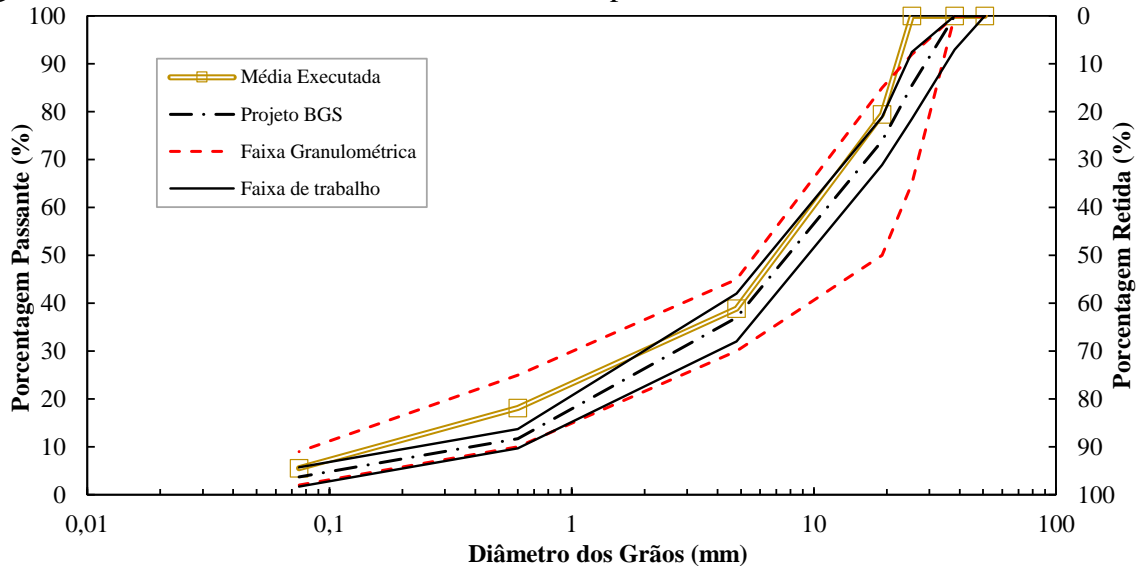
Figura 21 – Ensaio triaxial na BGS: (a) equipamento; (b) material; (c) modelo composto



Fonte: Vestena (2021)

A granulometria média da execução da BGS, assim como a faixa granulométrica e de trabalho estão apresentadas na Figura 22. Nota-se que a BGS ficou dentro da faixa de trabalho, a exceção da peneira mais graúda, que ficou mais fina do que deveria, e da penúltima peneira, ainda assim dentro da faixa granulométrica estabelecida. A curva de compactação desenvolvida pela empresa resultou em umidade ótima de 9,00%, e massa específica aparente seca máxima de 2230 kg/m<sup>3</sup> (MAC ENGENHARIA e TARDELLI, 2014b), porém os laudos de execução apontaram uma umidade de 7,05%, e uma densidade de 2252 kg/m<sup>3</sup> (ENECON, 2014).

Figura 22 – Granulometria da Brita Graduada Simples



Fonte: Mac Engenharia e Tardelli (2014b)

### 3.2.3 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas usinadas de Vestena (2021) e as misturas asfálticas reproduzidas em laboratório desta pesquisa, são oriundas da britagem e usina de material asfáltico da empresa MAC Engenharia, situada cerca de 25 km distante do local do trecho monitorado. As características de usinagem, aparelhagem dos tanques, metodologia de coleta e descrição da usina em questão, é descrita detalhadamente em Vestena (2021)

Quanto aos agregados utilizados, temos sua origem da bancada de detonação (Figura 23.a). As rochas passam pelo britador primário de mandíbula, e seguem por dois britadores cônicos que dão forma ao agregado, antes de seguir para as pilhas de brita 3/4", pedrisco e pó-de-pedra (Figura 23.b).

Figura 23 – Britagem: (a) bancadas de detonação; (b) britagem



Fonte: Vestena (2021)

A coleta dos agregados e ligantes asfálticos que compõem esta pesquisa foram extraídos na Britagem MAC Engenharia, porém cada material foi coletado separadamente, já a coleta dos materiais da pesquisa de Vestena (2021) ocorreram na fase de execução, sendo realizada na vibroacabadora e estocada em tonéis. As caracterizações relacionadas aos agregados foram realizadas pela empresa da obra, resumidos na Tabela 7.

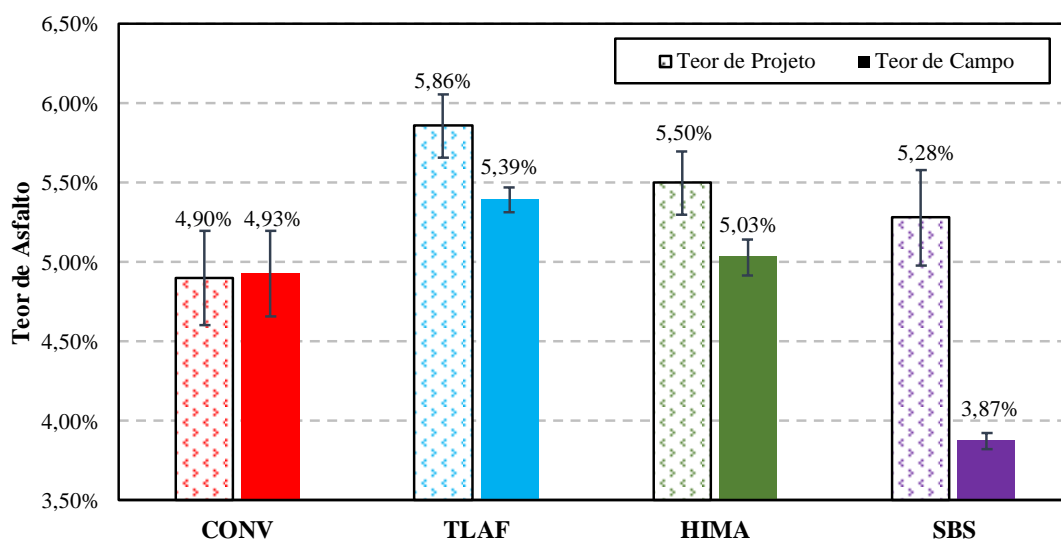
Tabela 7 – Caracterização dos agregados utilizados nas misturas asfálticas de campo (Vestena, 2021) e laboratório

Propriedade	Norma	Resultado
Densidade Agregado - Brita 3/4	ASTM C 127	Gsa = 2,671; Gsb = 2,649; Gse = 2,660
Densidade Agregado - Pedristo 3/8	ASTM C 128	Gsa = 2,655; Gsb = 2,630; Gse = 2,643
Densidade Agregado - Pó de pedra		Gsa = 2,654; Gsb = 2,623; Gse = 2,639
Equivalente de Areia	DNER ME 054/97	68,80%
Adesividade do Agregado Graúdo	NBR 14329	Satisfatória com de 0,10% de CAP FIX*
Desgaste por Abrasão (Los Angeles)	DNER-ME 035/98	Graduação B - 33,5%
Absorção de Água	ASTM C 1252	A = 0,31%; B = 0,36%; C = 0,45%
Índice de Forma	ASTM D 4791	Pedrisco = 22
Durabilidade por Solução de Sulfato de Sódio	DNER ME 089	Graúdo = 2,33%; Miúdo = 6,25%

Fonte: Betunel 2018<sup>a</sup>, 2018b, 2018c

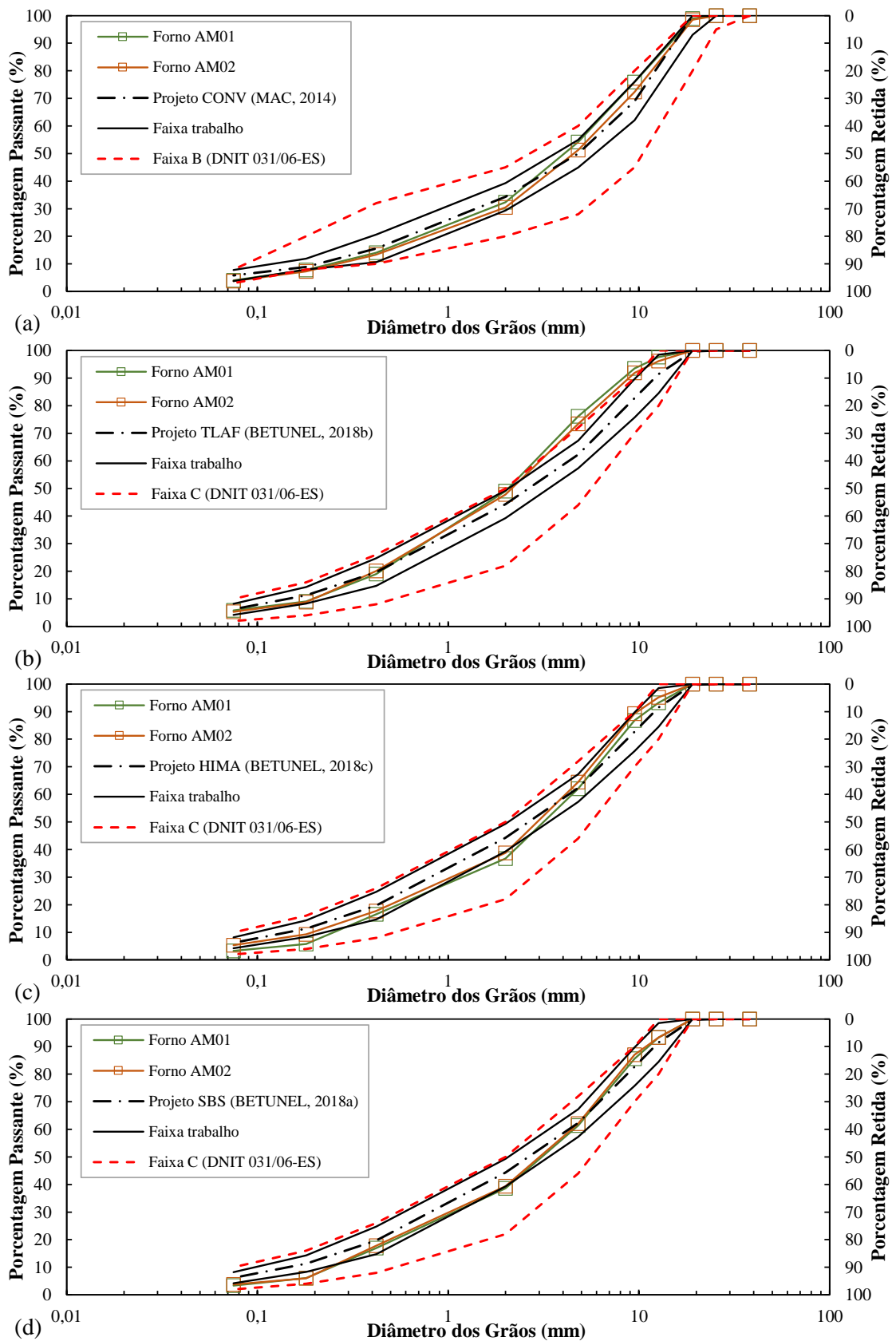
Em Vestena (2021), após a realização da extração de ligante pelo método do forno de ignição (ASTM D 6307, 2019), identificou-se os teores encontrados nas misturas de campo (Figura 24). Em seguida, realizou-se a granulometria das amostras submetidas ao forno (Figura 25). As coletas das misturas asfálticas consistem em uma amostragem apenas e não necessariamente representam o panorama de todo trecho experimental.

Figura 24 – Teores de asfalto para as misturas asfálticas



Fonte: Vestena (2021)

Figura 25 – Granulometria das misturas asfálticas: (a) CONV; (b) TLAf; (c) HIMA; (d) SBS



Fonte: Vestena (2021)

A granulometria realizada compreendeu os limites propostos de projeto, bem como faixas de trabalho e faixas granulométricas, sendo enquadradas nas faixas C DNIT para TLAF, HIMA e SBS, e faixa B DNIT para CONV.

Tendo em vista que o objetivo desta pesquisa, é a reprodução em laboratório dos materiais encontrados em campo, frente as simulações computacionais do programa MeDiNa, a moldagem dos corpos de prova para os ensaios necessários foi estabelecida nos teores encontrados pela extração do forno de ignição.

Inicialmente fez-se o peneiramento manual dos agregados coletados na britagem. Em seguida, na fase de preparação dos corpos de prova, utilizou-se o misturador Infratest Testing System, modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version*, onde a homogeneização do ligante virgem coletado e agregados fora realizada. A mistura ocorreu nas temperaturas de mistura encontradas nos laudos (MAC ENGENHARIA e TARDELLI, 2014; BETUNEL 2018a, 2018b, 2018c).

Após mistura do material, iniciou-se o envelhecimento em estufa, na temperatura de compactação por duas horas. A compactação do material reproduzido em laboratório, fez-se por meio do compactador giratório *Servopac Gyratoy Compactor*, Figura 26.a, seguindo o volume de vazios indicado por norma de cada ensaio. As dimensões e volume de vazios reproduzidos nos corpos de prova encontram-se na Tabela 4.

As amostras de Módulo de Resiliência e fadiga à compressão diametral foram moldadas na altura especificada. Por outro lado, as amostras para Módulo Complexo e *Flow Number* foram moldadas com 16 cm de altura e depois retificadas até a altura indicada (Figura 26.b), garantindo assim uma melhor homogeneização dos agregados dentro do corpo de prova cilíndrico.

Figura 26 - Preparação da amostra: (a) Compactador giratório; (b) Amostra retificada



Fonte: Vestena (2021)

### 3.2.4 Ligantes Asfálticos

Os ligantes asfálticos CAP 50-70, TLAflex, Stylink HiMA (AMP 65/90-E) e AMP 55/75-E utilizados na execução das camadas do pavimento foram coletados na usina, e transportados para o GEPPASV, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM, onde foram estocados em latas de volume 4 litros. Posteriormente foram aquecidas e alocadas em latas menores, Figura 27, visando diminuir o envelhecimento do material devido a processos sistemáticos de aquecimentos para utilização nos ensaios (VESTENA,2021)

Figura 27 - Latas de ligantes asfálticos



Fonte: Vestena (2021)

A Tabela 8 apresenta as informações contidas no laudo disponibilizado pelo fornecedor dos ligantes asfálticos. Em Vestena (2021), tem-se toda a caracterização dos ligantes utilizados, quanto ao Performance Grade de alta temperatura (PGH), *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), *Linear Amplitude Sweep* (LAS) e caracterização do domínio LVE por suas curvas mestras de módulo dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) modelados pela teoria 2S2P1D. O autor ainda concluiu que houve poucas correlações de Fator de Fadiga de Ligante (FFL) e Fator de Fadiga da Mistura (FFM) devido ao teor insuficiente de ligante nas misturas asfálticas (Figura 24)

Tabela 8 - Informações contidas no laudo dos ligantes

Propriedade	Norma	Resultados Laudo			
		TLA Flex	Stylink HiMA	Stylink AMP 55/75-E	CAP 50-70
Performance Grade	AASHTO M320/17	-	82-28	70-22	-
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	31	44	63	-
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR 6560	69	82	57	-
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341/14	>235	>235	>235	-
Recuperação Elástica (%)	NBR 15086	81	96	80	-
Densidade Relativa a 20/4 °C	NBR 6296	1,082	1,015	1,008	1,013
Estabilidade a Estocagem (diferença °C)	NBR 15166	-	2	2	-
Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm (cP)	NBR 15184/04	1880	1503	860	-
Viscosidade Brookfield a 150°C, 50 rpm (cP)	NBR 15184/04	920	647	424	-
Viscosidade Brookfield a 177°C, 100 rpm (cP)	NBR 15184/04	312	222	203	-
Temperatura de Mistura (°C)	-	174 ± 3	163 ± 3	164 ± 3	158 ± 3
Temperatura de Compactação (°C)	-	164 ± 3	148 ± 3	143 ± 3	146 ± 3
Teor ótimo de Projeto, Método Marshall (%)		5,86 ± 0,20	5,50 ± 0,20	5,28 ± 0,30	4,90 ± 0,30
Adesividade		Satisfatória com adição de 0,10% CAP FIX			-

Fonte: Mac Engenharia e Tardelli, 2014a; Betunel 2018a, 2018b, 2018c.

### 3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

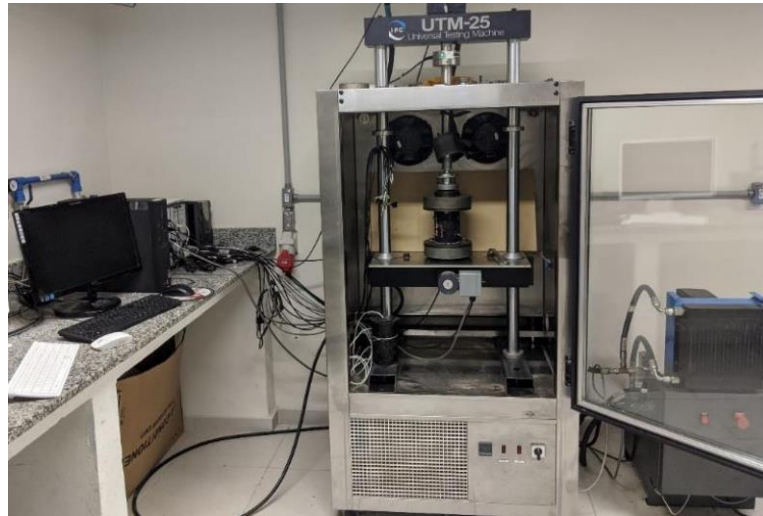
A seguir, estão apresentadas as metodologias referentes aos ensaios realizados nas amostras de misturas asfálticas, sendo elas para caracterização quanto à rigidez: Módulo de Resiliência e Módulo Complexo; quanto à deformação permanente: *Flow Number*; e quanto ao comportamento à fadiga: Fadiga à compressão diametral.

Os ensaios foram realizados na prensa servo-hidráulica *Universal Testing Machine* (UTM-25), do GEPPASV/UFSM, Figura 28, fabricada pela IPC Global.

