

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Victória Nunes Ramos

**PROPOSTA PARA SELEÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS  
ASFÁLTICAS CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E  
FADIGA**

Santa Maria, RS  
2023



Victória Nunes Ramos

**PROPOSTA PARA SELEÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS  
ASFÁLTICAS CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E  
FADIGA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS  
2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Nunes-Ramos, Victória  
PROPOSTA PARA SELEÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS  
ASFÁLTICAS CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA /  
Victória Nunes-Ramos.- 2023.  
397 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2023

1. Classificação de materiais asfálticos 2. Relações  
entre escalas 3. Deformação permanente 4. Fadiga 5.  
Simulação de pavimentos I. Pivoto Specht, Luciano II.  
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VICTÓRIA NUNES-RAMOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.



**Victória Nunes Ramos**

**PROPOSTA PARA SELEÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS  
ASFÁLTICAS CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E  
FADIGA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 31 de julho de 2023.

---

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

---

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

---

**Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Ph.D. (CENPES/PETROBRAS)**  
**(Examinador)**

Santa Maria, RS  
2023



Dedico este trabalho à minha mãe, Neiva Teresinha Fiorin Nunes.



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, meu sincero agradecimento à Universidade Federal de Santa Maria, pelo espaço e incentivo que proporciona aos estudantes para que façam pesquisas de extrema qualidade.

À minha mãe, Neiva Teresinha Fiorin Nunes, por compartilhar comigo cada passo desta trajetória, me ouvindo, me aconselhando, me incentivando e vibrando a cada pequena conquista.

Aos meus demais familiares, tia Rita, tio Rudimar, tio Elomar, tia Elisete, vó Liecir, Dessa, Joaquim, minha afilhada Antônia, Dé, Verônica e João, obrigada pelo apoio de vocês em todas as minhas escolhas, pela torcida em cada etapa da minha vida. Sem vocês, sonhar jamais seria possível. Ao meu avô, Assis, minha estrela que hoje me guia aí de cima. Como tu me disseste, tudo vai dar certo!

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela confiança no meu trabalho, obrigada pela oportunidade que me permitiu crescer tanto enquanto profissional.

Aos meus queridos amigos de pós, Chaveli, Pedro, Silvio, Jéssica, Cléber, Renan, Alana e Haline, cada dia ao lado de vocês foi um aprendizado. Vocês deixam tudo mais leve. Aos amigos da iniciação científica, Júnior, Whadila, Marcelo, Lorenzo, Gabriela Guex, Gabriela Dias, Gabriel e Pyethra, obrigada pela disponibilidade de vocês em sempre me auxiliarem na pesquisa, mas principalmente pela amizade e companheirismo. Admiro todos vocês!

Aos demais professores do GEPPASV, pelos ensinamentos nesses 6 anos participando do nosso grupo de pesquisas. O suporte de vocês é fundamental.

Aos membros da banca examinadora, professor Deividi Pereira e Luis Nascimento, a contribuição de vocês sem dúvidas é essencial ao meu trabalho. Estendo meu agradecimento ao professor Lucas Bueno, pelas inúmeras contribuições ao projeto desta dissertação.

Agradeço à ANP/Petrobrás e ao DNIT, pelos investimentos realizados no GEPPASV. À CAPES, pelo suporte financeiro durante todo o curso de mestrado. À estrutura interna do PPGEC, por sempre sanarem todas as minhas dúvidas e serem tão eficientes no trabalho desempenhado.

Às empresas que forneceram materiais utilizados na pesquisa.

A todos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada, meu muito obrigada. Cresci e aprendo a cada dia com cada um de vocês!



## RESUMO

### PROPOSTA PARA SELEÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

AUTORA: Victória Nunes Ramos  
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

Uma vez que o desempenho de um pavimento depende, dentre outros fatores, do desempenho do ligante e da mistura asfáltica, diversas pesquisas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) dedicaram-se à caracterização desses materiais. A organização estruturada desses dados é necessária para o entendimento dos materiais asfálticos com maior confiabilidade. Nesse sentido, a partir da estruturação sistemática de um banco de dados do grupo, esta pesquisa teve como objetivo classificar os materiais asfálticos utilizando critérios de deformação permanente e fadiga, estabelecer as correlações entre escalas, além de realizar uma classificação geral dos ligantes e misturas asfálticas considerando os dois defeitos conjuntamente. A investigação inicial dos dados mostrou que os indicadores ponto de amolecimento, viscosidade Brookfield a 135°C,  $|G^*|/\sin\phi$ ,  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ,  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , PGH contínuo e “h” da modelagem 2s2p1d, são potenciais indicadores da deformação permanente em ligantes, mas o Jnr foi considerado o mais adequado. Para a fadiga em ligantes, destacaram-se os parâmetros  $\delta$  da modelagem 2s2p1d, ciclos até a falha e o fator de fadiga do ligante ( $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$ ). Tanto para a deformação permanente, quanto para a fadiga, os ligantes modificados por polímero parecem apresentar desempenho superior aos demais, embora existam exceções. Para a deformação permanente em misturas, parecem ser bons indicadores o índice de forma da fração #3/4 do agregado,  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ,  $|E^*|/\sin\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , teor de RAP, parâmetros “h” e E00 (2s2p1d) e “g” (sigmoidal). De forma geral, misturas mais rígidas e/ou modificadas com polímero parecem ser melhores à deformação permanente. Para a fadiga em misturas, os melhores índices observados foram  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , “d” da modelagem sigmoidal, o fator de fadiga da mistura (FFM) e o índice  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs. Nf. As misturas com ligante modificado parecem apresentar melhor comportamento. As relações entre escalas identificaram que o  $\text{Jnr}_{3,2}$ , a viscosidade a 135°C e o ponto de amolecimento podem fazer inferências razoáveis sobre o *Flow Number*, e que se os parâmetros  $\delta$  e “k” do 2s2p1d em ligantes, e o  $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$  podem inferir sobre o FFM das misturas. A fadiga em pavimentos foi simulada pelos programas FlexPAVE™ e MeDiNa, considerando 3 estruturas, adequadas aos tráfegos médio, pesado e extremamente pesado. Para essas simulações, o FlexPAVE™ discretizou melhor as diferenças entre misturas com diferentes ligantes, e o MeDiNa previu, em geral, maiores valores de área trincada. O índice  $\Delta$  foi o mais adequado para inferir sobre a área trincada calculada pelo dano do FlexPAVE™, e o  $\text{MR}^*\text{FFM}$  sobre a área trincada do MeDiNa. As 25 classes de ligantes, identificadas pelo  $\text{Jnr}_{3,2}$  64°C e  $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$  máxPSE, as 6 classes de misturas para cada cenário simulado no FlexPAVE™, e as 4 classes de misturas para cada cenário simulado no MeDiNa, possibilitam a seleção mais assertiva e econômica dos materiais asfálticos com base nos dois principais defeitos das rodovias brasileiras, que ocorrem simultaneamente em campo, adequando-os à condição de tráfego prevista em projeto.