Ambas pesquisas, de Vestena (2021) contendo as características de usinagem no envelhecimento das misturas asfálticas, e a presente pesquisa contendo características laboratoriais de envelhecimento, foram realizadas no mesmo equipamento, sob as mesmas características de condicionamento, anulando assim um possível erro por equipamento.



Figura 28 – Prensa servo-hidráulica UTM-25



Fonte: Autor

### 3.3.1 Módulo de Resiliência

No desenvolvimento do *SisPav*, Franco (2007) cita que, o módulo de resiliência, por ser muito difundido no Brasil, é utilizado frequentemente em análises teóricas ou mecânicas. Os resultados dos ensaios obtidos pelos diversos laboratórios brasileiros, a princípio, podem ser comparados, pois, em geral, utilizam equipamentos similares e seguem uma mesma norma técnica. Dessa forma, o módulo de resiliência foi escolhido para representar o comportamento mecânico dos materiais asfálticos no método proposto na sua pesquisa.

Para caracterizarmos a rigidez de misturas asfálticas pelo módulo de resiliência, temos a normativa brasileira do DNIT 135/2018, onde define matematicamente esse conceito, encontrado na Equação 15.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,997\mu) \quad (15)$$

Onde:

P: carga cíclica, em Newtons (N).

|\Delta H|: deslocamento horizontal na interseção das duas tangentes, em mm.

t: altura do corpo de prova, em mm.

\mu: coeficiente de Poisson.



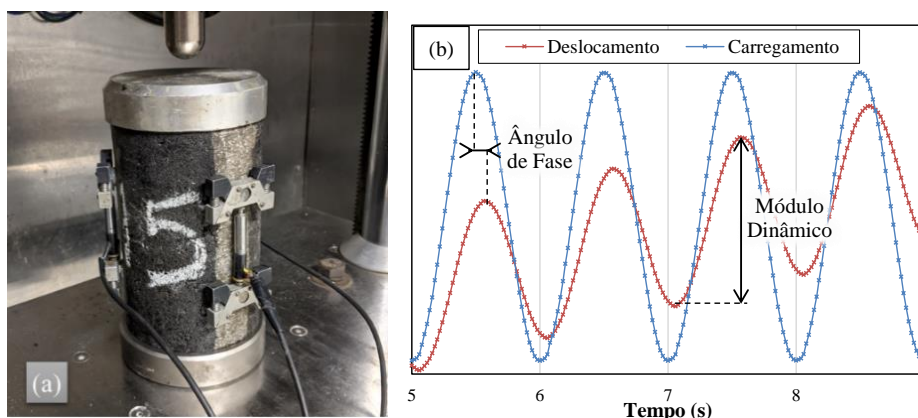
Foram moldados três corpos de prova por mistura, sendo cada amostra ensaiada em duas direções,  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . O formato dos corpos de prova é cilíndrico com diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm, altura de 6,3 cm, e volume de vazios de  $4 \pm 1\%$ . As amostras foram ensaiadas na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , com aplicação de uma carga diametral à amostra, de 0,1 s de carga e repouso de 0,9 s. O ensaio se dá no regime viscoelástico da mistura, porém captura apenas a parcela elástica dos resultados.

### 3.3.2 Módulo Dinâmico

As amostras moldadas reproduzidas em laboratório, depois de serem retificadas, apresentam 10 cm de diâmetro por 15 cm de altura, com  $5,5 \pm 0,5\%$  de vazios em seu interior, sendo que foram utilizadas três amostras para determinação das propriedades de cada mistura. Então são colados pinos de suporte para os extensômetros de precisão *Linear Variable Differential Transformer* (LVDTs).

Assim, o ensaio de Módulo Complexo (Figura 29.a) foi utilizado para avaliar uma vasta gama de temperaturas ( $-10^\circ\text{C}$ ,  $4^\circ\text{C}$ ,  $21^\circ\text{C}$ ,  $37^\circ\text{C}$  e  $54^\circ\text{C}$ ) e frequências de aplicação de carga (0,01 Hz; 0,1 Hz; 0,2 Hz; 0,5 Hz; 1 Hz; 2 Hz; 5 Hz; 10 Hz; 20 Hz e 25 Hz), dentro do intervalo linear viscoelástico, entre 50 a 75  $\mu\text{S}$ . Seguiu a norma AASHTO T 342 (2011) na prensa hidráulica UTM-25, aplicando tensões axiais de compressão cíclicas de forma a caracterizar o material quanto a sua rigidez. Foram ensaiadas da menor para a maior temperatura, respeitando um período de condicionamento de temperatura na câmara por pelo menos 12 horas.

Figura 29 - Módulo complexo (a) Ensaio; (b) Representação das variáveis



Fonte: Vestena (2021)

Segundo o manual IPC Global (2011) da prensa hidráulica, a determinação do módulo dinâmico e ângulo de fase se dá pelas Equação 16 e Equação 17, e sua representação está apresentada na Figura 29.b.

$$|E^*(\omega)| = \frac{|Y_1^*| * G}{|\overline{Y_D^*}| * A} = \frac{\sigma_{\text{pico}}}{\varepsilon_{\text{pico}}} \quad (16)$$

$$|\theta(\omega)| = \arctan^2 \left( -\frac{B_j}{A_j} \right) \quad (17)$$

Onde:

$E^*(\omega)$ : módulo dinâmico na dada frequência (MPa);

$\theta(\omega)$ : ângulo de fase na dada frequência (°);

$A_j$  e  $B_j$ : componentes retangulares;

$$|Y_j^*| = \sqrt{A_j^2 + B_j^2};$$

$|Y_1^*|$ : amplitude de carregamento (N);

$|\overline{Y_D^*}|$ : média da amplitude dos deslocamentos (mm);

G: deslocamento do pistão (mm);

A: área da seção da amostra (mm<sup>2</sup>).

### 3.3.3 Flow Number

Para a de determinação da resistência por deformação permanente dos materiais asfálticos, foi realizado o ensaio de *Flow Number*, Figura 30, seguindo a DNIT 184 ME (DNIT, 2018d). As amostras cilíndricas de 10 cm de diâmetro por 15 cm de altura se dão na condição de  $97 \pm 0,5\%$  de grau de compactação, equivalente a  $7 \pm 0,5\%$  de vazios pela norma americana (AASHTO T 342, 2011), analisando a situação de compactação mínima em campo, ou seja, a mais crítica. Ao menos duas amostras foram moldadas para este ensaio para cada mistura.

O ensaio consiste na aplicação de uniaxial cíclica de cargas de 204 kPa, com aplicação de 0,1 s e repouso de 0,9 s, em corpos de prova não confinados em temperatura de 60 °C. Dois *LVDTs* verticais são posicionados acima da amostra, relatando dados de deformação

permanente acumulada ( $\varepsilon_p$ ). O critério de término do ensaio se dá por ou atingir 7.200 ciclos, ou 5% da deformação da amostra.

Feita a média de deformação entre os dois *LVDTs*, foi aplicado o modelo matemático de Francken em cada amostra. Esse é formado pela soma entre uma função de potência e uma exponencial, conforme Equação 18, em que os coeficientes *A* e *B* estão relacionados às zonas primária e secundária, enquanto *C* e *D* ao comportamento da zona terciária.

$$\varepsilon_p = A * N^B + C(e^{D*N} - 1) \quad (18)$$

Onde:

$\varepsilon_p$ : deformação permanente acumulada;

*N*: número de ciclos;

*A*, *B*, *C*, *D*: constantes a serem calibradas para cada amostra.

Após a determinação dos coeficientes, calculou-se a derivada primeira e segunda da curva de deformações plástica. Desta forma, o valor de *Flow Number* de cada amostra é o valor em que a derivada segunda é igual a zero, passando da zona secundária para a zona terciária. Admitindo-se coeficientes de variação de 10,6% para duas amostras, 8,7% para três amostras, ou 7,5% para quatro amostras (AASHTO T 378, 2017), o *Flow Number* da mistura é a média dos valores encontrados entre as amostras.

Figura 30 - Ensaio de *Flow Number* na amostra



Fonte: Autor

### 3.3.4 Fadiga por Compressão Diametral

Previamente ao ensaio, é determinada a Resistência a Tração por Compressão Diametral (DNIT 136 ME, 2018c), em que uma carga é diametralmente aplicada ao corpo de prova, com pistão em velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, na temperatura de 25 °C, até a ruptura do corpo de prova. (Figura 31)

O ensaio é destrutivo, então as amostras não podem ser utilizadas na aplicação de outro ensaio. A carga de ruptura é calculada pela Equação 19. A média aritmética dos valores obtidos para três corpos de prova é tomada como a resistência da mistura estudada, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de  $\pm 10\%$ . As mesmas amostras do ensaio de Módulo de Resiliência foram utilizadas nesta etapa para cada mistura.

Figura 31 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral



Fonte: Faccin (2018)

$$\sigma_R = \frac{2 * F}{\pi * D * H} \quad (19)$$

Onde:

$\sigma_R$ : resistência a tração da amostra, em MPa;

F: carga de ruptura da amostra, em N;

D: diâmetro do corpo de prova, em mm;

H: altura do corpo de prova, em mm.

O ensaio de fadiga a compressão diametral, realizado na temperatura de 25 °C, consiste na aplicação de pulso de carga de forma próxima da função na Equação 20, com magnitude

variando desde a carga de contato até a carga máxima, e pulso de 0,1 s e descanso de 0,9 s. É aplicada uma carga  $P$ , que gera tensões de tração no corpo de prova, a fim de determinar quatro níveis de tensão (percentagem do RT total da mistura) para cada conjunto de três corpos de prova mínimos, por exemplo 10%, 20%, 30% e 40%. A Figura 32 ilustra a disposição do ensaio.

$$P = \frac{(1 - \cos \theta)}{2} \quad (20)$$

Figura 32 - Ensaio de fadiga à compressão diametral



Fonte: Vestena (2021)

Como a forma de ruptura do ensaio poderia danificar os *LVDTs*, as aferições nas amostras são capturadas apenas até o sexagésimo ciclo, sendo que a deformação ( $\varepsilon_i$ ) utilizada na curva de fadiga é a média entre os ciclos 25 ao 30, 40 ao 45 e 55 ao 60. O critério de escolha do ciclo de falha ( $N_f$ ) é a ruptura total da amostra. O desempenho a fadiga do material é determinado aplicando a Equação 21 nos resultados do ensaio, em que os coeficientes calibrados são utilizados como dados de entrada no programa *MeDiNa*. Para este ensaio, pelo menos doze corpos de prova foram utilizados para a regressão da curva de fadiga, com um  $R^2$  mínimo de 0,8, conforme a DNIT 183 ME (DNIT, 2018d).

$$N_f = K_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{K_2} \quad (21)$$

Onde:

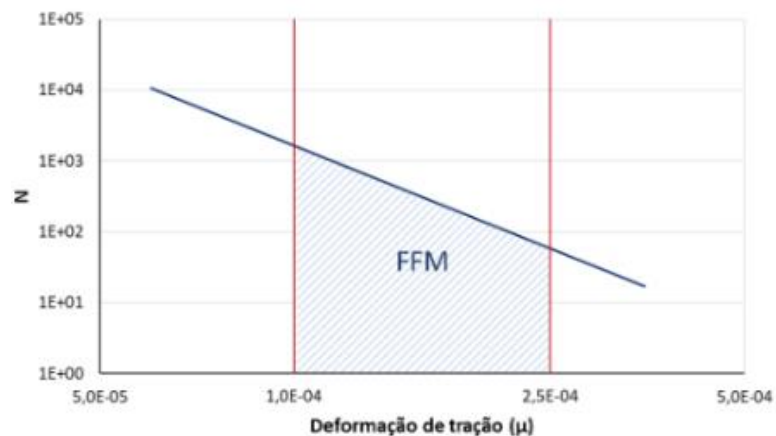
$N_f$ : número de ciclos até a ruptura completa da amostra;

$\epsilon_i$ : deformação de tração inicial;

$K_1$  e  $K_2$ : constantes a serem determinadas para cada mistura.

A nível nacional, a caracterização de misturas pelo parâmetro de fadiga é realizada utilizando o FFM (Fator de Fadiga da Mistura), Figura 33, calculando a área abaixo da curva entre os ciclos e os intervalos de deformação de 100  $\mu$ S a 250  $\mu$ S, sendo realizado pelo ensaio de fadiga à compressão diametral. Os resultados encontrados nesse ensaio são utilizados como dados de entrada no programa *MeDiNa*.

Figura 33 – Fator de fadiga da mistura (FFM)



Fonte: Fritzen et al (2016)

### 3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Visando cumprir os objetivos propostos nesta pesquisa, avaliou-se computacionalmente a vida de projeto da faixa externa dos trechos monitorados pelo programa *MeDiNa*. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de AT(%) encontrados por Vestena (2021), contendo os *inputs* característicos das misturas usinadas.

Todos os outros dados de inserção no *software*, como dados das camadas granulares, tráfego e suas taxas de crescimento fora mantido idêntico ao inserido por Vestena (2021). A diferença de *inputs* está nos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  das misturas asfálticas abordados no item 3.3.4.

A metodologia de simulação numérica adotada em Vestena (2021) consistiu em dividir as espessuras das camadas em dois tipos: As estruturas dos trechos monitorados determinada em projeto, denominada PROJ e espessura encontrada de extrações em campo, denominada ESP.

Outra importante característica foi a diferenciação para as camadas granulares e do subleito. Os módulos resilientes lineares obtidos por retroanálise nos estudos monitoramento do trecho de Vestena (2021), fora denominado RETR. Já os módulos obtidos pelos ensaios triaxiais na BGS, também executado por Vestena (2021) e no subleito laterítico, executado por Santos (2020), fora denominado TRIA. Com a finalidade de assemelhar-se ainda mais as condições de campo, o autor utilizou os materiais ensaiados em Santos (2020) com teores de 2% e 4% acima da umidade ótima.

Vestena (2021) concluiu que as simulações na condição ESP.TRIA Wótima+4% para o SEG 01, e ESP.TRIA Wótima+2% para os SEG 02 e SEG 03, foram as que melhores relacionaram AT(%) com o encontrado em campo. Tal descrição é caracterizada por espessuras das camadas encontrada em campo e utilização dos coeficientes dos módulos obtidos por ensaios triaxiais. As condições descritas foram mais eficientes em prever a área trincada das estruturas, mantendo-se dentro da confiabilidade de 95%. Maiores descrições encontram-se nos estudos de Vestena (2021).

Portanto, as estruturas do pavimento abordada nesta pesquisa, adotou-se também as mesmas estruturas para cada segmento, denominada ESP.TRIA nas umidades excedentes para o subleito, variando seus coeficientes relacionados à fadiga das misturas asfálticas em cada segmento. As condições utilizadas nas análises de área trincada do programa *MeDiNa* estão apresentadas na

Tabela 10, divididas por segmento e os coeficientes relacionados a fadiga das misturas asfálticas estão resumidos na Tabela 9.

Referente ao tráfego, utilizou-se o número  $N_{USACE}$  equivalente a passagens do eixo padrão rodoviário (Eixo Simples de Rodas Duplas, com 80 kN de carga, pressão de pneus de 0,56 Mpa), empregado para uma vida de projeto de 15 anos. O maior detalhamento encontra-se nos estudos de Vestena (2021).

Tabela 9 – Coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  para as misturas asfálticas usina e reproduzidas em laboratório

Mistura	$k_1$	$k_2$
CONV usina <sup>1</sup>	4,74E-12	-3,7745
CONV lab <sup>2</sup>	4,04E-14	-4,3348
TLAF usina <sup>1</sup>	2,09E-17	-5,0984
TLAF lab <sup>2</sup>	3,51E-14	-4,4412
HIMA usina <sup>1</sup>	6,04E-13	-4,1696
HIMA lab <sup>2</sup>	5,51E-14	-4,4675
SBS usina <sup>1</sup>	2,94E-15	-4,5305
SBS lab <sup>2</sup>	8,24E-14	-4,2826

Fonte: <sup>1</sup> Vestena (2021); <sup>2</sup> Autor

Nota: <sup>1</sup> caracterização à fadiga realizada por Vestena (2021); <sup>2</sup> caracterização à fadiga abordada no item 4.1.3

Tabela 10 – Condições aplicadas ao programa *MeDiNa*

SEGMENTO 01 (TLAF)				
Tipo	Espessura (cm) ESP	Módulo (MPa) TRIA ( $k_1, k_2, k_3$ )	C. Poisson	Aderência
TLAF	5,63	De acordo com a mistura	0,30	1
CONV	11,12	De acordo com a mistura	0,30	1
BGS	15	2517,4 / 0,7413 / 0,1205	0,35	0
Mac. Seco	21	330	0,40	0
Subleito	-	39,34 / 0,184 / -0,466	0,45	0
SEGMENTO 02 (HIMA)				
Tipo	Espessura (cm) ESP	Módulo (MPa) TRIA ( $k_1, k_2, k_3$ )	C. Poisson	Aderência
HIMA	5,61	De acordo com a mistura	0,30	1
CONV	11,56	De acordo com a mistura	0,30	1
BGS	15	2517,4 / 0,7413 / 0,1205	0,35	0
Mac. Seco	21	361	0,40	0
Subleito	-	80,18 / 0,293 / -0,427	0,45	0
SEGMENTO 03 (SBS)				
Tipo	Espessura (cm) ESP	Módulo (MPa) TRIA ( $k_1, k_2, k_3$ )	C. Poisson	Aderência
SBS	4,53	De acordo com a mistura	0,30	1
CONV	9,80	De acordo com a mistura	0,30	1
BGS	15	2517,4 / 0,7413 / 0,1205	0,35	0
Mac. Seco	21	263	0,40	0
Subleito	-	80,18 / 0,293 / -0,427	0,45	0

Fonte: Autor

### 3.4.1 Programa *MeDiNa*

Primeiramente desenvolvido por Franco (2007), na antiga versão chamada *SisPav*, o programa *MeDiNa* faz uso da teoria elástica de multicamadas de Burmister, adaptadas à linguagem de programação estabelecida no programa *JULEA*. A versão utilizada na pesquisa é de v.1.1.5.0, de dezembro de 2020. A interface do programa é apresentada na Figura 34.



O programa disponibiliza alguns materiais da sua base de dados, porém, para esta pesquisa, os materiais são escolhidos como “Projeto”, em que se pode definir as propriedades dos materiais. As características de fadiga e módulo de resiliência são os dados essenciais para análise das misturas asfálticas. Seus valores foram obtidos como comentado nos itens 3.3.1 e 3.3.4.