**Palavras-chave:** Classificação de materiais asfálticos. Relações entre escalas. Deformação permanente. Fadiga. Simulação de pavimentos.



## ABSTRACT

### PROPOSAL FOR SELECTION OF ASPHALT BINDERS AND MIXTURES CONSIDERING PERMANENT DEFORMATION AND FATIGUE

AUTHOR: Victória Nunes Ramos  
ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

Since the performance of a pavement depends, among other factors, on the performance of the binder and the asphalt mixture, several researches of the Group of Studies and Research in Pavement and Road Safety (GEPPASV) were dedicated to the characterization of these materials. The structured organization of these data is necessary for the understanding of asphalt materials with greater reliability. In this sense, based on the systematic structuring of a group database, this research aimed to classify asphalt materials using permanent deformation and fatigue criteria, to establish correlations between scales, and to perform a general classification of asphalt binders and mixtures considering both defects together. Initial investigation of the data showed that the indicators softening point, Brookfield viscosity at 135°C,  $|G^*|/\sin\phi$ ,  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ,  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , continuous PGH and "h" from 2s2p1d modeling, are potential indicators of permanent deformation in binders, but  $J_{nr}$  was found to be the most suitable. For fatigue in binders, the parameters  $\delta$  of the 2s2p1d modeling, cycles to failure and the fatigue factor of the binder ( $FFL_{19^\circ\text{C}}$ ) were highlighted. For both permanent deformation and fatigue, polymer-modified binders appear to outperform the others, although there are exceptions. For permanent deformation in mixtures, the shape index of the aggregate fraction #3/4,  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ,  $|E^*|/\sin\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , RAP content, parameters "h" and E00 (2s2p1d) and "g" (sigmoidal) seem to be good indicators. In general, stiffer and/or polymer-modified mixtures appear to be better for permanent deformation. For fatigue in mixtures, the best indices observed were  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , "d" from sigmoidal modeling, the mixture fatigue factor (FFM) and the index  $\Delta$  from  $G^R$  vs.  $N_f$  curves. Mixtures with modified binder seem to show better behavior. Relationships between scales identified that  $J_{nr_{3.2}}$ , viscosity at 135°C and softening point can make reasonable inferences about Flow Number, and that if the parameters  $\delta$  and "k" of 2s2p1d in binders, and  $FFL_{19^\circ\text{C}}$  can infer about the FFM of the mixtures. Pavement fatigue was simulated by FlexPAVE<sup>TM</sup> and MeDiNa programs, considering 3 structures, suitable for medium, heavy and extremely heavy traffic. For these simulations, FlexPAVE<sup>TM</sup> better discretized the differences between mixtures with different binders, and MeDiNa predicted, in general, higher cracked area values. The index  $\Delta$  was the most suitable to infer about the cracked area calculated by FlexPAVE<sup>TM</sup> damage, and  $MR^*FFM$  about the cracked area of MeDiNa. The 25 binder classes, identified by  $J_{nr_{3.2}}$  64°C and  $FFL_{19^\circ\text{C}}$  maxPSE, the 6 mixture classes for each scenario simulated in FlexPAVE<sup>TM</sup>, and the 4 mixture classes for each scenario simulated in MeDiNa, enable the most assertive and economical selection of asphalt materials based on the two main defects of Brazilian pavements, which occur simultaneously in the field, adapting them to the traffic condition foreseen in the project.

**Keywords:** Classification of asphalt materials. Relationships between scales. Permanent deformation. Fatigue. Pavement simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento de um material viscoelástico sob carregamento de <i>creep</i> .....	37
Figura 2 - Envelhecimento de (a) curto prazo (RTFOT) e (b) longo prazo (PAV).....	39
Figura 3 - Amostras do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.....	40
Figura 4 - Método de cálculo dos parâmetros $J_{nr}$ e %R.....	41
Figura 5 - Determinação do PG de baixa temperatura pelo BBR .....	45
Figura 6 - Domínios de comportamento para materiais asfálticos em função da temperatura e da amplitude de deformação.....	57
Figura 7 - Configuração do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) ....	59
Figura 8 - Resistência à tração (RT) de amostras de módulo complexo com diferentes dosagens, ligantes e granulometrias e métodos de composição granulométrica .....	60
Figura 9 - Relação entre RT e o potencial de afundamento pelo APA .....	61
Figura 10 - Ensaio de MR e variáveis de cálculo .....	63
Figura 11 - Correlação entre o módulo de resiliência e a deformação permanente .....	64
Figura 12 - Esquema de aplicação de carga no ensaio de módulo complexo .....	66
Figura 13 - (a) Análogo mecânico do modelo 2s2p1d e impacto dos parâmetros do modelo nas curvas mestras de (b) módulo dinâmico e (c) ângulo de fase. ....	68
Figura 14 - Correlação entre $FN_{60^{\circ}C}$ e $ E^* _{54^{\circ}C:1Hz}$ encontrada por Possebon (2021).....	68
Figura 15 - Correlação entre $FN_{60^{\circ}C/204kPa}$ e $ E^* _{\sin\phi 54^{\circ}C:1Hz}$ encontrada por Faccin (2018).....	69
Figura 16 - Correlação entre $ E^* _{\sin\phi 21^{\circ}C:1Hz}$ e o dano acumulado por fadiga em 120 meses de Schuster (2018) .....	70
Figura 17 - Afundamentos por consolidação (trilha da esquerda) e plástico (trilha da direita)	71
Figura 18 - Deformação permanente acumulada ao longo do ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do Flow Number.....	73
Figura 19 - Simulador de tráfego de laboratório Hamburgo (HWTD).....	75
Figura 20 - Esquema da evolução da deformação permanente no ensaio de Hamburgo .....	76
Figura 21 - Evolução do (a) módulo dinâmico e do (b) ângulo de fase em ensaios cíclicos ...	79
Figura 22 - Estado de tensões no centro de um CP cilíndrico sob compressão diametral .....	81
Figura 23 - Área considerada no cálculo do Fator de Fadiga da Mistura (FFM) .....	82
Figura 24 - Classes de fadiga do MeDiNa para misturas asfálticas densas.....	84
Figura 25 - Evolução de $WCR$ e (b) taxa de $WCR$ .....	88
Figura 26 - Curvas características de dano (C vs. S).....	90

Figura 27 - Etapas de avaliação multiescala dos materiais betuminosos.....	91
Figura 28 - Domínio viscoelástico linear de ligantes e misturas asfálticas no gráfico de deformação vs. número de ciclos em escala log-log e ensaios realizados .....	93
Figura 29 - Esquema da transformação SHStS para prever as propriedades da mistura a partir do ligante .....	95
Figura 30 - Jnr3.2 (MSCR) vs. Nf (LAS) de Hassanpour-Kasanagh et al. (2020).....	106
Figura 31 - Classificação global de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente de Schuster (2018) .....	107
Figura 32 - Conceito de diagrama de desempenho de misturas pela dosagem balanceada ...	108
Figura 33 - Diagrama (a) 2D e (b) 3D para otimização do teor de agente rejuvenescedor de Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer (2018) .....	110
Figura 34 - Diagramas de Interação de Desempenho de Yousefi et al. (2023) .....	111
Figura 35 - Gráfico “Hamburg-DC(T)” de Buttlar et al. (2017).....	112
Figura 36 - Planejamento da pesquisa.....	114
Figura 37 - Enquadramento do primeiro conjunto de novas misturas na Faixa III da especificação DERSA ET-P 00/027 (2005).....	123
Figura 38 - Nomenclatura do segundo conjunto de novas misturas .....	124
Figura 39 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa BN25-D - Pedra A .....	126
Figura 40 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa BN25-D - Pedra B.....	127
Figura 41 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa EGL-19 - Pedra A .....	128
Figura 42 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa EGL-19 - Pedra B .....	129
Figura 43 - (a) Reômetro de cisalhamento dinâmico e (b) amostra entre as placas .....	131
Figura 44 - $PG_H$ e $ G^* /\sin\phi$ para os ligantes desta pesquisa.....	132
Figura 45 - Modelagem 2s2p1d de (a) $ G^* $ e (b) $\phi$ : condição virgem.....	133
Figura 46 - Modelagem 2s2p1d de (a) $ G^* $ e (b) $\phi$ : condição RTFOT .....	133
Figura 47 - Modelagem 2s2p1d de (a) $ G^* $ e (b) $\phi$ : condição PAV .....	134
Figura 48 - Curvas mestras de (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase, com a modelagem 2s2p1d, para o primeiro conjunto de misturas de laboratório .....	137
Figura 49 - Valores de Jnr3.2 e %R3.2 para os ligantes desta pesquisa .....	138
Figura 50 - Amostra no ensaio de Flow Number.....	139
Figura 51 - Valores de FN para os dois conjuntos de misturas de laboratório e limites de Nascimento (2008) e Faccin (2018) .....	140

Figura 52 - LAS após RTFOT: (a) Curvas de fadiga pelo Máx PSE, (b) evolução de $W^R$ , (c) curvas de fadiga pelo $35\% G^* \text{sen}\phi$ e (d) C vs S.....	142
Figura 53 - LAS após PAV: (a) Curvas de fadiga pelo Máx PSE, (b) evolução de WR, (c) curvas de fadiga pelo $35\% G^* \text{sen}\phi$ e (d) C vs S .....	143
Figura 54 - Ciclos de falha (Nf) em função da tensão de tração aplicada do ensaio de fadiga por compressão diametral para o primeiro conjunto de misturas de laboratório	145
Figura 55 - Amostra no ensaio de fadiga uniaxial à tração direta .....	145
Figura 56 – (a) Envoltórias de ruptura baseadas no critério de falha $G^R$ e (b) curvas características de dano (C vs. S) para o primeiro conjunto de misturas de laboratório.....	146
Figura 57 - Estruturas consideradas na simulação de pavimentos .....	147
Figura 58 - Esquema de consideração do tráfego para as simulações de pavimentos.....	149
Figura 59 - Evolução da área trincada prevista pelo MeDiNa: (a) E1 = 5 cm pelo tráfego acumulado, (b) E2 = 10 cm pelo tráfego acumulado, (c) E3 = 15 cm pelo tráfego acumulado e (d) todas as estruturas ao longo do período de 10 anos, para o primeiro conjunto de misturas .....	149
Figura 60 - Evolução do dano pelo FlexPAVE™: pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e ao longo de 10 anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas .....	150
Figura 61 - AT prevista pela função de transferência de Nascimento (2015): pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e pelos 10s anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas .....	151
Figura 62 - AT prevista pela função de transferência de Nascimento (2021): pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e pelos 10s anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas .....	151
Figura 63 - Estruturação do banco de dados: características gerais e ligantes asfálticos .....	153
Figura 64 - Estruturação do banco de dados: agregados, volumetria, dosagem e rigidez das misturas.....	154
Figura 65 - Estruturação do banco de dados: parâmetros de danificação das misturas.....	156
Figura 66 - Correlações entre $Jnr_{3,2} 64^\circ\text{C}$ e $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ : sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP.....	169