Figura 34 - Interface geral do programa *MeDiNa*

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Pedro Schmidt Ilha EMPRESA: UFSM

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	TLAF lab	5,6	8614	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	CONV lab	11,1	5408	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	BGS Triaxial 2021	15,0	Resiliente Não Linear	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Sub-base SEG 01	21,0	330	0,40
SL	SUBLEITO	Subleito Triaxial Wotima+4% (2020)	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO  
 DADOS DO TRÁFEGO

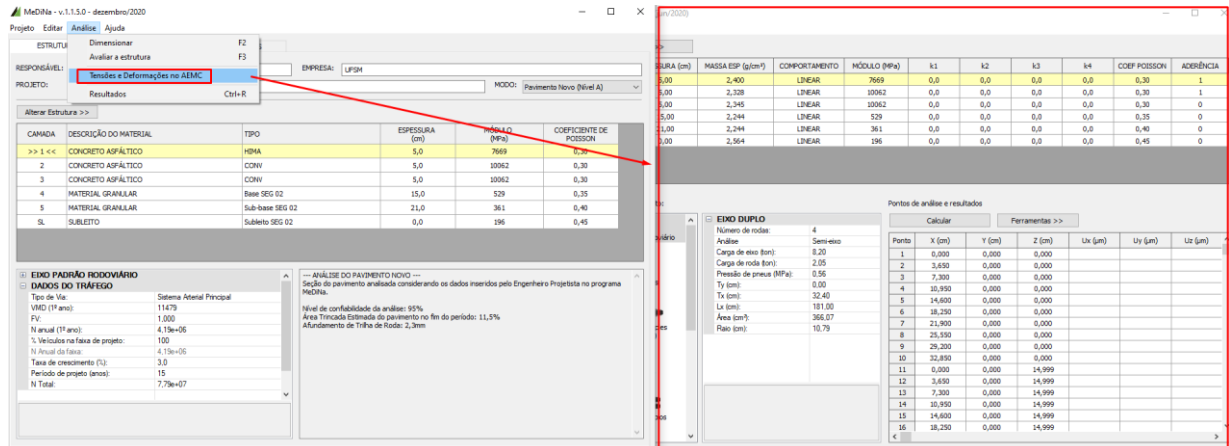
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	11660
FV:	1,000
N anual (1º ano):	4,26e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	4,26e+06
Taxa de crescimento (%):	8,0
Período de projeto (anos):	15
N Total:	1,16e+08

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---  
 Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.  
 Nível de confiabilidade da análise: 95%  
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 98,1%  
 Afundamento de Trilha de Roda: 9,8mm  
 --- ALERTAS ---  
 Tráfego elevado para a estrutura proposta.

Fonte: Autor

A sequência de cálculo do programa está apresentada na sequência. Primeiramente, as tensões, deformações e deslocamentos na estrutura são calculadas utilizando a ferramenta *AEMC*, embutida no programa, como mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Ferramenta AEMC



Fonte: Vestena (2021)

As tensões ocasionadas por uma aplicação unitária de um eixo padrão rodoviário geram deformações nas camadas. Dado um pavimento com camadas asfálticas na superfície do revestimento, uma malha de vinte pontos, dez na superfície (topo), e dez na última fibra de concreto asfáltico (fundo), é gerada. Então, é buscada a deformação de tração nesses vinte pontos considerada a mais negativa entre as direções  $x$ ,  $y$  ou  $z$  ( $e1$ ,  $e2$  ou  $e3$ ) (Figura 36).

Figura 36 – Cálculo das deformações de tração  $e3$  no AEMC

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	$e1$ (m/m)	$e2$ (m/m)	$e3$ (m/m)	$\sigma_{OctNor}$ (MPa)	$\sigma_{OctCis}$ (MPa)
1	0,000	0,000	0,000	0,00000	0,00000	216,83893	9,81311e-05	3,32112e-05	-5,62896e-05	0,479650	0,373466
2	3,650	0,000	0,000	-1,35904	0,00000	217,15146	9,70327e-05	4,82814e-05	-6,22775e-05	0,530673	0,393182
3	7,300	0,000	0,000	-3,13106	0,00000	219,48366	1,04031e-04	5,03456e-05	-1,19172e-05	0,910436	0,279499
4	10,950	0,000	0,000	-5,40872	0,00000	218,36353	1,00348e-04	6,80043e-05	-1,79068e-05	0,961475	0,294379
5	14,600	0,000	0,000	-7,88344	0,00000	215,31803	9,71840e-05	6,66553e-05	-1,59725e-05	0,944992	0,281985
6	18,250	0,000	0,000	-10,27829	0,00000	210,62397	9,37969e-05	6,37679e-05	-1,32834e-05	0,922208	0,266046
7	21,900	0,000	0,000	-12,54077	0,00000	204,30690	9,00312e-05	5,92397e-05	-9,72885e-06	0,891789	0,246052
8	25,550	0,000	0,000	-14,27456	0,00000	195,98049	8,53125e-05	2,89314e-05	5,28271e-06	0,763874	0,198041
9	29,200	0,000	0,000	-15,40930	0,00000	184,72993	7,17628e-05	2,17406e-05	-4,00729e-05	0,341465	0,269838
10	32,850	0,000	0,000	-15,82793	0,00000	175,81623	6,43146e-05	6,32741e-06	-3,02751e-05	0,257978	0,229738
11	0,000	0,000	14,999	0,00000	0,00000	216,85909	6,27539e-05	-3,84692e-05	-9,70784e-05	-0,610375	0,510993
12	3,650	0,000	14,999	1,45347	0,00000	216,61428	6,47358e-05	-4,23989e-05	-9,74988e-05	-0,630232	0,521351
13	7,300	0,000	14,999	3,16252	0,00000	215,72889	6,92988e-05	-5,16235e-05	-9,82866e-05	-0,675925	0,546598
14	10,950	0,000	14,999	5,22869	0,00000	213,86399	7,36178e-05	-6,10041e-05	-9,83804e-05	-0,719154	0,571710
15	14,600	0,000	14,999	7,55555	0,00000	210,66962	7,49453e-05	-6,54264e-05	-9,68693e-05	-0,732432	0,578134
16	18,250	0,000	14,999	9,91949	0,00000	205,97342	7,21398e-05	-6,28351e-05	-9,33132e-05	-0,704412	0,556478
17	21,900	0,000	14,999	12,05383	0,00000	199,81327	6,50851e-05	-5,30735e-05	-8,76154e-05	-0,633938	0,506049
18	25,550	0,000	14,999	13,72764	0,00000	192,44680	5,48029e-05	-3,80787e-05	-8,00742e-05	-0,531191	0,436184
19	29,200	0,000	14,999	14,82186	0,00000	184,29698	4,35669e-05	-2,20442e-05	-7,14856e-05	-0,418939	0,364743
20	32,850	0,000	14,999	15,37405	0,00000	175,80356	3,36366e-05	-8,90961e-06	-6,28700e-05	-0,319829	0,305656

Fonte: Vestena (2021)

A partir dessas deformações, o programa verifica que camada de concreto asfáltico está presente no topo e no fundo das camadas asfálticas, e utiliza os coeficientes  $k1$  e  $k2$  da Como a forma de ruptura do ensaio poderia danificar os LVDTs, as aferições nas amostras são

capturadas apenas até o sexagésimo ciclo, sendo que a deformação ( $\varepsilon_i$ ) utilizada na curva de fadiga é a média entre os ciclos 25 ao 30, 40 ao 45 e 55 ao 60. O critério de escolha do ciclo de falha ( $N_f$ ) é a ruptura total da amostra. O desempenho a fadiga do material é determinado aplicando a Equação 21 de cada material, para calcular um  $N$  de fadiga em cada um dos vinte pontos. A partir daí, fazendo a média dos vinte pontos, computa do dano médio da camada, como na Equação 22.

$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left( \frac{1}{N_{\text{fadiga}, i}} \right)_{t,c} \quad (22)$$

Onde:

$D_{\text{médio}}$ : dano médio na estrutura do pavimento para uma carga unitária;

$N_{\text{fadiga}}$ : aplicação da Equação 20(21) para cada um dos vinte pontos.

A partir do dano médio calculado para a estrutura, a função de transferência campo-laboratório, em forma de uma função exponencial, exposta na Equação 23, é utilizada para determinar um fator de deslocamento.

$$fS = C_1 (D_{\text{médio}})^{C_2} \quad (23)$$

Onde:

fS: fator de deslocamento;

$D_{\text{médio}}$ : dano médio da estrutura, obtido pela Equação 22;

$C_1$  e  $C_2$ : coeficientes calibrados para a função de transferência.

A determinação de  $C_1$  e  $C_2$  é proveniente da base de dados dos segmentos monitorados. Para fins de cálculo, o manual do programa informa que os valores utilizados são de  $C_1 = 1993,7$  e  $C_2 = 0,3737$ . Dando sequência ao procedimento de cálculo, esse fator de deslocamento é utilizado para deslocar o tráfego  $N$  da estrutura, formando uma nova variável  $N'$ , Equação 24.

$$N' = (N \cdot fS) 10^{-10} \quad (24)$$

Onde:

$N'$ : número  $N$  ajustado;

$N$ : número de repetições do eixo padrão acumulado;

$fS$ : fator de deslocamento, obtido pela Equação 23.

O uso de uma função de deslocamento para um  $N'$  impõe que todas as estruturas se comportam de maneira semelhante, porém algumas vão exibir os sinais de fadiga de maneira mais rápida, e outras mais vagarosa. Assim, é identificada uma curva que define essa evolução da área trincada para todas as estruturas. A função escolhida é a Sigmoidal, fixada no ponto inicial em zero, e ponto final em 100, ou seja, 100% de área trincada. O eixo horizontal depende do  $N'$  da estrutura, que por sua vez, depende do seu  $D_{médio}$ . A equação Sigmoidal é definida pelas Equações 25, 26 e 27.

$$A = \left( \frac{N' - 1}{Z - 1} \right)^n \quad (25)$$

$$B = \left( \frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (26)$$

$$AT(\%)_{prev} = \frac{e^{-A} - e^{-B}}{1 - e^B} \quad (27)$$

Onde:

$AT(\%)_{prev}$ : área trincada prevista para o pavimento, limitada de 0 a 100

$N'$ : número  $N$  ajustado, obtido pela Equação (24)

$Z$  e  $n$ : coeficientes da equação sigmoial, 0,25 e 5 respectivamente.

A área trincada obtida pelas equações acima é referente a 50% de confiabilidade. Assim, os dados passam pela confiabilidade estatística expressa pela Equação 28.

$$AT(\%)_{conf} = AT(\%)_{prev} + EP_{(N')} \cdot Z_p \quad (28)$$

Onde:

$AT(\%)_{conf}$  : área trincada para a confiabilidade escolhida, limitada de 0 a 100

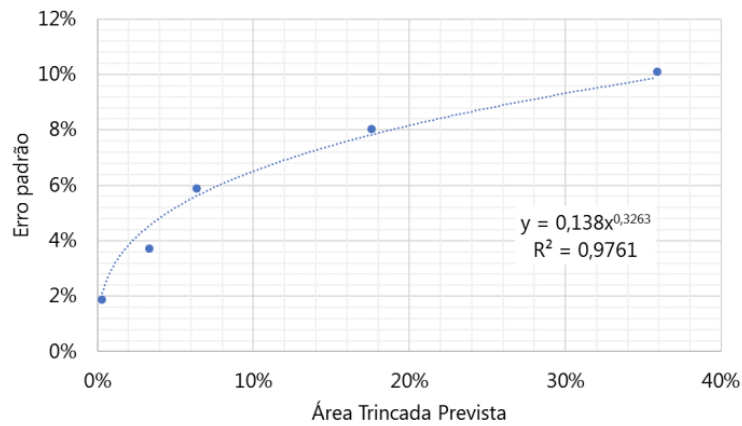
$AT(\%)_{prev}$ : área trincada do prevista, obtida pela Equação (27)

$EP_{(N^*)}$ : erro padrão do modelo, para cada  $AT(\%)_{prev}$

$Z_p$ : proveniente da distribuição normal padrão, em que equivale a 1,65 para 95% de confiabilidade.

A função que define o erro padrão ( $EP_{(N^*)}$ ) do modelo é dependente da área trincada prevista, apresentada no programa como uma equação de potência de coeficientes 13,8 (para erro padrão em percentagem) e 0,3263, como mostra a Figura 37.

Figura 37 - Equação do erro padrão do modelo



Fonte: Franco e Motta (2020)

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo será abordado os resultados obtidos durante a pesquisa. Primeiramente será exposto os parâmetros relacionados as misturas asfálticas e suas comparações de origem (campo *versus* laboratório), e em seguida as simulações computacionais.

Para padronização e melhor compreensão, adotou-se a mesma paleta de cores abordadas por Vestena (2021), sendo a cor vermelha para a mistura denominada CONV, azul para TLAf, verde para HIMA e roxo para SBS. Em situações em que será abordada a comparação com as misturas de usina, adotou-se as mesmas cores por mistura, porém diferenciando-as pelo tom, ou pelo preenchimento hachurado para misturas usinadas. Para pontos experimentais de gráficos, adotou-se um “X” para misturas oriundas de laboratório e um círculo “O” para misturas usinadas. A comparação também é discretizada pelas palavras “usina” e “lab” após o nome da mistura.

### 4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

Este item tratará das análises dos resultados obtidos durante a pesquisa, sendo primeiramente abordado pelos parâmetros de rigidez, seguido da deformação permanente e por fim, a fadiga das misturas asfálticas estudadas. Os itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 abordarão em detalhes os resultados encontrados e buscando também comparar com as características de misturas usinadas composta nos estudos de Vestena (2021).

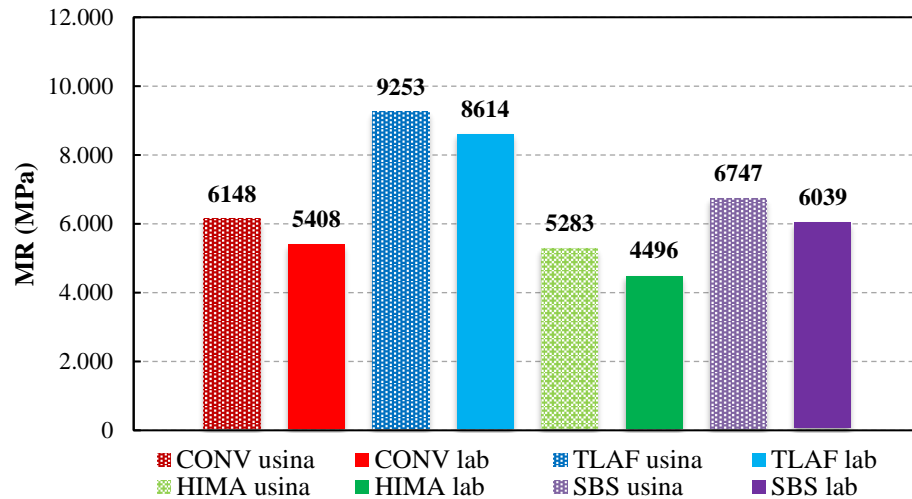
#### 4.1.1 Rigidez

Para a rigidez das misturas asfálticas abordada nesta pesquisa, fez-se a caracterização pelos corpos de prova moldados no compactador giratório, nos volumes de vazios e temperatura exigidos pela respectiva norma.

Para o Módulo de Resiliência utilizou-se três corpos de prova condicionados a 25°C. A Figura 38 ilustra a relação com as misturas asfálticas usinadas de Vestena (2021). As quatro misturas reproduzidas em laboratório obtiveram uma ligeira queda de rigidez comparadas as misturas de usina (Tabela 11). Esse decréscimo pouco está relacionado a uma diferença de rigidez entre as misturas usinadas e reproduzidas em laboratório. A pequena diferença pode estar relacionada ao próprio ensaio de MR que pouco pode dizer sobre seu comportamento à

fadiga ou a deformação permanente, visto que é um ensaio realizado em apenas uma temperatura, sob condições de viscoelasticidade linear, fora do domínio da danificação, em condições não homogêneas.

Figura 38 – Resultados de MR para as misturas asfálticas usinadas e de laboratório



Fonte: Autor

Tabela 11 – Queda de rigidez das misturas asfálticas

Mistura	MR (MPa)	Queda de rigidez (%)
CONV usina	6148	12,04%
CONV lab	5408	
TLAF usina	9253	6,91%
TLAF lab	8614	
HIMA usina	5283	14,90%
HIMA lab	4496	
SBS usina	6747	10,49%
SBS lab	6039	

Fonte: Autor

Na sequência são apresentados os resultados de Módulo Complexo. Três amostras foram utilizadas para determinar a média de valor para cada ponto experimental das 5 temperaturas e 10 frequências de carregamento aplicadas e a Figura 39 expõe a média dos dados experimentais das três amostras em pontos e o modelo 2S2P1D em linhas contínuas para as misturas reproduzidas em laboratório. A comparação, mais detalhada, com as misturas

asfálticas usinadas será apresentada posteriormente. Uma parte dos resultados obtidos pela modelagem 2S2P1D já foram publicados em Vestena, Schuster e Ilha (2021).