Figura 67 - Correlações entre $Jnr_{3,2}$ 64°C e $ G^* _{65°C:1Hz}$ : sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP.....	170
Figura 68 - Correlações entre $Jnr_{3,2}$ 64°C e PG contínuo RTFOT: sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP .....	171
Figura 69 - Intervalos de confiança para $\phi_{65°C:1Hz}$ dentro dos grupos de $Jnr_{3,2}$ .....	173
Figura 70 - Intervalos de confiança para PGH contínuo RTFOT .....	174
Figura 71 - Correlações entre $Jnr$ e (a) ponto de amolecimento e (b) viscosidade Brookfield a 135°C.....	174
Figura 72 - Correlações entre $FFL_{19°C}$ e $ G^* _{19°C:10Hz}$ : geral (a) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (d) máxPSE .....	181
Figura 73 - Correlações entre $FFL_{19°C}$ e $\phi_{19°C:10Hz}$ : geral (a) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (d) máxPSE .....	181
Figura 74 - Correlações entre $FFL_{19°C}$ e $\delta$ 2s2p1d CAP (RT): geral (a) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35% $ G^* _{sen\phi}$ e (d) máxPSE .....	182
Figura 75 - Correlações com $FFL_{19°C}$ (máxPSE) sem ligantes extraídos: geral (a) $\phi_{19°C:10Hz}$ e (b) $\delta$ 2s2p1d CAP RT; por tipo de CAP (c) $\phi_{19°C:10Hz}$ e (d) $\delta$ 2s2p1d CAP RT.....	184
Figura 76 - Correlações com FN: $ E^* _{54°C:1Hz}$ (a) geral e (b) por tipo de CAP; $ E^* _{sen\phi_{54°C:1Hz}}$ (c) geral e (d) por tipo de CAP; g sigmoidal (e) geral e (f) por tipo de CAP.....	191
Figura 77 - Correlações com FFM S-VECD: d (sigmoidal) (a) geral e (b) por tipo de CAP; $\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf) (c) geral e (d) por tipo de CAP; $ E^* _{21°C:1Hz}$ (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	196
Figura 78 - Classes de FFM S-VECD para as misturas asfálticas .....	197
Figura 79 - Correlações entre MR e FFM MeDiNa com o módulo dinâmico.....	201
Figura 80 - Correlações com o FN: ponto de amolecimento (a) geral e (b) por tipo de CAP; viscosidade Brookfield 135°C (c) geral e (d) por tipo de CAP.....	207
Figura 81 - Correlações com o FN: PGH contínuo RT (a) geral e (b) por tipo de CAP; $ G^* _{65°C:1Hz}$ (c) geral e (d) por tipo de CAP; $\phi_{65°C:1Hz}$ (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	210

Figura 82 - Correlações com o FN: Jnr <sub>3,2</sub> 64°C (a) geral e (b) por tipo de CAP; Jnr <sub>3,2</sub> PGH (c) geral e (d) por tipo de CAP.....	211
Figura 83 - Correlação entre $\delta$ 2s2p1d CAP RT e FFM S-VECD: (a) geral e (b) por tipo de ligante .....	214
Figura 84 - Correlação com FFM S-VECD: Nf 35% G* sen $\phi$ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e Nf máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante .....	215
Figura 85 - Correlação com FFM S-VECD: FFL 35% G* sen $\phi$ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e FFL máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante.....	216
Figura 86 - Correlações com FFM-MeDiNa: $\phi$ 65°C:1Hz (a) geral e (b) por tipo de CAP; $\beta$ 2s2p1d VG (c) geral e (d) por tipo de CAP; e k 2s2p1d VG (e) geral e (f) por tipo de CAP.....	219
Figura 87 - Correlações com FFM-MeDiNa:  G* 19°C:10Hz (a) geral e (b) por tipo de CAP; e FFL máxPSE (c) geral e (d) por tipo de CAP.....	221
Figura 88 - Correlação de FFM (E1): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	224
Figura 89 - Correlação de $\Delta$ (E1): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	225
Figura 90 - Correlação de FFM (E2): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	227
Figura 91 - Correlação de $\Delta$ (E2): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	228
Figura 92 - Correlação de FFM (E3): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	230
Figura 93 - Correlação de $\Delta$ (E3): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	231

Figura 94 - Correlação de FFM MeDiNa: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	235
Figura 95 - Correlação de MR: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	237
Figura 96 - Correlação de MR*FFM: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP .....	239
Figura 97 - $FFL_{19^{\circ}C} 35\% G^* \text{sen}\phi$ (RTFOT) vs. $Jnr_{3,2}$ PGH .....	247
Figura 98 - $FFL_{19^{\circ}C}$ máxPSE (RTFOT) vs. $Jnr_{3,2}$ PGH .....	248
Figura 99 - $FFL_{19^{\circ}C} 35\% G^* \text{sen}\phi$ (RTFOT) vs. $Jnr_{3,2}$ 64°C .....	250
Figura 100 - $FFL_{19^{\circ}C}$ máxPSE (RTFOT) vs. $Jnr_{3,2}$ 64°C .....	251
Figura 101 - Classes de ligantes asfálticos considerando deformação permanente e fadiga .	252
Figura 102 - AT% Nascimento (2015) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E1 .....	255
Figura 103 - AT% Nascimento (2021) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E1 .....	257
Figura 104 - AT% Nascimento (2015) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E2 .....	258
Figura 105 - AT% Nascimento (2021) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E2 .....	259
Figura 106 - AT% Nascimento (2015) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E3 .....	259
Figura 107 - AT% Nascimento (2021) vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E3 .....	260
Figura 108 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites de Faccin, 2018) e fadiga, nas simulações do FlexPAVE <sup>TM</sup> .....	262
Figura 109 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites do MeDiNa) e fadiga, nas simulações do FlexPAVE <sup>TM</sup> .....	265
Figura 110 - Classes de fadiga para as misturas pelo MeDiNa .....	267
Figura 111 - AT% MeDiNa vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E1 .....	267
Figura 112 - AT% MeDiNa vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E2 .....	268
Figura 113 - AT% MeDiNa vs. <i>Flow Number</i> para a estrutura E3 .....	269
Figura 114 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites de Faccin, 2018) e fadiga, nas simulações do MeDiNa .....	271
Figura 115 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites do MeDiNa) e fadiga, nas simulações do MeDiNa .....	273

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de ligantes pelo FFL <sub>19°C</sub> .....	43
Tabela 2 - Especificação brasileira para CAP 30/45 e CAP 50/70 .....	49
Tabela 3 - Especificação brasileira para CAP TLA .....	50
Tabela 4 - Especificação brasileira para asfalto borracha .....	50
Tabela 5 - Especificação brasileira para asfalto polímero .....	51
Tabela 6 - Classificação de tráfego para ligantes asfálticos .....	54
Tabela 7 - Diferenças entre os ensaios de Módulo de Resiliência e Módulo Complexo .....	62
Tabela 8 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego encontrados na literatura .....	74
Tabela 9 - Limites e classes de desempenho das misturas quanto à deformação permanente do MeDiNa .....	74
Tabela 10 - Limites de ATR segundo o Manual do MeDiNa .....	99
Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos.....	116
Tabela 12 - Características dos agregados utilizados no primeiro conjunto de novas misturas .....	122
Tabela 13 - Granulometria dos materiais individuais, granulometria final da mistura, faixa III e faixa de trabalho da especificação DERSA ET-P 00/027 (2005) do primeiro conjunto de novas misturas.....	122
Tabela 14 - Propriedades dos ligantes asfálticos do primeiro conjunto de novas misturas....	123
Tabela 15 - Características de dosagem e resistência do primeiro conjunto de novas misturas. ....	124
Tabela 16 - Características dos agregados do primeiro conjunto de misturas de laboratório	125
Tabela 17 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa BN25-D - Pedra A .....	125
Tabela 18 - Composição das misturas da faixa BN25-D - Pedra A .....	126
Tabela 19 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa BN25-D - Pedra B .....	126
Tabela 20 - Composição das misturas da faixa BN25-D - Pedra B .....	127
Tabela 21 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa EGL-19 - Pedra A .....	127
Tabela 22 - Composição das misturas da faixa EGL-19 - Pedra A.....	128

Tabela 23 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa EGL-19 - Pedra B.....	128
Tabela 24 - Composição das misturas da faixa EGL-19 - Pedra B.....	129
Tabela 25 - Propriedades dos ligantes utilizados no segundo conjunto de misturas de laboratório .....	129
Tabela 26 - Características de dosagem e resistência do segundo conjunto de misturas de laboratório .....	130
Tabela 27 - Coeficientes 2s2p1d e de WLF para os ligantes desta pesquisa .....	132
Tabela 28 - Parâmetro G-R para os novos ligantes.....	134
Tabela 29 - $\omega c$ e $R^{-1}$ -value para os novos ligantes.....	135
Tabela 30 - Valores de MR, DP, CV% e resultados de RT para o primeiro conjunto de misturas .....	136
Tabela 31 - Coeficientes do modelo 2s2p1d e da equação de WLF para o primeiro conjunto de misturas de laboratório .....	137
Tabela 32 - Resultados de MSCR para os ligantes desta pesquisa .....	138
Tabela 33 - Valores de FN, DP, CV% e parâmetros do modelo de Francken para os dois conjuntos de misturas de laboratório.....	140
Tabela 34 - Número de ciclos até a falha pelos critérios 35% G* sen $\phi$ e Máx PSE, coeficientes da C vs. S, coeficientes A e B para construção das curvas de fadiga, e FFL19°C para ligantes após RTFOT .....	141
Tabela 35 - Número de ciclos até a falha pelos critérios 35% G* sen $\phi$ e Máx PSE, coeficientes da C vs. S, coeficientes A e B para construção das curvas de fadiga, e FFL19°C para ligantes após PAV .....	142
Tabela 36 - MR, RT, coeficientes k1 e k2 da Equação 7 do MeDiNa, FFM e classe de fadiga .....	144
Tabela 37 - Coeficientes da equação de Arrhenius e do modelo sigmoidal: inputs das propriedades LVE do software FlexPAVE™ .....	146
Tabela 38 - Coeficientes C11 e C12 do fitting das curvas Cvs.S e coeficientes $\gamma$ , $\Delta$ e $\alpha$ .....	146
Tabela 39 - Espessuras mínimas de revestimento betuminoso segundo o método de dimensionamento do DNER (1981).....	148
Tabela 40 - Quantidade de dados por propriedade .....	159
Tabela 41 - Classificação do coeficiente de correlação linear de Pearson.....	162
Tabela 42 - Melhores correlações lineares ligante-mistura para deformação permanente ....	163
Tabela 43 - Ranqueamento dos ligantes pelo parâmetro $Jnr_{3,2}$ 64°C.....	168

Tabela 44 - Intervalos de confiança para $ G^* _{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , ponto de amolecimento e viscosidade a $135^\circ\text{C}$ dentro dos intervalos de $\text{Jnr}_{3,264^\circ\text{C}}$ .....	175
Tabela 45 - Melhores correlações lineares ligante-mistura para fadiga .....	177
Tabela 46 - Ranqueamento dos ligantes pelo parâmetro $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$ .....	179
Tabela 47 - Divisão dos ligantes segundo limites para $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$ (máxPSE) de Possebon (2021) .....	183
Tabela 48 - Intervalos de confiança para $19^\circ\text{C}:10\text{Hz}$ e $\delta_{2s2p1d}$ CAP RT dentro dos limites de $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$ (máxPSE) .....	184
Tabela 49 - Melhores correlações lineares para deformação permanente em misturas .....	186
Tabela 50 - Classificação das misturas pelo FN e limites de tráfego de Faccin (2018).....	188
Tabela 51 - Intervalos de confiança de propriedades das misturas segundo grupos de FN ...	193
Tabela 52 - Melhores correlações lineares para fadiga em misturas.....	194
Tabela 53 - Intervalos de confiança para $ E^* _{21^\circ:1\text{Hz}}$ e $\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf) nas classes de FFM..	198
Tabela 54 - Melhores correlações lineares entre FFM-MeDiNa e propriedades das misturas .....	199
Tabela 55 - Classificação das misturas pelas classes de fadiga do MeDiNa.....	200
Tabela 56 - Intervalos de confiança para índices de ligantes nos grupos de FN.....	212
Tabela 57 - Melhores coeficientes de correlação de Pearson entre FFM-MeDiNa e parâmetros dos ligantes .....	218
Tabela 58 - Ranqueamento das misturas pelo FFM S-VECD e $\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf) .....	232
Tabela 59 - Vantagens e desvantagens dos indicadores de ligantes e misturas asfálticas.....	245
Tabela 60 - Limites para cada classe de ligante e nomenclatura final .....	254
Tabela 61 - Intervalos de confiança para $\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf) com base nos grupos de AT% .....	261
Tabela 62 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™ .....	263
Tabela 63 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™ .....	264
Tabela 64 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™ .....	264
Tabela 65 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™ .....	265
Tabela 66 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™ .....	266