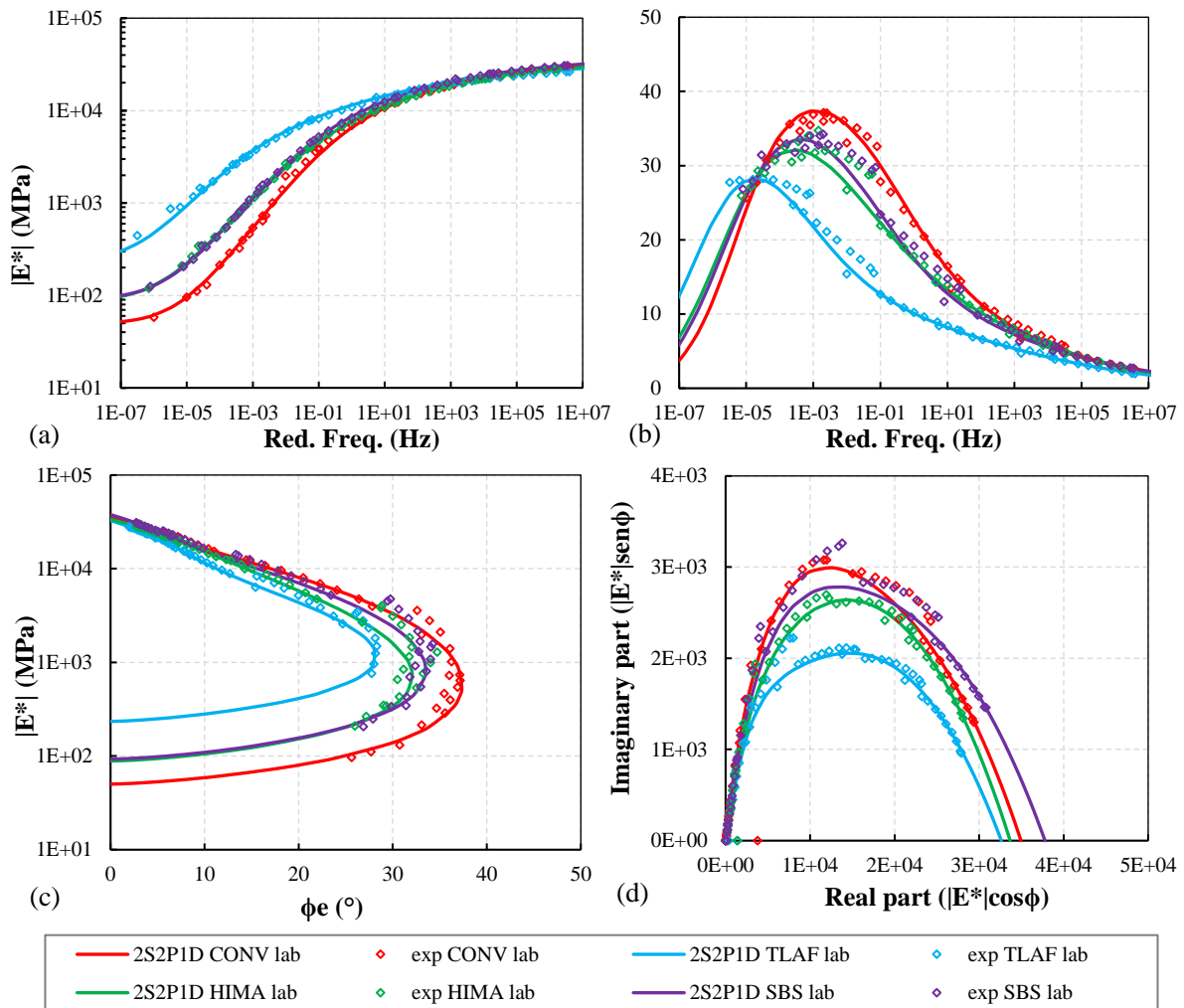
Para as relações de módulo dinâmico (Figura 39.a) em altas temperaturas (baixos valores de frequência reduzida, a mistura CONV é a de menores módulos de rigidez, seguido da HIMA e SBS que se mostraram semelhantes, e por fim, a de módulo mais elevado TLAF. Quando analisado o módulo nas menores temperaturas (maiores frequências reduzidas), a relação se inverte, com a mistura SBS sendo a mais rígida, seguido da CONV e HIMA e por fim a TLAF.

Sobre o ângulo de fase (Figura 39.b), como esperado, as misturas asfálticas modificadas (TLAF, HIMA e SBS) apresentaram menores picos de ângulo de fase quando comparadas a mistura CONV. O ranqueamento das misturas por esse meio de análise se dá pela mistura TLAF, seguido da HIMA e SBS, e por fim, CONV.

Nas curvas de espaço Black (Figura 39.c) e Cole-Cole (Figura 39.d), identifica-se influência de uma parcela mais viscosa na mistura CONV, enquanto a mistura TLAF é a que se apresenta mais elástica. As misturas asfálticas HIMA e SBS apresentaram comportamentos semelhantes, algo que possa ser atribuído a adição do mesmo polímero.



Figura 39 - Resultado de módulo complexo e modelagem 2S2P1D das misturas asfálticas reproduzidas em laboratório: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) Espaço Black; (d) Cole-cole



Fonte: Autor

A Tabela 12 apresenta os coeficientes de calibração dos modelos 2S2P1D e WLF, e a Figura 40 expõe graficamente a relação entre as constantes de misturas asfálticas usinadas e misturas asfálticas reproduzidas em laboratório.

Pela comparação gráfica, podemos observar a grande similaridade das constantes visto que estão localizadas próximas a linha de igualdade. A constante  $\beta$  resultou em valores iguais em ambas as situações, para as misturas respectivas, então não foi apresentada.

As constantes  $E_{00}$  e  $E_0$  estão diretamente relacionadas ao esqueleto mineral, volume de vazios, e envelhecimento (DI BENEDETTO *et al.*, 2004b). Em termos de envelhecimento, a constante  $\tau_E$  está ligada ao deslocamento da curva mestra no eixo das frequências reduzidas. As

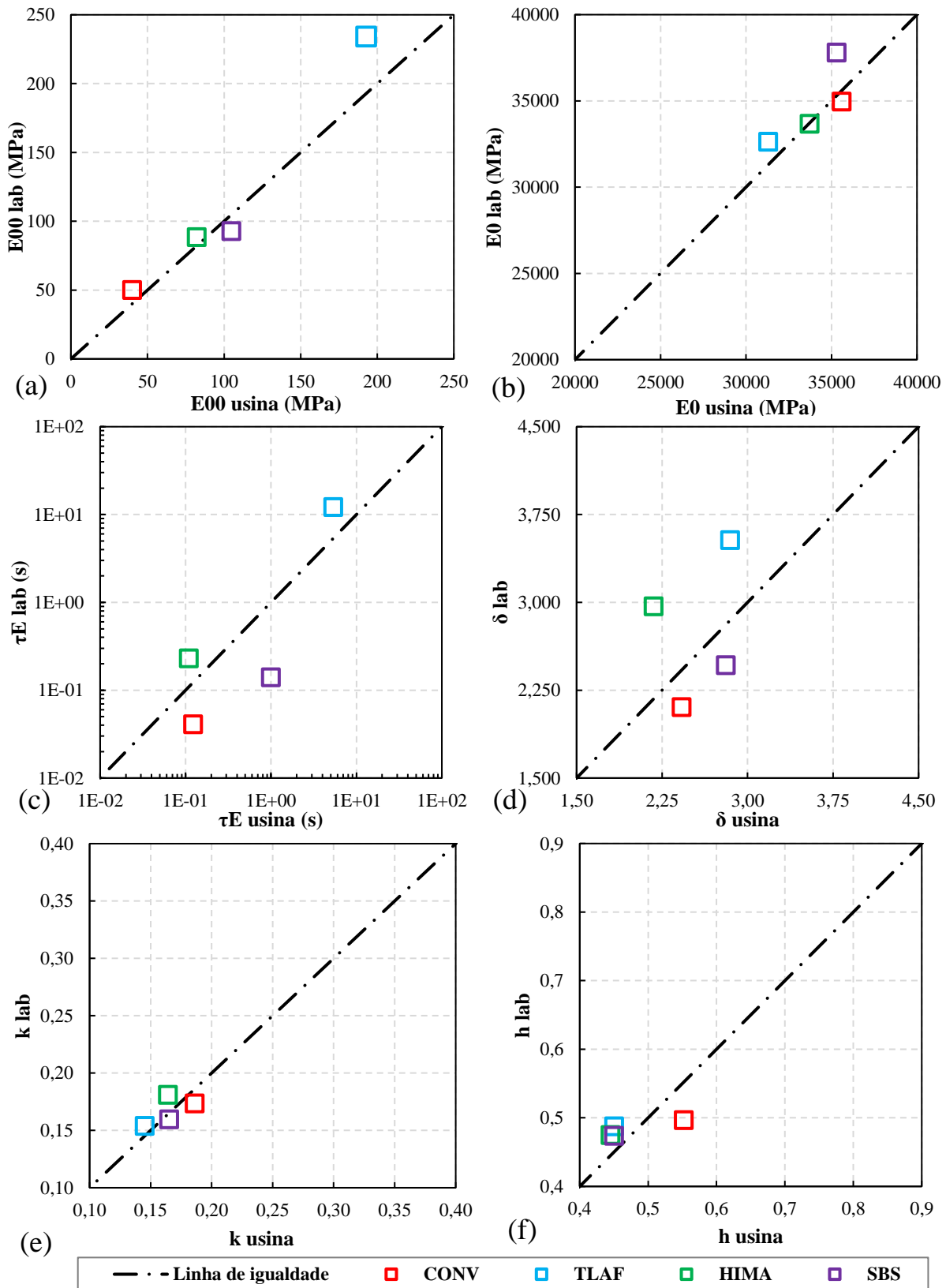
constantes  $k$ ,  $h$  e  $\delta$ , conforme Di Benedetto *et al.* (2004), estão relacionadas às propriedades dos ligantes, e o formato de curva.

Tabela 12 – Calibração 2S2P1D e WLF para as misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório

Mistura	$E_{00}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	$k$	$h$	$\delta$	$t_E$ (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)	T ref (°C)
CONV usina	40,0	35582	0,186	0,552	2,422	1,22E-01	10000	22,68	167,20	21
CONV lab	50,1	34956	0,173	0,497	2,106	4,10E-02	10000	26,85	188,54	21
TLAF usina	192,8	31284	0,145	0,450	2,848	5,36E+00	3000	40,28	260,94	21
TLAF lab	234,2	32632	0,154	0,488	3,531	1,22E+01	3000	50,30	340,99	21
HIMA usina	82,1	33717	0,164	0,445	2,177	1,09E-01	10000	32,82	232,5	21
HIMA lab	88,5	33677	0,181	0,475	2,967	2,30E-01	10000	48	348,67	21
SBS usina	104,7	35300	0,165	0,45	2,81	9,93E-01	10000	27,59	191,79	21
SBS lab	92,8	37800	0,160	0,474	2,463	1,41E-01	10000	31,45	220,13	21

Fonte: Autor

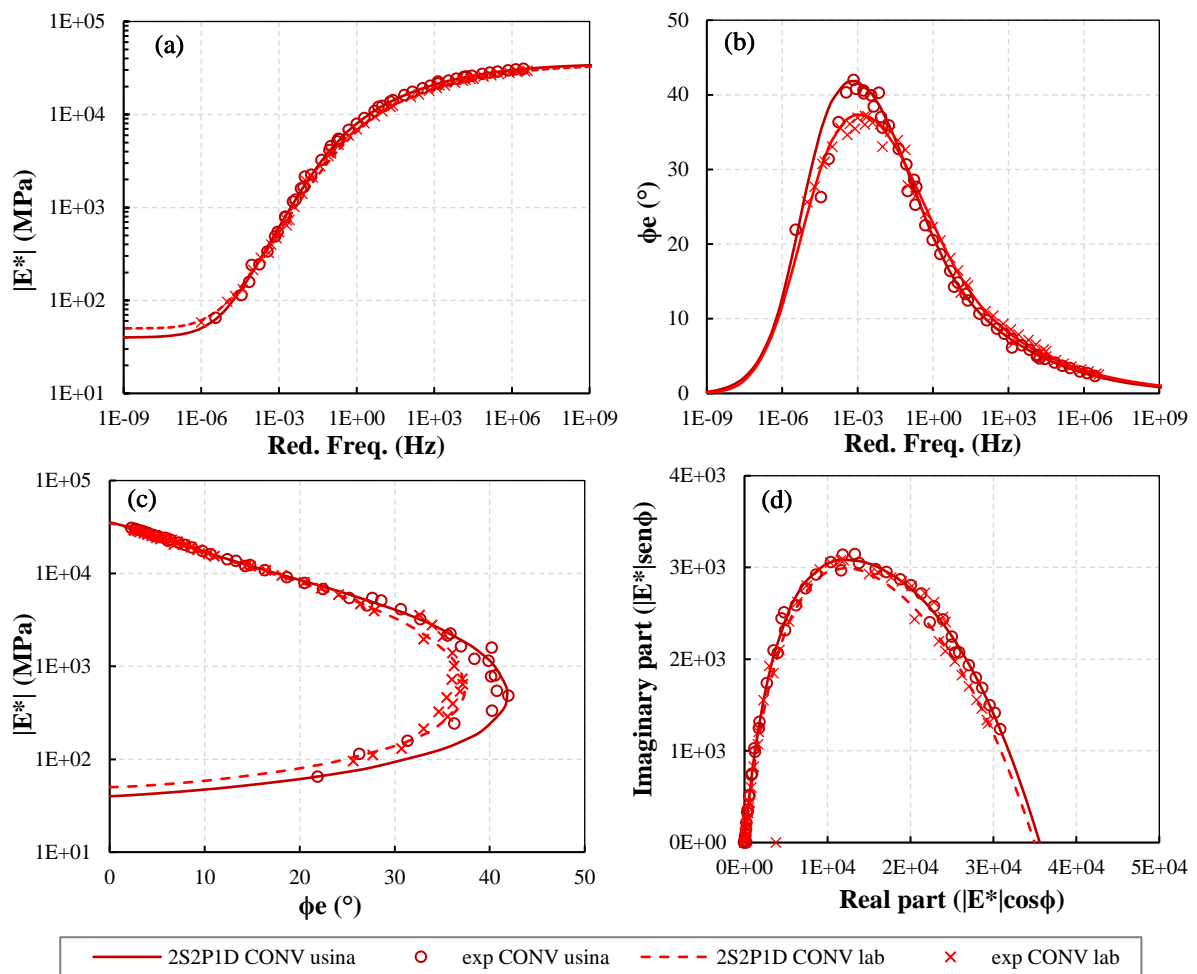
Figura 40 - Comparação das constantes 2S2P1D para amostras usinadas e reproduzidas em laboratório: (a)  $E_{00}$ ; (b)  $E_0$ ; (c)  $\tau_E$ ; (d)  $\delta$ ; (e)  $k$ ; (f)  $h$



A seguir, estão expostas as relações entre campo e laboratório encontradas nas curvas mestras de módulo dinâmico, ângulo de fase, espaço Black e Cole-Cole para cada mistura asfálticas estudada nessa pesquisa.

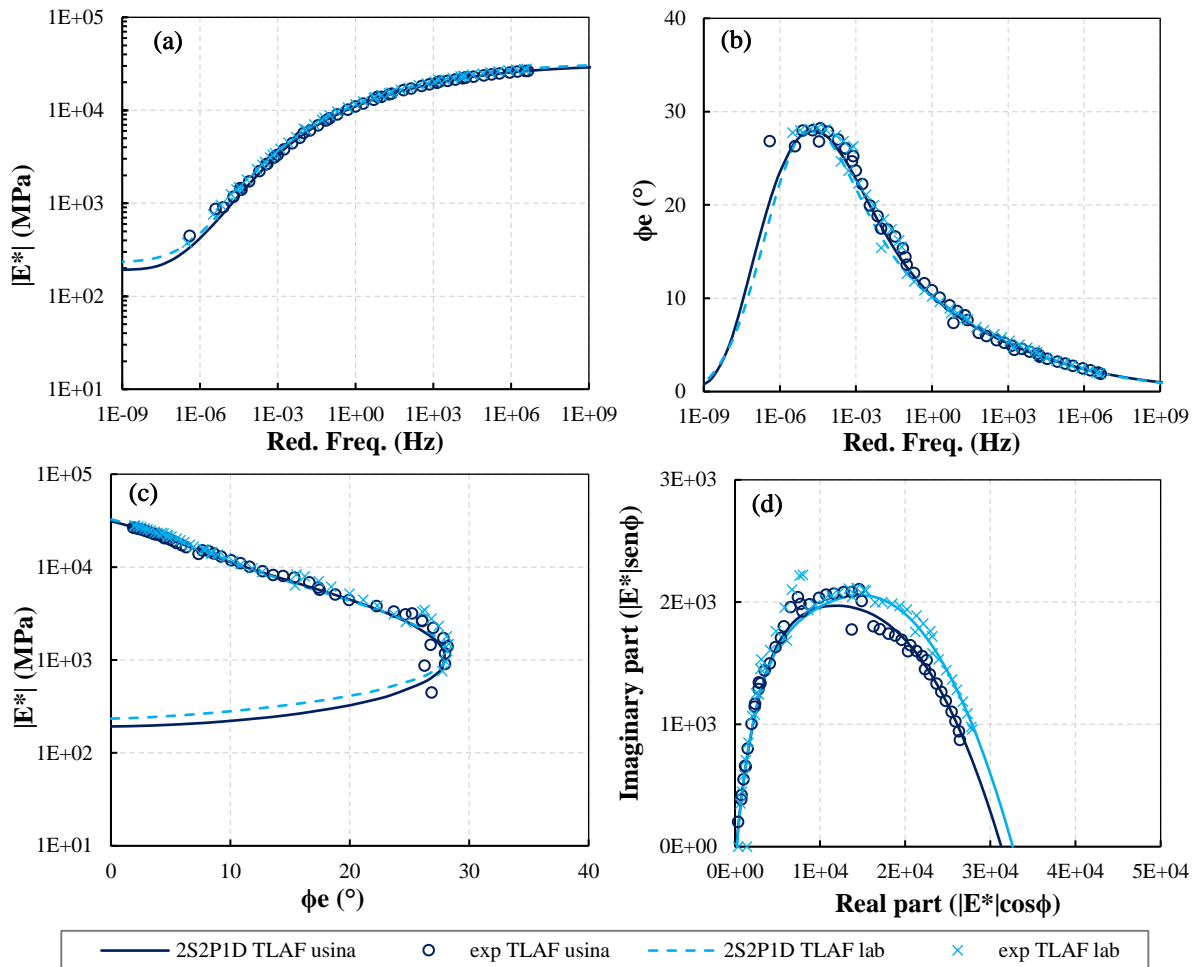
A mistura asfáltica CONV, disposta na camada de *binder* de cada segmento está ilustrada na Figura 41, e as misturas asfálticas da camada de rolamento de cada segmento exposta na Figura 42, Figura 43 e Figura 44, com as misturas TLAf, HIMA e SBS respectivamente. Para todos os segmentos, as misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório apresentaram elevada similaridade.