Tabela 67 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™ .....	266
Tabela 68 - Intervalos de confiança para MR*FFM de acordo com a área trincada do MeDiNa .....	270
Tabela 69 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa .....	271
Tabela 70 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa .....	272
Tabela 71 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa.....	272
Tabela 72 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa .....	273
Tabela 73 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa .....	273
Tabela 74 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa .....	274

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ARE	Agentes Rejuvenescedores Emulsionados
AR	Agentes Rejuvenescedores
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
DAER-RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - RS
DMM	Densidade máxima medida
DMT	Densidade máxima teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DP	Deformação Permanente
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
E*	Módulo Complexo
E*	Módulo Dinâmico
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
FAD	Faixa de agregados dominantes
FAF	Fino do Agregado Fino
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FN	<i>Flow Number</i>
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
GAF	Graúdo do agregado fino
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária

Gsb	Massa específica aparente
Gmm	Massa específica máxima medida
Hz	Hertz
IF	Índice de Flexibilidade
IT	Índice de Tenacidade
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	<i>Linear Variable Differential Trasformer</i>
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
MR	Módulo de resiliência
N	Número de Ciclos
NBR	Norma Brasileira
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RBV	Relação Betume-Vazios
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
RV	<i>Rotational Viscometer</i>
SBR	<i>Styrene Butadiene Rubber</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
Sd	<i>Standard Error</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VECD	<i>Viscoelastic Continuumm Damage</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	Corpo dos Engenheiros do Exército Americano
Vv	Volume de vazios
2s2p1d	<i>2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>32</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	33
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
2.1	CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DE LIGANTES ASFÁLTICOS .....	36
<b>2.1.1</b>	<b>Comportamento de ligantes asfálticos</b> .....	<b>36</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Ensaio e índices para avaliação de ligantes asfálticos</b> .....	<b>38</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Sistemas de classificação de ligantes asfálticos</b> .....	<b>46</b>
2.1.3.1	Sistemas clássicos de classificação .....	47
2.1.3.2	Sistema de classificação Superpave .....	50
2.2	CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	55
<b>2.2.1</b>	<b>Comportamento das misturas asfálticas</b> .....	<b>55</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Propriedades mecânicas das misturas asfálticas</b> .....	<b>57</b>
2.2.2.1	Caracterização da ruptura com carregamento monotônico .....	58
2.2.2.1.1	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	58
2.2.2.2	Caracterização da rigidez: domínio viscoelástico linear .....	61
2.2.2.2.1	<i>Módulo de Resiliência</i> .....	62
2.2.2.2.2	<i>Módulo Complexo</i> .....	65
2.2.2.3	Caracterização da resistência à deformação permanente .....	70
2.2.2.3.1	<i>Ensaio de creep dinâmico: Flow Number</i> .....	72
2.2.2.3.2	<i>Ensaio de Hamburgo</i> .....	75
2.2.2.4	Caracterização da resistência à fadiga .....	77
2.2.2.4.1	<i>Ensaio de fadiga por compressão diametral e sua utilização no MeDiNa</i> .....	80
2.2.2.4.2	<i>Ensaio uniaxial de fadiga à tração direta, S-VECD e uso do FlexPAVE<sup>TM</sup></i> .....	85
2.3	ABORDAGEM MULTIESCALA.....	90
<b>2.3.1</b>	<b>Previsões e inferências acerca do comportamento das misturas</b> .....	<b>92</b>
2.3.1.1	Viscoelasticidade linear .....	92
2.3.1.2	Deformação Permanente .....	95
2.3.1.3	Fadiga.....	97
<b>2.3.2</b>	<b>Previsão do desempenho dos pavimentos: ATR e área trincada</b> .....	<b>98</b>
2.3.2.1	Deformação permanente: afundamento em trilha de roda .....	99
2.3.2.2	Fadiga: área trincada .....	101

2.4	AVALIAÇÃO INTEGRADA DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	105
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>113</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	113
3.2	PESQUISAS DO GRUPO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM PAVIMENTAÇÃO E SEGURANÇA VIÁRIA (GEPPASV).....	115
3.3	CARACTERIZAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS PARA INSERÇÃO NO BANCO DE DADOS.....	120
<b>3.3.1</b>	<b>Materiais utilizados .....</b>	<b>121</b>
3.3.1.1	Primeiro conjunto de novas misturas .....	121
3.3.1.2	Segundo conjunto de novas misturas .....	123
<b>3.3.2</b>	<b>Caracterização da rigidez .....</b>	<b>130</b>
3.3.2.1	Ligantes asfálticos .....	130
3.3.2.2	Misturas asfálticas .....	135
<b>3.3.3</b>	<b>Caracterização da resistência à deformação permanente .....</b>	<b>137</b>
3.3.3.1	Ligantes asfálticos .....	138
3.3.3.2	Misturas asfálticas .....	139
<b>3.3.4</b>	<b>Caracterização da resistência à fadiga .....</b>	<b>140</b>
3.3.4.1	Ligantes asfálticos .....	141
3.3.4.2	Misturas asfálticas .....	143
3.4	ANÁLISE MECÂNICA DE PAVIMENTOS.....	146
<b>4</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS.....</b>	<b>152</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>161</b>
5.1	CLASSIFICAÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS SEGUNDO DIFERENTES CRITÉRIOS .....	161
<b>5.1.1</b>	<b>Deformação permanente em ligantes asfálticos.....</b>	<b>163</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Fadiga em ligantes asfálticos .....</b>	<b>176</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Deformação permanente em misturas asfálticas .....</b>	<b>185</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Fadiga em misturas asfálticas.....</b>	<b>193</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Conclusões parciais da seção .....</b>	<b>201</b>
5.2	RELAÇÕES ENTRE ESCALAS.....	205
<b>5.2.1</b>	<b>Deformação permanente.....</b>	<b>206</b>
5.2.1.1	Do ligante à mistura.....	206
<b>5.2.2</b>	<b>Fadiga .....</b>	<b>213</b>