Figura 41 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório da camada de binder disposta em todos segmentos: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole



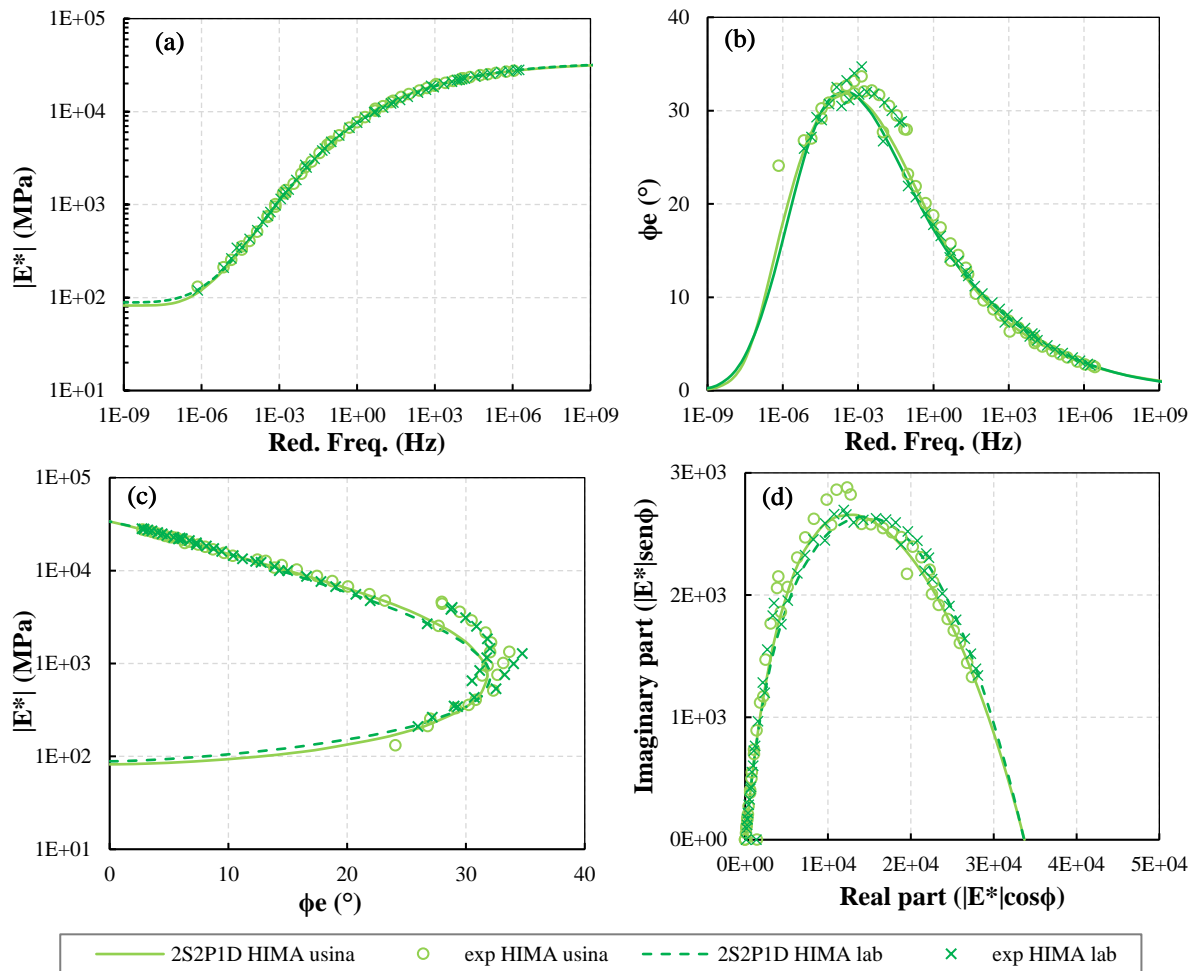
Fonte: Autor

Figura 42 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG01: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole



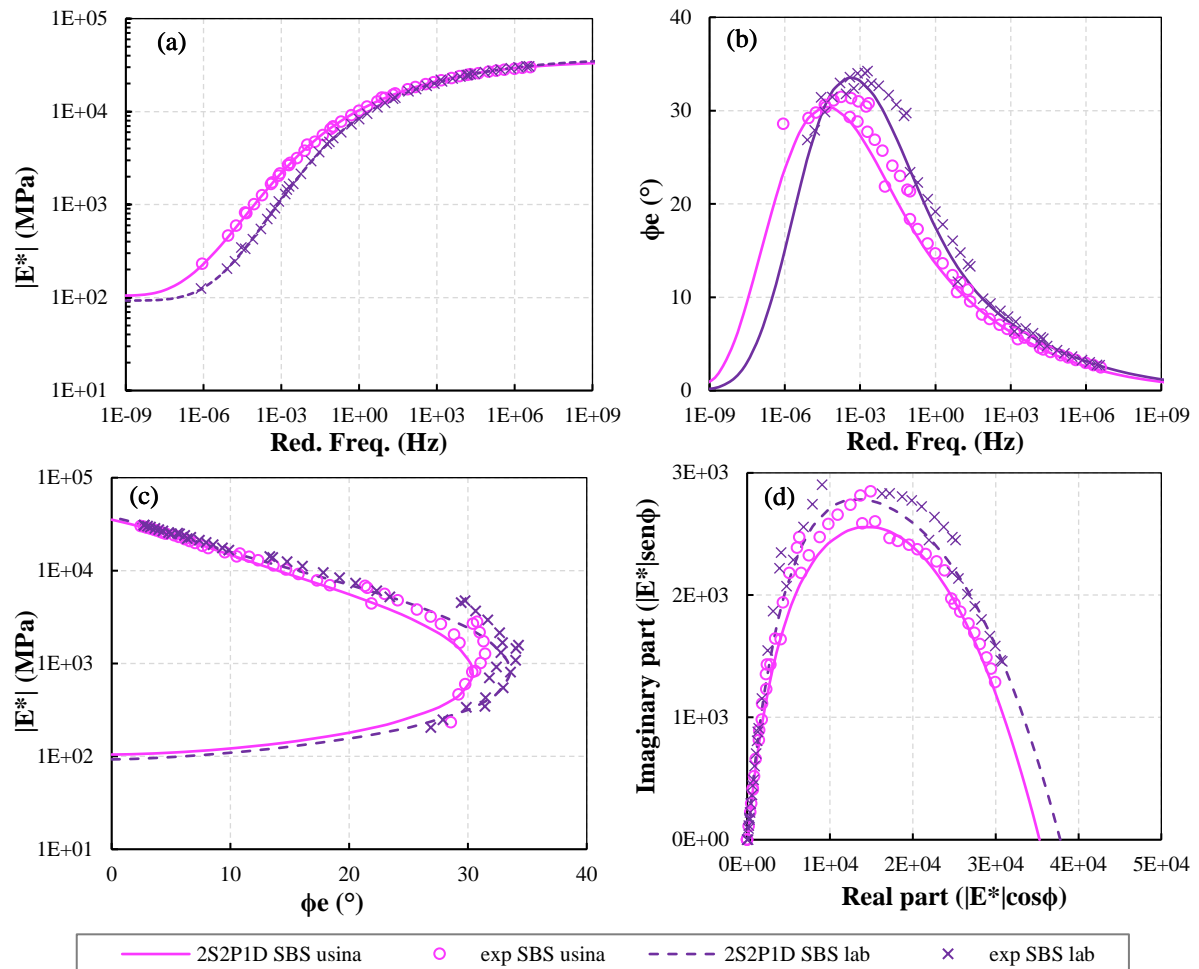
Fonte: Autor

Figura 43 - Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG02: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole



Fonte: Autor

Figura 44 – Rigidez das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório do SEG03: (a) curva mestra de módulo dinâmico; (b) curva mestra de ângulo de fase; (c) espaço Black; (d) Cole-cole



Fonte: Autor

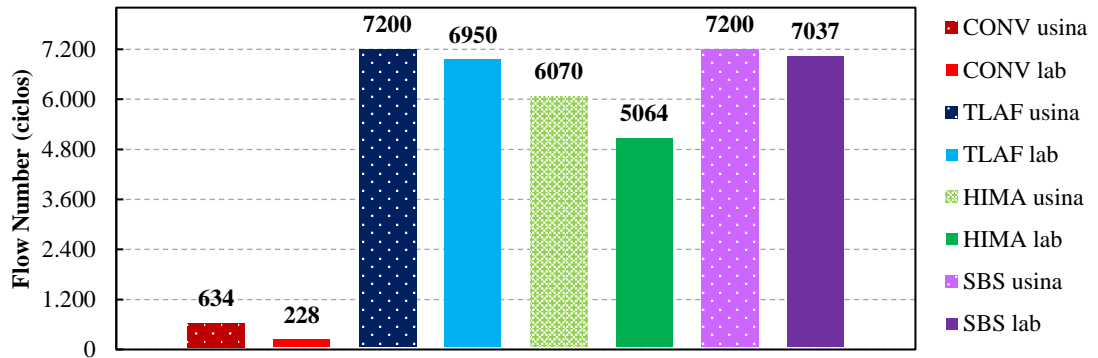
#### 4.1.2 Deformação Permanente

As misturas foram avaliadas quanto a sua resposta à deformação permanente pelo ensaio de *Flow Number*, em que o material está exposto a uma temperatura elevada sendo aplicada uma carga de compressão axial cíclica até a ruptura. Os valores obtidos para FN em cada corpo de prova, juntamente com os coeficientes de *Francken* ajustado, estão expostos na Tabela 13.

A Figura 45 ilustra a comparação com os resultados de FN provenientes das misturas usinadas de Vestena (2021). Encontrou-se uma redução de ciclos para atingir o *Flow Number* comparado as misturas usinadas, porém essa redução não representa uma redução de parâmetros de desempenho à deformação permanente, visto que também não houve a alteração

de classes de FN propostos pelo programa *MeDiNA* (FRANCO e MOTTA, 2020) e Faccin (2021).

Figura 45 – Resultados de FN das misturas asfálticas usinadas e laboratório.



Fonte: Autor

Tabela 13 – Resultados de ciclos para FN e dos coeficientes de *Francken* das misturas usinadas e reproduzidas em laboratório

Mistura	Amostra	Flow Number		Coeficientes do modelo de <i>Francken</i>			
		ciclos	C. V.	A	B	C	D
CONV usina	CP 011	592	9,37%	972,7	0,3861	916,92	1,74E-03
	CP 012	676		1068,3	0,3524	1522,04	1,23E-03
TLAF usina	CP 110	7200	0,00%	825,6	0,1601	0	1,00E-05
	CP 111	7200		2561,0	0,1513	18,29	0,00E+00
HIMA usina	CP 212	6335	6,19%	1103,4	0,2609	836,08	1,54E-04
	CP 213	5804		2684,2	0,2	1000	1,66E-04
SBS usina	CP 310	7200	0,00%	1318,0	0,1533	0	1,00E-05
	CP 311	7200		1309,6	0,211	451,4	1,14E-04
CONV lab	CP 470	285	2,79%	851,3	0,5769	91,1	8,30E-03
	CP471	171		779,6	0,497	113,76	1,09E-02
TLAF lab	CP 510	6716	4,77%	1239,0	0,1	277	6,37E-07
	CP 511	7185		1240,6	0,192	278,37	6,37E-07
HIMA lab	CP 610	4955	3,04%	1825,6	0,2238	1701,57	1,54E-04
	CP 611	5173		1424,8	0,2357	2625,45	1,21E-04
SBS lab	CP 710	7200	3,29%	834,6	0,2247	404,97	3,49E-07
	CP 711	6873		1801,0	0,2264	666,93	2,68E-07

Fonte: Autor

Seguindo a conclusão dos resultados de FN para misturas asfálticas dos estudos de Vestena (2021), um ponto importante que deve ser considerado é a quantidade inferior de ligante ao projeto da mistura. O fato das misturas estudadas, tanto quanto usinadas e laboratório, terem bons desempenhos frente a deformação permanente é atrelado a essa redução do teor de



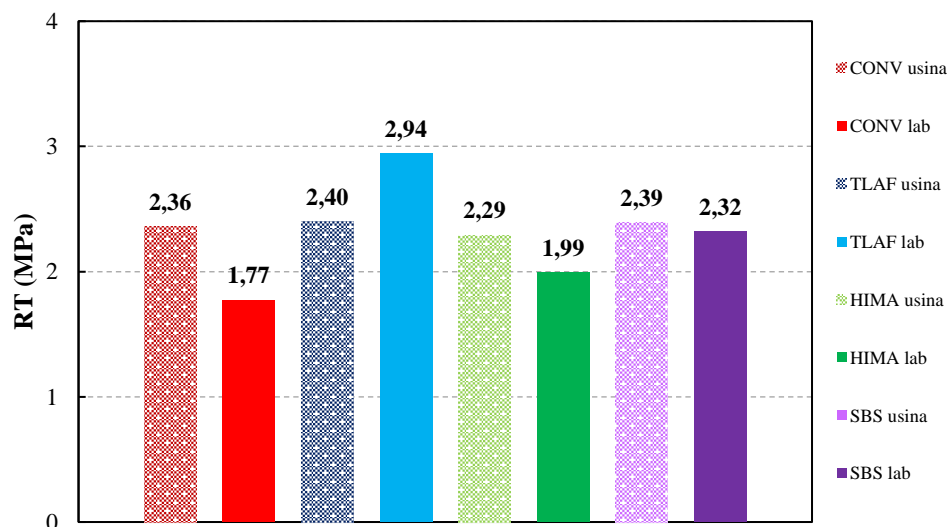
betume contido nas misturas, com exceção a mistura CONV. Consequentemente, os resultados de fadiga foram afetados negativamente. Nas conclusões do trabalho de Vestena (2021), o autor buscou na literatura misturas com os mesmos ligantes adotados e realizou a comparação. A título desta pesquisa em questão, abordou-se acima apenas a diferenciação pela origem das misturas asfálticas.

### 4.1.3 Fadiga

Em relação à caracterização da fadiga das misturas asfálticas, foi realizado pelo ensaio de fadiga por compressão diametral. As amostras têm dimensões de 6,4 cm de altura e 10 cm de diâmetro. O ensaio aplica um estado de tensões não homogêneo no corpo de prova, sendo exigido uma grande quantidade de amostras para formar uma curva de fadiga confiável.

Primeiramente é averiguado a resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas, em três corpos de prova. O resultado de RT para as misturas reproduzidas em laboratório foi respectivamente 1,77 MPa, 2,94 MPa, 1,99 MPa e 2,32 MPa para as misturas CONV, TLAF, HIMA e SBS. O comparativo com as misturas usinadas de Vestena (2021), está exposto na Figura 46. Para as misturas CONV, HIMA e SBS houve um decréscimo de resistência a tração, entretanto, não se caracteriza como uma perda expressiva, visto que os parâmetros mínimos de RT, de 0,65 MPa, continuam sendo contemplados. Apenas para mistura TLAF houve um acréscimo de resistência a tração, também não sendo expressivo.

Figura 46 – Resultados de RT das misturas usinadas e de laboratório

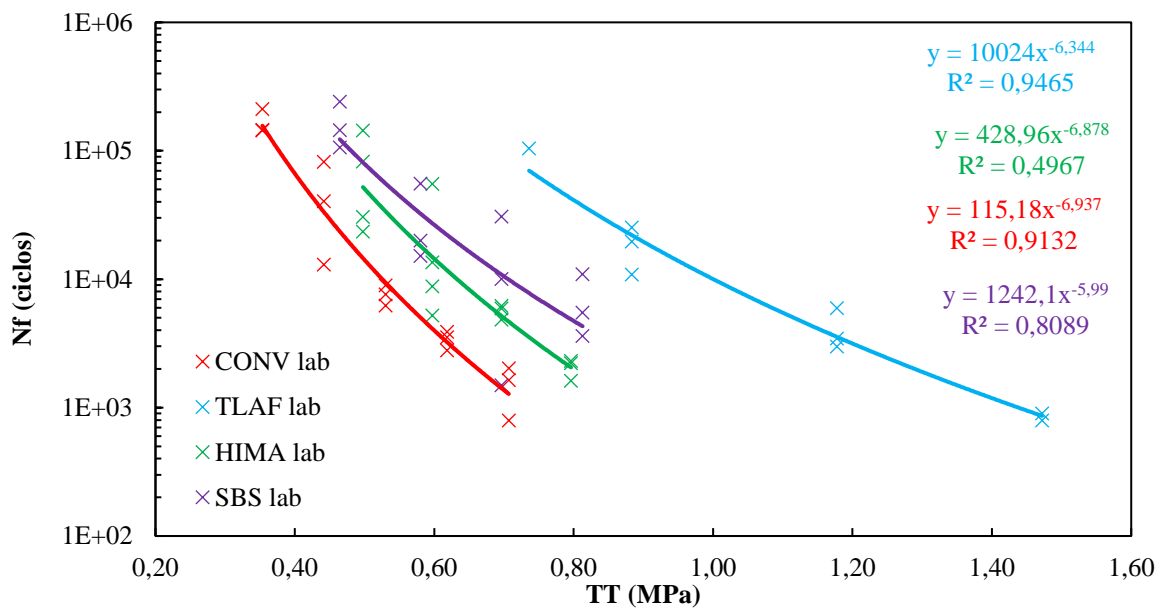


Fonte: Autor

Posteriormente, foram realizados pelo menos doze corpos de prova para o ensaio de fadiga, divididas em três amostras por grupo de tensão de tração (TT), que é uma porcentagem do RT da mistura.

Para a fadiga em materiais asfálticos, sabe-se que quanto mais ciclos a mistura aguentar e maior for a tensão/deformação, melhor desempenho frente a fadiga o material é. Portanto, na Figura 47, temos plotada a relação de tensão de tração pelos ciclos até a ruptura. Visivelmente, temos a mistura TLAF com melhor desempenho à fadiga, seguido da SBS, HIMA e CONV respectivamente. Esse ranqueamento manteve idêntico as misturas usinadas de Vestena (2021) quando comparado esses parâmetros.