5.2.2.1	Do ligante à mistura .....	213
5.2.2.2	Da mistura para a simulação de pavimentos .....	221
5.2.2.2.1	<i>Simulações no FlexPAVE™</i> .....	221
5.2.2.2.2	<i>Simulações no MeDiNa</i> .....	234
<b>5.2.3</b>	<b>Conclusões parciais da seção</b> .....	<b>238</b>
5.3	CLASSIFICAÇÃO GERAL DE MATERIAIS .....	246
<b>5.3.1</b>	<b>Ligantes asfálticos</b> .....	<b>246</b>
5.3.2.1	<i>Flow Number</i> vs. propriedades de fadiga pelo FlexPAVE™ .....	253
5.3.2.2	<i>Flow Number</i> vs. propriedades de fadiga pelo MeDiNa.....	264
<b>5.3.3</b>	<b>Conclusões parciais da seção</b> .....	<b>274</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>277</b>
6.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	281
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>283</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (VIRGEM)</b> .....	<b>304</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (RTFOT)</b> .....	<b>324</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (PAV)</b> .....	<b>347</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO COMPLEXO DAS MISTURAS</b> .....	<b>370</b>
	<b>APÊNDICE E – CONTORNOS DE DANO DAS SIMULAÇÕES DE PAVIMENTOS NO FLEXPAVE™</b> .....	<b>375</b>
	<b>APÊNDICE F – EVOLUÇÃO DO DANO MÉDIO ACUMULADO CALCULADO PELO FLEXPAVE™, E DA ÁREA TRINCADA PELAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE NASCIMENTO (2015) E NASCIMENTO (2021), E PELA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MEDINA</b> .....	<b>384</b>
	<b>APÊNDICE G – MATRIZES DE CORRELAÇÃO</b> .....	<b>386</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Para que um pavimento atinja e mantenha ao longo de sua vida útil o desempenho esperado, diversas variáveis são ajustadas a fim de que apresentem desempenho satisfatório tanto individualmente quanto combinadas aos demais parâmetros de projeto. A concepção de um pavimento flexível caminha por campos de conhecimento que envolvem mecânica dos solos, hidráulica e drenagem, mecânica de pavimentos, estudos de tráfego e a própria ciência de materiais atrelada aos materiais asfálticos.

Esse conjunto de variáveis combinadas compõem, portanto, o pavimento final, que, ao ser submetido às solicitações das mais diversas origens, responderá de uma maneira específica. A resposta observada, em termos de tensões e deformações, condiciona o padrão de danificação do pavimento asfáltico, que, por sua vez, dita a vida útil real em campo e os intervalos necessários à manutenção e à restauração (ATTIA et al., 2022).

Diversas são as variáveis que podem ser observadas para o entendimento de um pavimento. É possível mencionar, por exemplo, o comportamento dos solos e materiais granulares das camadas inferiores, os parâmetros volumétricos encontrados pelo projeto da mistura asfáltica, e ainda o comportamento individual dos componentes da mesma, como agregados e ligantes asfálticos (BALBO, 2007).

Os grupos de pesquisa formados na área de pavimentação asfáltica há diversos anos vêm sedimentando o conhecimento de pavimentos, por meio de trabalhos acadêmicos que estudam exaustivamente as variáveis que condicionam o comportamento mencionado, tanto nacional quanto internacionalmente. As investigações dedicaram-se, ainda, não somente ao estudo dos materiais constituintes de um pavimento, mas ao desenvolvimento de metodologias de análise que já evoluíram de métodos puramente empíricos para métodos mecanístico-empíricos (HUANG; DI BENEDETTO, 2015). O desenvolvimento desses métodos, com suas premissas e considerações, permitiu um grande avanço no dimensionamento e na previsão do desempenho de pavimentos asfálticos.

Para que seja possível, portanto, a utilização dessas metodologias, é imperativa a caracterização correta dos materiais comentados anteriormente. Nesse sentido, destaca-se também o esforço da pesquisa na busca pela rotina de ensaios mais assertiva, que seja capaz de aliar praticidade e eficiência na obtenção das propriedades dos materiais (BROWN, 1997).

No entanto, é importante que as informações disponíveis sejam transformadas em conhecimento para auxiliarem nas tomadas de decisão. A disponibilidade de uma maior quantidade de dados, no que se refere às misturas asfálticas, pode gerar observações,

classificações e previsões com um maior nível de confiabilidade, promovendo uma visão global desses materiais.

O Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) atua desde 2010 no âmbito das pesquisas da Universidade Federal de Santa Maria. Desde então, foram desenvolvidas investigações que contribuíram para o entendimento de materiais para pavimentação, além de participar com trechos experimentais do desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos brasileiro (MeDiNa). Nesse sentido, este trabalho buscou realizar a análise global de desempenho dos materiais asfálticos reunindo os dados dos pesquisadores do GEPPASV e acrescentando 13 novos materiais.

Além disso, os estudos do grupo reúnem distintas metodologias de caracterização, tanto para os constituintes individuais como para as misturas finais. Portanto, esta pesquisa elaborou um banco de dados estruturado, a avaliação dos materiais nas escalas ligante e mistura, e suas correlações, bem como realizará a classificação global das misturas do GEPPASV frente aos dois principais defeitos das rodovias brasileiras, ou seja, a deformação permanente e a fadiga.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

A partir da sistematização de um banco de dados estruturado de ligantes e misturas asfálticas do GEPPASV, esta pesquisa tem como objetivo geral obter uma visão sistêmica dos materiais asfálticos, visando sua classificação e seleção.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender o objetivo geral desta dissertação, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- 1) Estruturar um banco de dados de ligantes e misturas asfálticas do GEPPASV;
- 2) Utilizar diferentes indicadores para ranquear os materiais asfálticos em utilização corrente nas obras de pavimentação, nas escalas de ligantes e misturas asfálticas;
- 3) Verificar as relações entre escalas de parâmetros de ligantes e misturas asfálticas;

4) Realizar a classificação geral dos ligantes e misturas asfálticas a partir dos parâmetros de deformação permanente e fadiga conjuntamente, estabelecendo classes para seleção inicial de materiais, para três níveis de tráfego.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O desempenho de um pavimento depende de uma série de fatores, como por exemplo do projeto estrutural, do projeto da mistura asfáltica e do comportamento de seus constituintes, além do processo de execução dos trechos. Nesse sentido, as misturas asfálticas são constituídas por agregados pétreos adequados em uma faixa granulométrica, ligantes asfálticos, vazios preenchidos com ar, além de eventuais aditivos. Assim, é necessário estudar separada e conjuntamente esses materiais para possibilitar previsões de comportamento e estudar mecanismos de falha (ASPHALT INSTITUTE, 2007; KIM, 2009; LEITE; OSMARI; ARAGÃO, 2022).