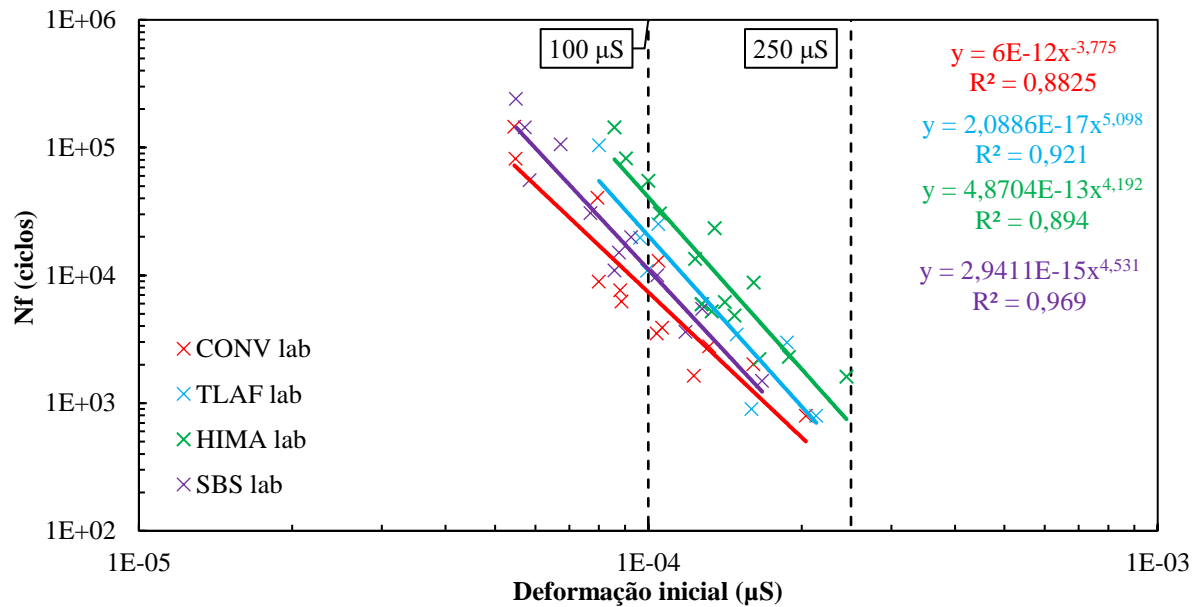
Figura 47 – Resultados de ciclos para fadiga por compressão diametral pela tensão de tração aplicada



Fonte: Autor

Ao efetuarmos a mudança dos parâmetros de análise, correlacionando a deformação inicial das amostras pelo ciclo até a ruptura por fadiga, temos uma mudança de ranqueamento, sendo a mistura HIMA com melhor desempenho à fadiga, seguido da TLAF, HIMA e CONV respectivamente.

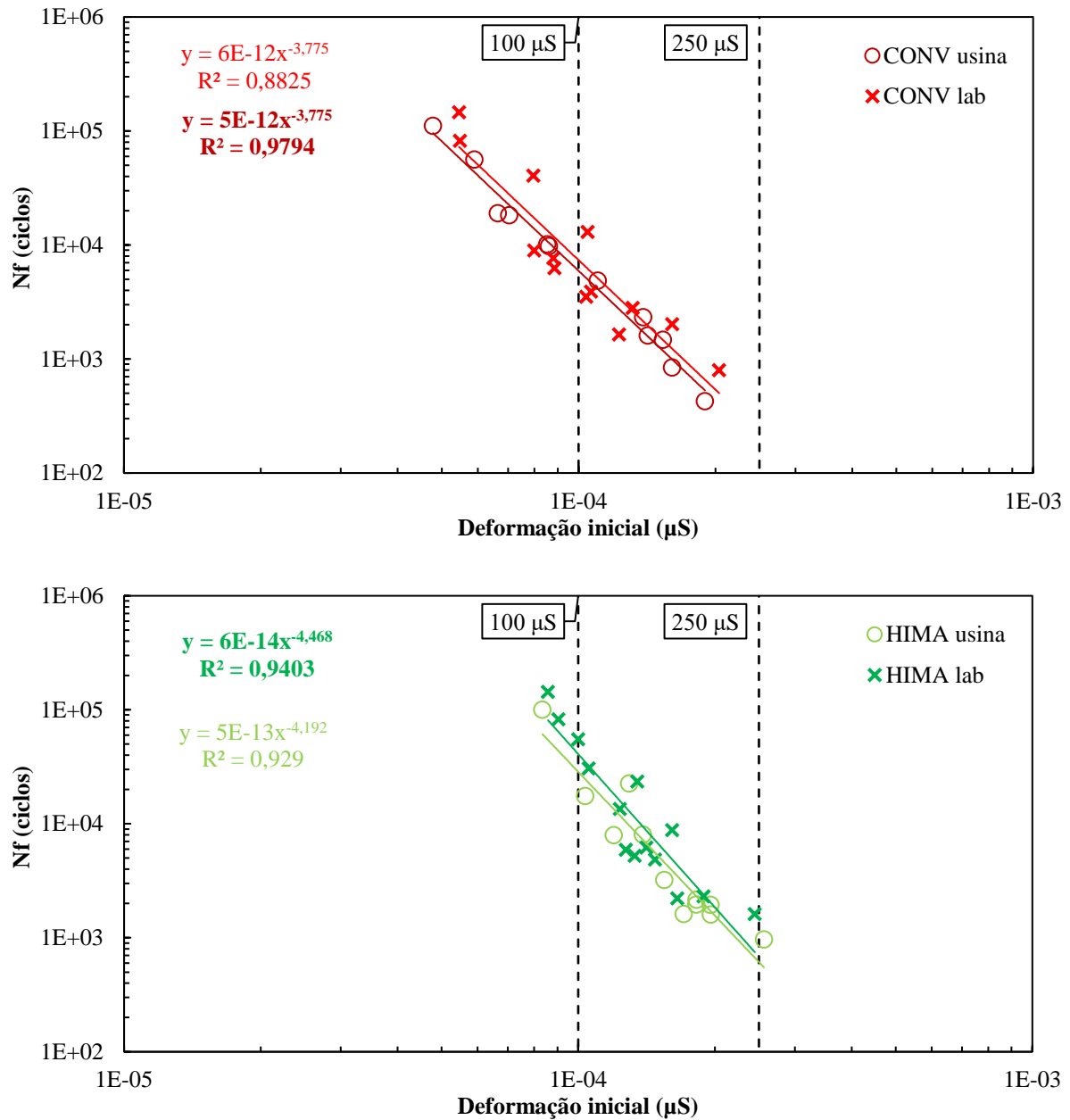
Figura 48 – Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida



Fonte: Autor

Ao analisarmos as misturas comparando sua origem, usinada e reproduzidas em laboratório desta pesquisa, pelos mesmos parâmetros citados acima, temos as misturas CONV e HIMA com poucas variações de ciclos para tais deformações, sendo pouco expressiva a diferença, e portanto, evidenciando uma semelhança de desempenho à fadiga das misturas usinadas e reproduzidas em laboratório (Figura 49).

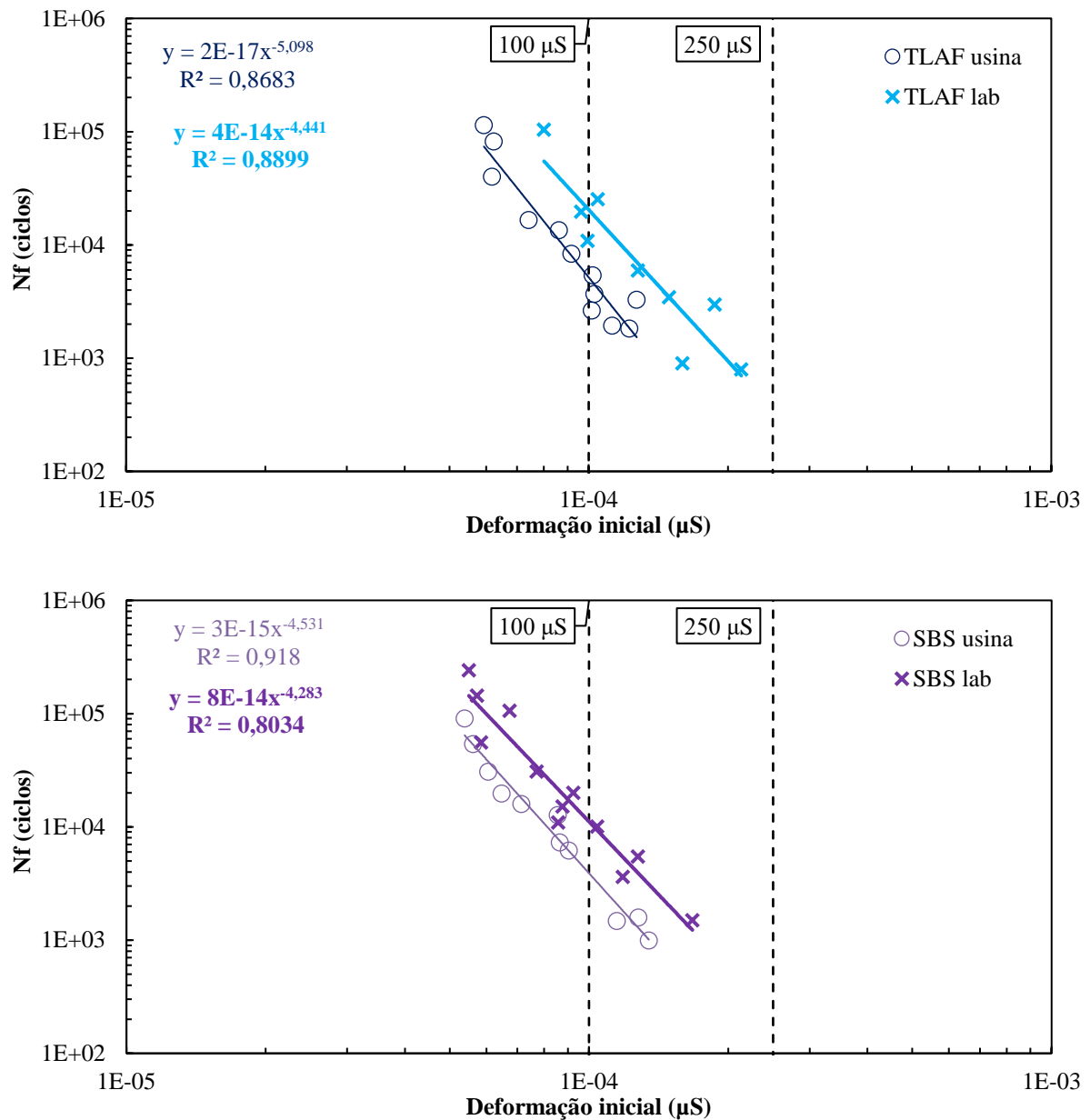
Figura 49 – Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida para as misturas CONV e HIMA



Fonte: Autor

Para as misturas TLAF e SBS, obtivemos pequena diferenciação nos parâmetros de fadiga. As misturas reproduzidas em laboratório obtiveram melhor desempenho a fadiga comparado às misturas usinadas (Figura 50). Tal variabilidade pode não estar ligada a diferença de desempenho, mas sim relacionada intrinsecamente ao ensaio de fadiga por compressão diametral, devido a aplicação de um estado de tensões não homogêneo no corpo de prova, ou também pelo critério de ruptura total. Estima-se também que pode estar relacionada a diferenciação de rigidez encontrada no MR.

Figura 50 - Resultado de ciclos de fadiga por deformação inicial medida para as misturas TLAF e SBS



Fonte: Autor

Uma forma de comparar a fadiga entre misturas asfálticas é o chamado Fator de área de Fadiga para Misturas (FFM), em que é definido uma faixa de deformações, e calculada a área até a curva de fadiga das misturas. Para os padrões utilizados no programa *MeDiNa*, esta área é calculada entre as deformações de 100 μS e 250 μS. O programa também divide as misturas asfálticas em classes de “qualidade”, numeradas de 0 a 4, definidas pelo resultado de FFM e MR medido para cada material. A Tabela 14 resume os valores de FFM obtidos.

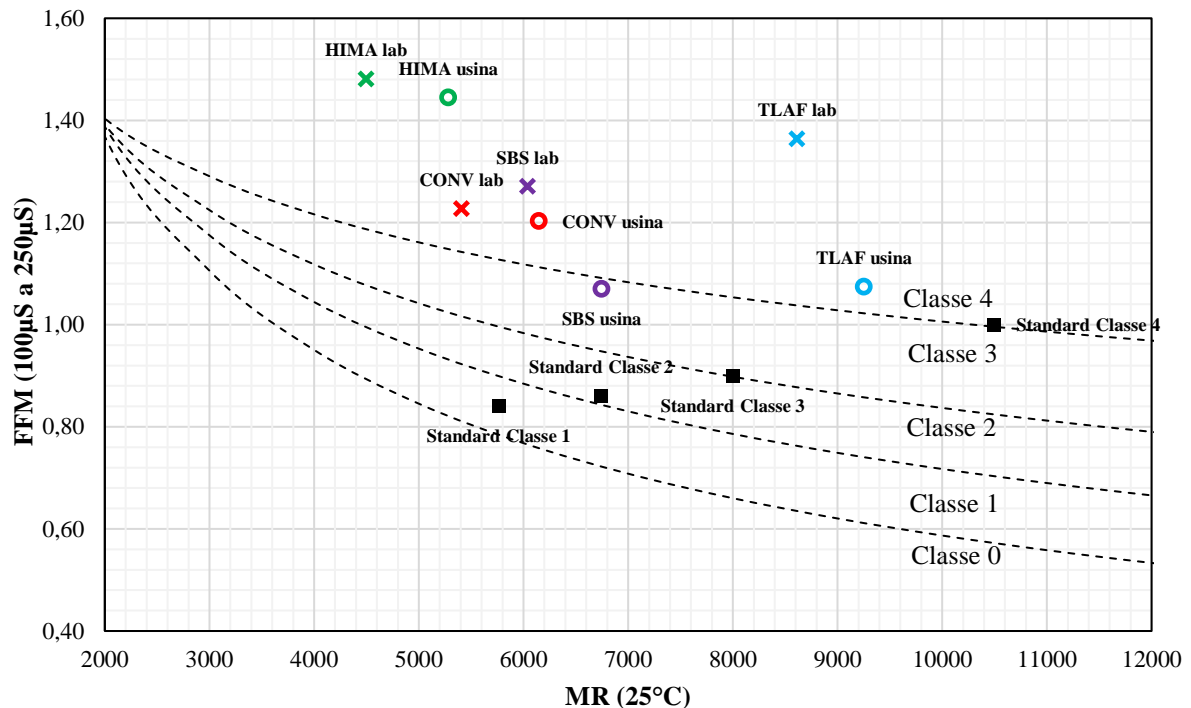
Tabela 14 – Resultados de FFM para as misturas usinadas e reproduzidas em laboratório

<b>Mistura</b>	<b>FFM</b>
CONV usina	1,203
CONV lab	1,227
TLAF usina	1,074
TLAF lab	1,364
HIMA usina	1,444
HIMA lab	1,481
SBS usina	1,071
SBS lab	1,271

Fonte: Autor

Como já explícito no 4.1.1, devido a pequena queda de rigidez, temos uma translação a esquerda no gráfico de classes do *MeDiNa* para as misturas reproduzidas em laboratório. Todas as misturas oriundas do laboratório foram classificadas como “Classe 4” sendo indicada para maiores tráfegos. Para as misturas TLAF e SBS, as quais tiveram melhor desempenho a fadiga (Figura 51) comparado ao seu par de diferente origem, conseqüentemente, obtemos um número maior de FFM para essas misturas. A título comparativo, plotou-se também as misturas referencias no programa *MeDiNa* de cada classe de fadiga, e estão nominadas como “Standard”.

Figura 51 – Classes do *MeDiNa* para as misturas asfálticas usina e reproduzidas em laboratório e misturas standard



Fonte: Autor

Outros meios de análises de fadiga como deformação inicial plotada por ciclos para o rompimento e tensão de tração plotada por ciclos para o rompimento, estão dispostas no Apêndice A e B, respectivamente. Ambos meios de análises obtiveram valores satisfatórios para  $R^2$  acima de 0,8. Nos apêndices estão abordados os gráficos das misturas reproduzidas em laboratório, bem como sua comparação com o par de origem usinada.

#### 4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Este item tratará das simulações computacionais realizadas pelo *MeDiNa v.1.1.5.0*, pelos resultados obtidos de área trincada, em percentuais. A estrutura das camadas, bem como suas espessuras e parâmetros de rigidez e fadiga, foram expostas previamente no item 3.4.

Para apresentação dos resultados, adotaram-se linhas contínuas para as simulações com 95% de confiabilidade. Quando é abordado a comparação com resultados de campo, utilizou-se os valores obtidos pelos levantamentos de defeitos (DNIT PRO 433/2021) realizados nos estudos de Vestena (2021), e a sua representação é feita por um “X” da cor correspondente a

mistura. Quanto as cores adotadas, seguem o mesmo critério elaborado para abordar os resultados das misturas asfálticas anteriormente.

Os resultados apresentados na sequência desse item fazem referência apenas à faixa externa da rodovia, visto que a faixa interna recebe um número inferior de solicitações e baixo nível de trincamento até o momento.

Outro importante ponto a salientar é que o menor dano médio na camada observado em todos os dados da calibração da função de transferência do programa é de  $5,19E-04$ , acima dos danos dos segmentos monitorados por este trabalho em qualquer condição. Portanto, o autor ressalva de que os segmentos aqui apresentados são demasiadamente robustos em relação aos quais fora calibrada a função, sendo assim, as análises subsequentes tratam-se de uma extrapolação das condições de contorno da função de transferência.

Seguindo as condições de espessuras e caracterizações dos materiais abordados anteriormente, avaliou-se as estruturas no *MeDiNa v.1.1.5.0* e as análises de tensões e deformações pelo *AEMC*. Os resultados obtidos abordam a área trincada prevista com 95% de confiabilidade.

Os resultados de dano médio na camada nos vinte pontos calculados na linha superior e inferior do concreto asfáltico estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dano médio resultante por estrutura pelo *AEMC* e fS estimado pelo *MeDiNa*

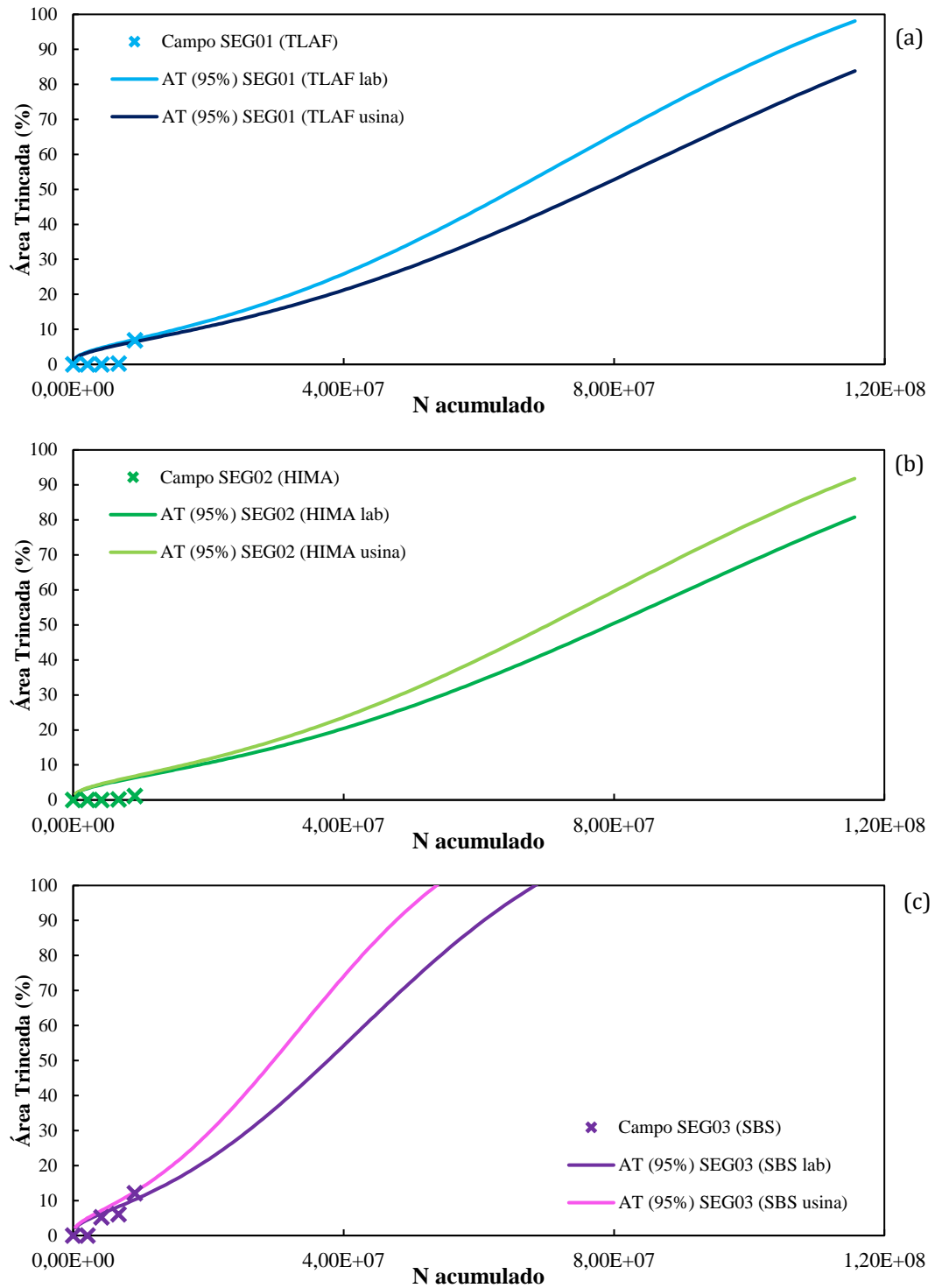
Segmento	fS estimado	Dano médio	Diferença Dano médio (%)
SEG01 (TLAF lab)	37,15	2,46E-04	15,08%
SEG01 (TLAF usina)	31,55	2,09E-04	
SEG02 (HIMA lab)	30,51	2,02E-04	11,57%
SEG02 (HIMA usina)	34,50	2,29E-04	
SEG03 (SBS lab)	64,33	4,26E-04	21,36%
SEG03 (SBS usina)	81,81	5,42E-04	

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para simulação de área trincada, em porcentagens, estão expostos em função do N de tráfego da rodovia (Figura 52) e em função dos meses (Figura 53), para a confiabilidade de 95%. Para todos os segmentos estudados, manteve-se a tendência na previsibilidade em AT, ou seja, o fato de cada simulação estabelecer diferentes coeficientes de fadiga ( $k_1$  e  $k_2$ ) para as misturas asfálticas de cada origem, não acarretaram mudanças significativas para a previsão de AT.

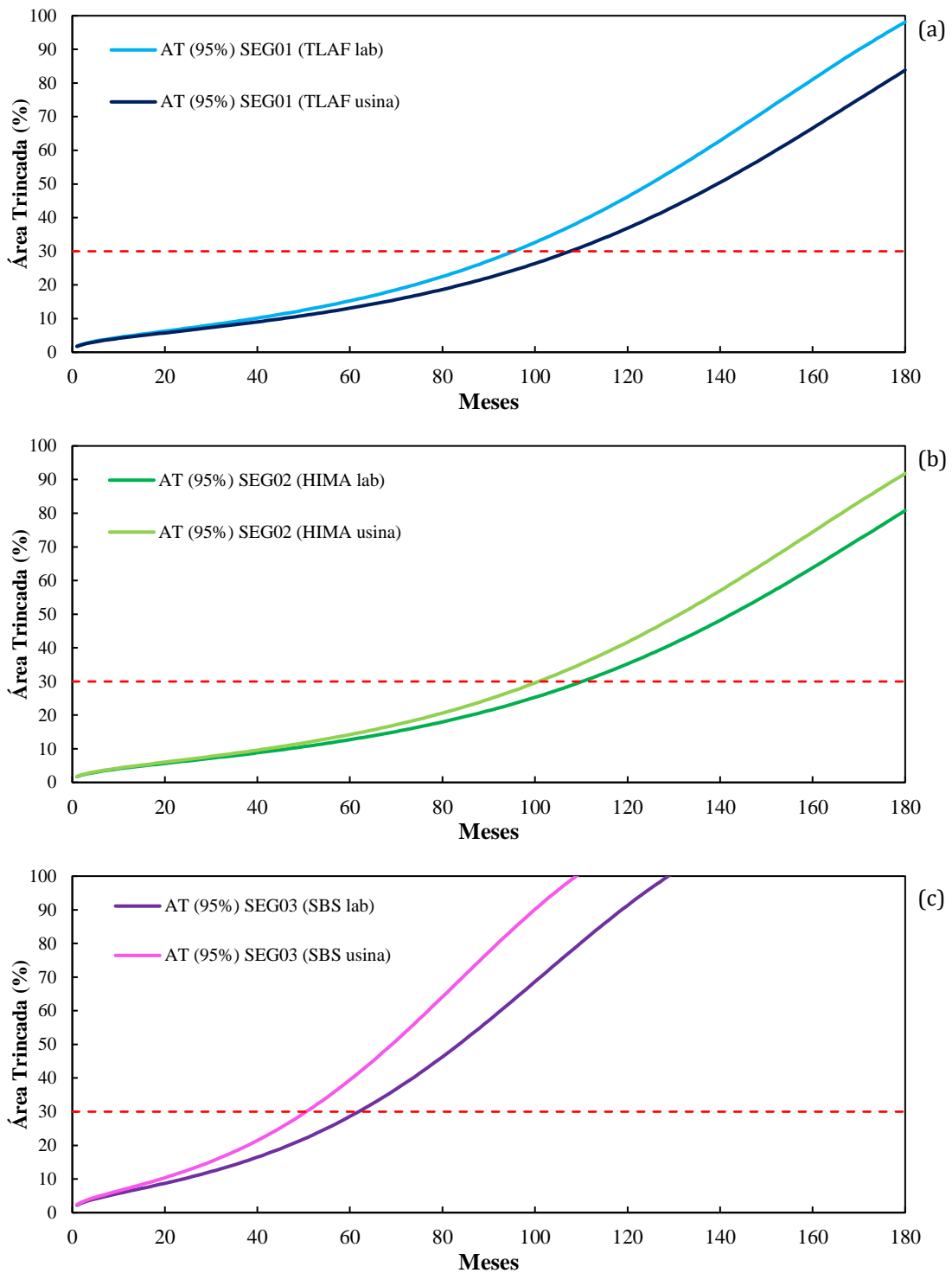


Figura 52 – AT(%) resultante pelo *MeDiNa* por N de tráfego: (a) SEG01; (b) SEG02; (c) SEG03



Fonte: Autor

Figura 53 – AT(%) resultante pelo *MeDiNa* por meses: (a) SEG01; (b) SEG02; (c) SEG03



Fonte: Autor

Expostos na Tabela 16, tem-se a abordagem que estabelece o número de meses e N de tráfego que cada segmento leva para sua estrutura apresentar 30% de AT, o mesmo limite

proposto pelo software *MeDiNA*. Os resultados encontrados perante essa análise mantiveram-se coerentes quando comparada as duas confiabilidades.

Tabela 16 – Diferença de simulações com 95% de confiabilidade

<b>Segmento</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>30% AT em Meses</b>	<b>Diferença meses (%)</b>	<b>30% AT em Nacumulado</b>	<b>Diferença Nacumulado(%)</b>
SEG 01 (TLAF lab)	AT (95%)	96	11,11%	4,53E+07	14,8%
SEG 01 (TLAF usina)	AT (95%)	108		5,32E+07	
SEG 02 (HIMA lab)	AT (95%)	111	9,01%	5,52E+07	12,2%
SEG 02 (HIMA usina)	AT (95%)	101		4,85E+07	
SEG 03 (SBS lab)	AT (95%)	62	17,74%	2,60E+07	20,8%
SEG 03 (SBS usina)	AT (95%)	51		2,06E+07	

Fonte: Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, sabendo que essa pesquisa foi conduzida com o objetivo de comparar misturas asfálticas de campo/usinadas e misturas asfálticas reproduzidas em laboratório pelos ensaios que caracterizam os materiais asfálticos por conceitos de rigidez, deformação permanente e a fadiga, como também pelas simulações computacionais pelo programa *MeDiNa*, que nesse capítulo iremos elencar alguns temas pertinentes as conclusões encontradas e sugestões para futuros trabalhos.

### 5.1 CONCLUSÕES

Primeiramente, as análises de rigidez pelo módulo de resiliência das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório se mostraram similares. A pequena queda de rigidez pode estar atrelada a variabilidade do ensaio. A realização do ensaio em somente uma temperatura também nos diz pouco a respeito do comportamento dos materiais estudados.

Analisando a rigidez pelo módulo complexo, onde a mistura asfáltica está exposta a inúmeras temperaturas e frequência de carregamento, temos então maior propriedade e cenários para comparar os materiais de diferentes origens. As misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório de todos os segmentos apresentaram elevada similaridade para módulo dinâmico e ângulo de fase como também elevada similaridade nos coeficientes da modelagem 2S2P1D.

Para os parâmetros de deformação permanente, representado pelo parâmetro *Flow Number*, obtive-se também elevada similaridade, visto que as misturas asfálticas reproduzidas em laboratório, quando comparada as usinadas, não mudaram suas classes de FN propostos por Franco e Motta (2020) e Faccin (2021), a exceção da mistura CONV.

No desempenho a fadiga, as misturas reproduzidas em laboratório e usinadas apresentaram também similaridade para as classes de fadiga e FFM propostas por Fritzen (2016).

Para as simulações no programa *MeDiNa*, a similaridade também foi encontrada para as misturas usinadas e reproduzidas em laboratório, com destaque para o SEG02 onde as simulações obtiveram 9,01% de diferenciação, seguido pelo SEG01 com 11,1% e SEG02 com 17,74%. Portanto, a nível macro, os distintos valores para  $k_1$  e  $k_2$  das misturas asfálticas usinadas e reproduzidas em laboratório, não acarretaram mudança significativas em AT (%) estimado.

## 5.2 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que as mistura asfálticas reproduzidas em laboratório desta pesquisa foram replicadas a partir de misturas asfálticas aplicadas em campo, em condições diferentes de teores de betume do projeto, o autor propõe um estudo para mensurarmos os malefícios, em termos de AT(%) esperada

Buscar avaliar a aplicação na via concretos asfálticos fora das condições prevista em projeto, tanto para excesso quanto para escassez de ligante asfáltico, é de elevado interesse do meio rodoviário. Pode-se casar também com dados econômicos e estudar o impacto das intervenções no pavimento que serão mais recentes do que o esperado.

Outro importante cenário de se avaliar a diferença de simulações de campo e laboratório pelo *MeDiNa* é reproduzir esse mesmo escopo da pesquisa para outros trechos monitorados e segmentos. Averiguar se essa mesma relação de similaridade se reproduz em outros estudos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320-17**. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D. C. 2017.

\_\_\_\_. **AASHTO T 342**: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, D. C., 2011.

\_\_\_\_. **AASHTO R 84**: Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, D. C., 2017.

\_\_\_\_. **AASHTO T 324**: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. Washington, D. C., 2019.

ALBERNAZ, C.A.V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. 1997. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997

ALBUQUERQUE A. P. F. *et al.* **Influência da energia de compactação e da temperatura de moldagem nas propriedades mecânicas de corpos de prova de concreto asfáltico**. Publicado em 35º Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2004.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. de. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

ALMEIDA Jr, P. O. B. de, BOEIRA, F. D., SPECHT, L. P., CERVO, T. C., PEREIRA, D. da S., CENTOFANTE, R., BARBOZA Jr, V., & SILVA, C. C. **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Revista Transportes. Vol. 26, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11341:2014**. Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15184**. Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15619**. Misturas asfálticas – Determinação da massa específica medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro. 2008.

BABADOPULOS, L. F. A. L., FERREIRA, J. L. S., & SOARES, J. B. **An approach to couple aging to stiffness and permanent deformation modeling of asphalt mixtures**. Materials and Structures. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0834-4>. 2016.

BALBO, T. J. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga**. Artigo publicado na 32º Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, 2010.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2010.

BETUNEL Tecnologia em Asfaltos. **Camada de rolamento RP 18266**. Mac Engenharia BR 116 Div. S/ RS Rio Pelotas – Jaguarão (Front. Brasil/Uruguai) Pedreira Mac - Pelotas/RS DNIT 031/2006-ES Faixa C Estudo de Dosagem de Mistura Asfáltica com STYLINK PG 70-22®. Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Ribeirão Preto/SP. 2018a.

BETUNEL Tecnologia em Asfaltos. **Camada de rolamento RP 18283**. Mac Engenharia BR 116 Div. S/ RS Rio Pelotas – Jaguarão (Front. Brasil/Uruguai) Pedreira Mac - Pelotas/RS DNIT 031/2006-ES Faixa C Estudo de Dosagem de Mistura Asfáltica com CAP Modificado TLA Flex. Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Ribeirão Preto/SP. 2018b.

BETUNEL Tecnologia em Asfaltos. **Camada de rolamento RP 18284**. Mac Engenharia BR 116 Div. S/ RS Rio Pelotas – Jaguarão (Front. Brasil/Uruguai) Pedreira Mac - Pelotas/RS DNIT 031/2006-ES Faixa C Estudo de Dosagem de Mistura Asfáltica com STYLINK PG 82-28® - HIMA. Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Ribeirão Preto/SP. 2018c.

BETUNEL Tecnologia em Asfaltos. **Produtos: Asfaltos. Catálogo de asfaltos**. Disponível em <https://betunel.com.br/site/lista/1/asfaltos> . Acessado dia 19/06/2020.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2018.

BOHN, K. A. **Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. 254p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2017.

CAPITÃO, S. D. **Resistência à fadiga de misturas betuminosas de alto modulo de deformabilidade utilizadas em Portugal**. XIII Panamerican Conference of Traffic in transportation Engineering, 2004.

CARDONA, D. A. R.; POUGET, S.; DI BENEDETTO, H.; OLARD, F. **Viscoelastic behavior characterization of a Gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen**. Materials Research, Vol. 18 (2), p. 373-381, 2015.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of viscoelasticity**. 2.Ed. New York: Academic, 1982.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília, CNT : SEST SENAT, 2019

CORTÉ, J. F., BROSSEAUD, Y., SIMONCELLI, J. P., CAROFF, G. **Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration**. Transportation Research Record. No 1436, p. 28-37, 1994.

CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 053/94**. Misturas Betuminosas – Percentagem de Betume. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98**. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT-IPR 720/2006**. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_. **DNIT 129:** Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011a.

\_\_\_\_. **DNIT 130:** Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_. **DNIT 131:** Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_. **DNIT 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_. **DNIT 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_. **DNIT 168:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt) - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_. **DNIT 183:** Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 15 p.. Rio de Janeiro, 2018d.

\_\_\_\_. **DNIT 184:** Pavimentação asfáltica - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 10 p.. Rio de Janeiro, 2018e.

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN L.; DE LA ROCHE, C. **Stiffnes testing for bituminous mixtures.** Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 34, p.66-70, 2001.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures.** Materials and Structures, v. 37, p. 202-216, 2004.

DI BENEDETTO, H., OLARD, F. SAUZÉAT, C., & DELAPORTE, B. **Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: From binders to mixes.** Road Materials and Pavement Design, 12, 129-158. DOI: 10.1080/14680629.2011.9690356. 2004.

DI BENEDETTO, H., DELAPORTE, B., & SAUZÉAT, C. **Three-dimensional linear behaviour of bituminous materials: Experiments and modeling.** International Journal of Geomechanics, 7, 149-157. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149). 2007

DI BENEDETTO, H., CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers.** Tome 2. 2005. 283p.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. **Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP.** Construction and Building Materials, v. 126, p. 172–178, 2016.

ECOSUL, ROADRUNNER ENGENHARIA LTDA. **Relatório de avaliação e diagnóstico de recebimento de obras do DNIT BR-116/RS km 508,850 ao km 489,360,** rev 0, Outubro de 2019.

ENECON. **Controle de Camadas. Rodovia BR 116/RS,** trecho Porto Alegre - Pelotas RS, Subtrecho: Ponte Arrio Santa Isabel – Ponte Arrio Pelotas, Lote: 09 MAC, 2014.

FERNANDES JÚNIOR, J.L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.



FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. John Wiley, Nova York, 1980.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 270p, 2018.

FACCIN, C., SPECHT, L. P., SCHUSTER, S. L., BOEIRA, F. D., BUENO, L. D., BRONDANI, C., PEREIRA, D. as S., NASCIMENTO, L. A. H. **Flow Number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes Applied in Brazil Southern region**. International Journal of Pavement Engineering, 2021a. DOI: 10.1080/10298436.2021.1880580

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

FRANCO, F. A. C. P., MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. Relatório Parcial IV (A). Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GIGANTE, A. C. **Avaliação da suscetibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Tese, University of Wisconsin – Madison, Madison, WI, 2012.

HUNTER, R. N., SELF, A., READ, J. **The Shell Bitumen Handbook**. 6ª ed., UK, 2015.

IPC GLOBAL. **Universal Testing Software UTS Test No 006 SPT Dynamic Modulus**. Version 2.21, 2011.

IWANAGA, F.I. **Avaliação da influência do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de fíler no desempenho à fadiga de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2007.

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, 66, 520- 569, 1997.

KIM, Y. R., D. N. LITTLE, AND R. L. LYTTON. **Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures.** ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15 (1), 75-83, 2003.

KIM, Y. R., E CHEHAB G. **“Development of a Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for Asphalt – Aggregate Mixture: Final Report as Part of task F and G in the NCHRP 9-19 Project.”** National Cooperative Highway Research Program, NCHRP, National Research Council, Washington, D. C. 2004

KIM, Y. R. **“Modeling of Asphalt Concrete”.** ASCE Press, Vol. 1, pp. 163-200. 2009.

MAC Engenharia; TARDELLI. **Projeto de mistura betuminosa C.B.U.Q.** Faixa “B” ES-031/2006 Camada de ligação. Novembro, 2014a.

MAC Engenharia, TARDELLI. **Projeto de Brita Graduada Simples (BGS).** BR 116/RS Turuçu-Pelotas Km 489+000 ao Km 511+760 Lote 9, 2014b.

MAHMOUD, A. F. F., BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures.** Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, EUA, 2004.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** Tese de Doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-ex-Velin. 2014.

MANGIAFICO, S., SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H. **2S2P1D model calibration error from user panel for one bitumen and one bituminous mixture.** Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2019, Article ID 6547025, <https://doi.org/10.1155/2019/6547025>, 2019.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro, Editora Interciência, 3ª Edição, 2015.

MINER, M. A. **Cumulative damage in fatigue.** Journal of Applied Mechanics, 67, 159-164, 1945.

MONISMITH, C. L., DEACON, J. A. **Fatigue of asphalt paving mixture, proceedings of the American Society of Civil Engineers.** Vol. 95, Ann Arbor, Michigan, USA, 1969.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Tese de Doutorado, North Carolina State University. North Carolina, EUA, 2015.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos laterítico.** São Paulo: Editora Villibor, 240 p., 1995.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Nova conceituação do coeficiente  $c'$  da classificação geotécnica MCT**. In: Reunião Anual de Pavimentação, RAPv 32, 2000.

NOROUZI, A., KIM, D., KIM, Y. R., Numerical evaluation of pavement design parameters for the fatigue cracking and rutting performance of asphalt pavements. *Materials and Structures*. DOI 10.1617/s11527-015-0744-x. 2015.

NÚÑEZ, W. P et al. **Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada**. 38ª Reunião anual de pavimentação (38º RAPv), Manaus, 2007.

OLARD, F., DI BENEDETTO, H., DONY, A., VANISCOTE, J. C. **Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics**. *Materials and structure*, Vol 38. p 121-126. 2005.

OLARD, F., DI BENEDETTO, H. **General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes**. *Road Materials and Pavement Design*, 4:2, 185-224, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946. 2003.

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

PALMGREN, A. **Die Lebensdauer von Kugellagem**. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 68, 339-341, 1924.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

PREUSSLER, E., PINTO, S. **Pavimentação rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Synergia: IBP, Rio de Janeiro, 2010.

REESE, R., “**Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life**”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT*, vol. 66, pp. 604- 632, 1997.

ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, E. R., LEE, D. Y., KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction**. 2ª edition, Lanham, Maryland, EUA, Napa Educational Foundation, 1996.

RODRIGUES, R. M. **Estudos do trincamento dos pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio De Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANTOS, T. A. dos. **A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos**. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2020.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de

Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2018.

SOARES, J. P. *et al.* **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas com variação de granulometria e de CAP.** 15º Encontro de Asfalto, IBP, 2000.

SOUZA, M. L. de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3ª ed, Rio de Janeiro, IPR, 1981.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese de Doutorado, Unviersidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

SPECHT, L. P.; BABADOPULOS, A. L.; DI BENEDETTO, H.; SAUZEAT, C.; SOARES, J. B. **Application of the Theory of Viscoelasticity to Evaluate the Resilient Modulus Test in Asphalt Mixes.** Construction and Building Materials, v. 149, p. 648-658, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037>.

SPECHT, L.P., CERATTI, J.A.P. **Asfalto borracha e borracha agregado: Possibildiades de utilização de borracha reciclada em misturas asfálticas.** Revista Estradas, N°4, pg. 18-26, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2003.

SYBILSKI D., BAÑKOWSKI W. **Comparison of the conventional and energetic fatigue failure criterion for bituminous mixes.** Proceedings of The International ISAP Symposium “Asphalt Pavements and Environment”, Zurich, Switzerland, 110-120, 2008.

TONIAL, I. A. *et al.* **Características de fadiga e resiliência de concretos asfálticos brasileiros.** 33º Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, Santa Catarina, 2001.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete.** Tese de Doutorado, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.

UZAN, J. JULEA. Jacob Uzan Layered Elastic Analysis Program, USA, 1978

VERMATTI, E. **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com basena investigação de aeroportos e metodologias MCT e Resiliente.** Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1988.

VESTENA, P. M.; SCHUSTER, S. L.; ILHA, P. S.; NASCIMENTO, J. W. S.; VIEIRA, A. D. B.; SPECHT, L. P. **Comparação de rigidez entre misturas asfálticas produzidas em usina e laboratório utilizando o modelo 2S2P1D.** 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2021.

VESTENA, P. **Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAFLEX, HiMA e 55/75-E (SBS): Caracterização avançada e monitoramento.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2021.

WILLIAMS, M. L., LANDEL, R. F., FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids.** Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701-3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>, 1955.

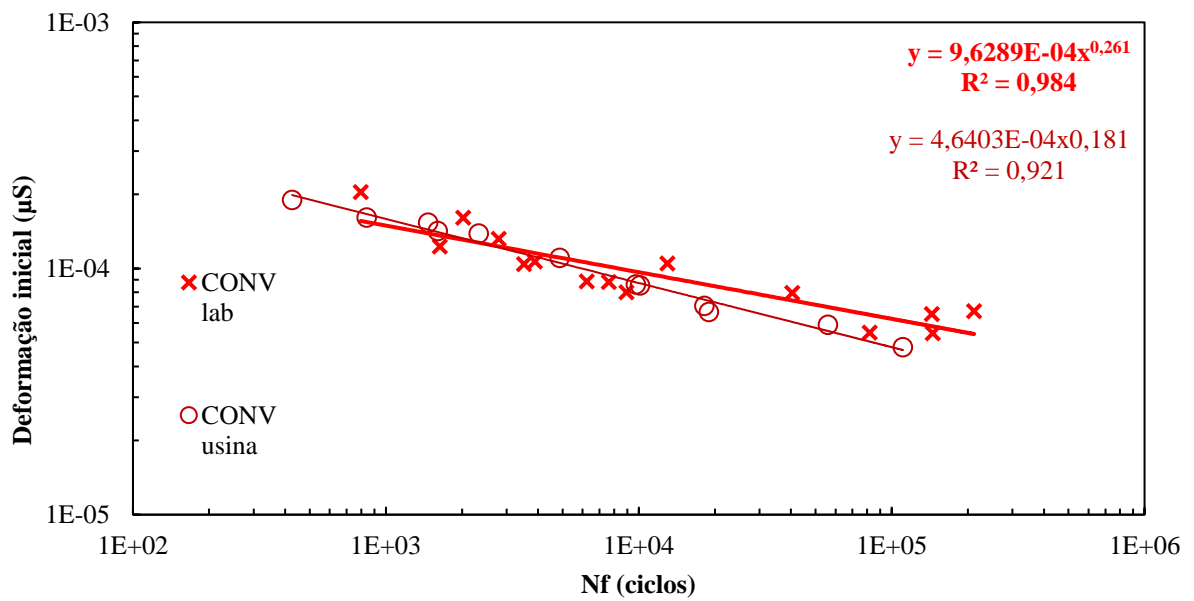
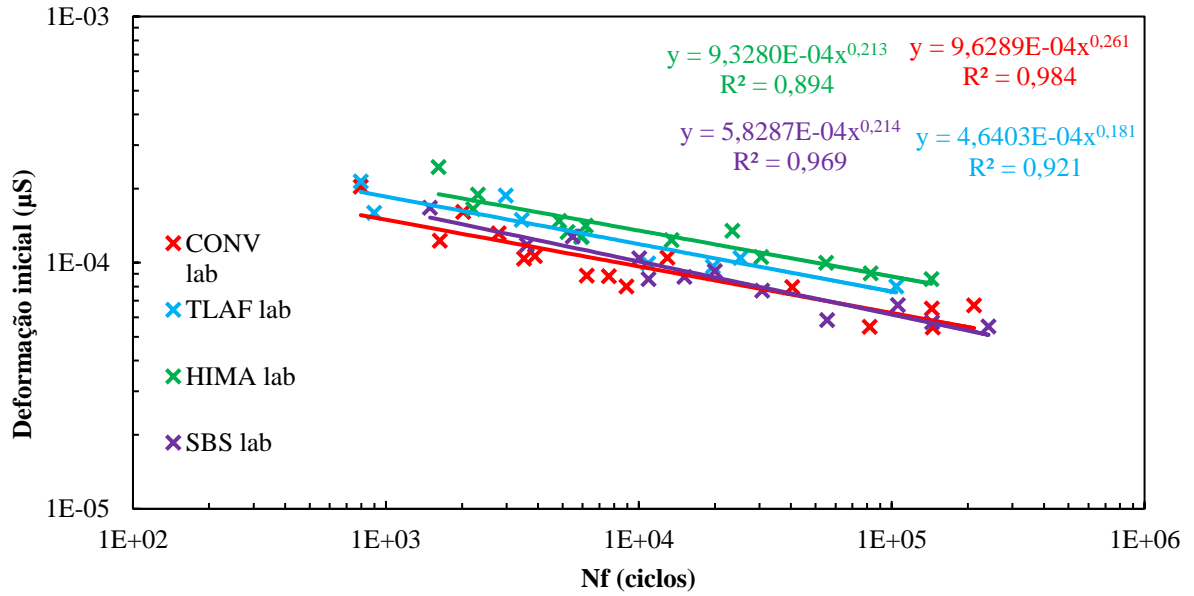
WITCZAK, M. W., KALOUSH, K., PELLINEN, T. **Simple performance test for superpave mix design.** NCHRP Report 465. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D. C., 2002.

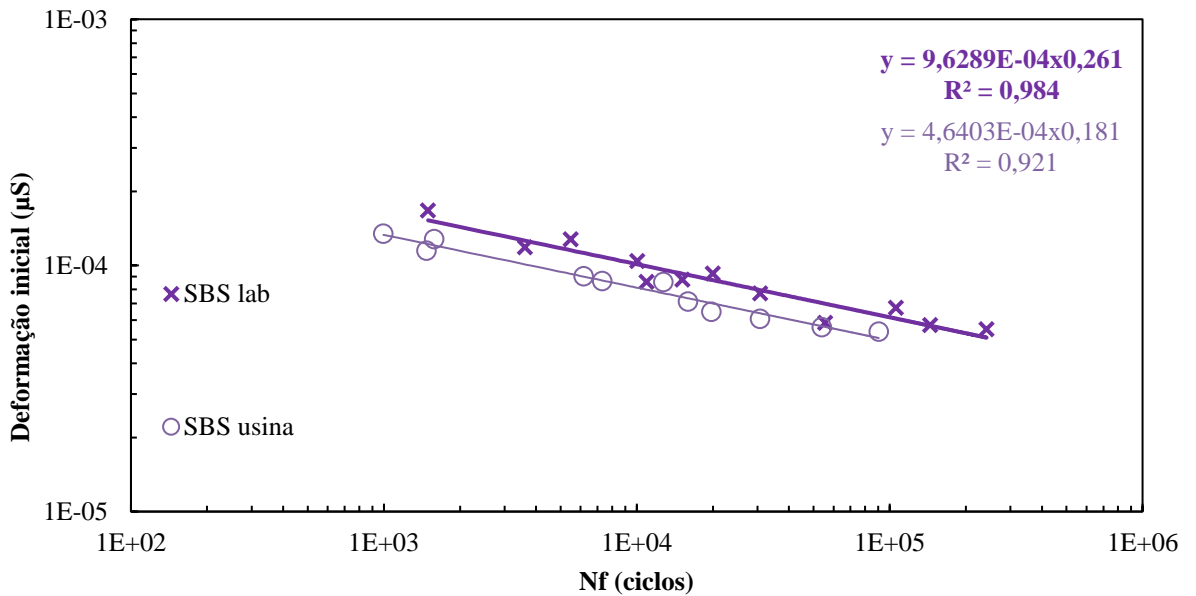
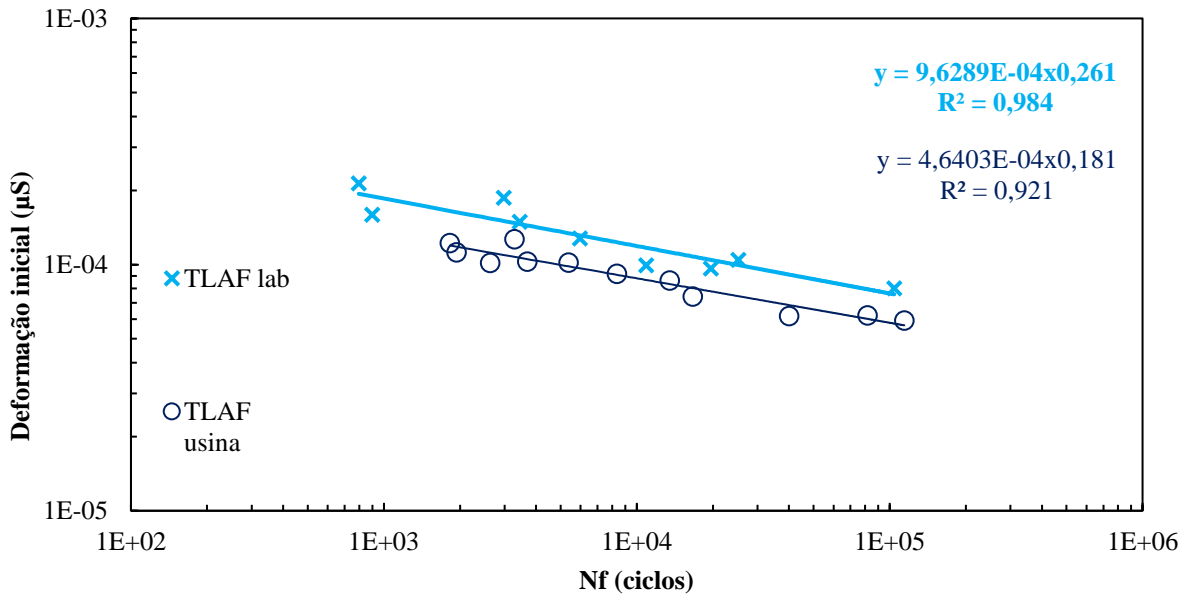
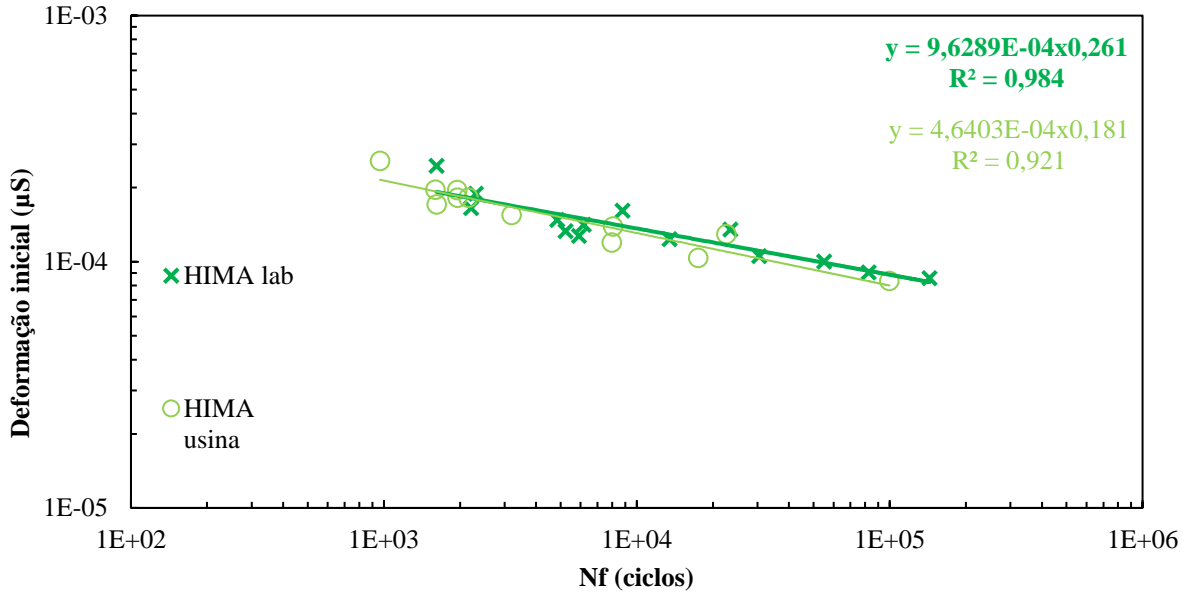
YODER, E. J., & WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 1975

YU, J., ZOU, G. **Asphalt pavement fatigue cracking prediction model with mode factor.** *Internacional Journal of Pavement Research and Technology*, p.123-129, 2013.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Resultados de deformação inicial por ciclos para fadiga





### Apêndice B – Resultados de tensão de tração por ciclos para a fadiga