A caracterização dos materiais, além de oferecer maior previsibilidade de comportamento, auxilia na produção de tipos de ligantes e materiais betuminosos de acordo com as demandas do mercado. Nesse sentido, destaca-se o desafio da variabilidade entre os materiais, visto que as características variam com o óleo cru, processo de refino e coleta de amostras (SPEIGHT, 2015). Assim, para promover maior assertividade nas tomadas de decisão em obras rodoviárias, torna-se interessante a construção de um banco de dados com a caracterização de diferentes materiais.

Neste capítulo serão abordados conceitos e metodologias fundamentais para a correta caracterização de materiais. O primeiro tópico diz respeito à caracterização avançada de ligantes asfálticos, abordando seu comportamento, ensaios de caracterização e especificações atualmente utilizadas. Por fim, são trazidos novos avanços nesse sentido, com metodologias de ensaio e busca por novos índices de previsão de comportamento.

O segundo tópico traz a caracterização avançada de misturas asfálticas, dividida em rigidez, deformação permanente e fadiga. Além disso, traz uma abordagem multiescala, com resultados de estudos que buscam correlacionar química, reologia de ligantes, reologia de misturas asfálticas, e domínios de danificação em laboratório e em campo. Por fim, o capítulo se encerra com uma visão sistemática dos materiais, mostrando a consideração conjunta dos defeitos e conceitos de dosagem balanceada.

Cabe destacar aqui que, em geral, o termo “comportamento” é utilizado para sinalizar a resposta de um material quando solicitado por um carregamento. Já o termo “desempenho” vem sendo utilizado para descrever o resultado de ensaios de laboratório relacionando-os ao comportamento em campo, no que se refere ao nível dos defeitos encontrados (quando o

material é aplicado em campo) ou previstos (quando se simulam pavimentos por métodos mecanístico-empíricos). Uma vez que não há consenso na literatura sobre a utilização dessas expressões, frequentemente elas se confundem em um mesmo significado, e, portanto, serão utilizadas como sinônimos no contexto desta dissertação.

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

### 2.1.1 Comportamento de ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos são originados a partir do refino do petróleo. Nas refinarias, o óleo cru é transformado em diversos subprodutos, como gasolina, diesel e querosene de aviação, e o material residual do processo de refino é o Cimento Asfáltico de Petróleo. No Brasil existem em torno de 20 refinarias da Petrobras, das quais nove produzem CAP 50/70 e apenas três produzem CAP 30/45 devido a questões de adaptação logística e necessidades do mercado consumidor (POSSEBON, 2021). Além desses, as refinarias ainda produzem asfalto diluído CM-30. Outros produtos são derivações dos CAPs, como emulsões asfálticas, asfaltos industrialmente oxidados ou soprados, outros tipos de asfalto diluído, ligantes modificados com polímeros (AMP) ou com borracha (AMB) e agentes rejuvenescedores (AR ou ARE) (BERNUCCI et al., 2022).

Os ligantes asfálticos são constituídos por hidrocarbonetos em sua maioria, e alguns heteroátomos (como oxigênio e enxofre). Suas associações podem ser classificadas como saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, segundo a metodologia europeia SARA (HUNTER; SELF; READ, 2015). No asfalto as forças químicas a nível molecular influenciam propriedades físicas e reológicas, sendo que os componentes mais importantes são os de alto peso molecular (resinas e asfaltenos). Esses constituintes formam aglomerados em nanoescala, e a força dessas ligações depende da temperatura (as quais se quebram reversivelmente), daí a suscetibilidade térmica dos ligantes asfálticos. Além disso, é importante ressaltar que são materiais propensos à oxidação, ganhando maior rigidez e comportamento frágil (SPEIGHT, 2015).

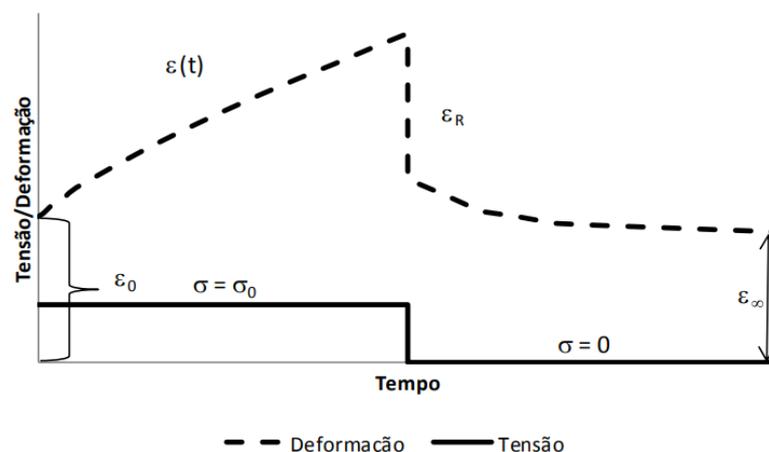
O comportamento dos ligantes asfálticos depende da temperatura e do tempo de carregamento. Um ligante pode se comportar da mesma forma se estiver a 60°C por uma hora ou a 25°C por 10 horas (MCGENNIS; SHULER; BAHIA, 1994). Em altas temperaturas ou

carregamentos lentos os ligantes fluem como um líquido viscoso. Além disso, nessa condição são considerados fluidos Newtonianos, por possuírem uma relação linear entre a tensão de cisalhamento entre as camadas do líquido durante o fluxo e a taxa de deformação cisalhante, sendo que a inclinação dessa reta é dada pela viscosidade do material. Ao contrário, em baixas temperaturas ou altas velocidades de carregamento, o asfalto se comporta como um sólido elástico, podendo inclusive tornar-se frágil.

O comportamento de tensão-deformação de um material pode ser facilmente descrito e observado em um ensaio de *creep* (fluência) (ANDERSON et al., 1994). Um material puramente elástico deforma imediatamente quando ocorre a aplicação do carregamento de fluência, mantendo constante seu valor de deformação, e retorna à condição inicial instantaneamente quando a carga é retirada. Ao contrário, um material viscoso deforma-se a uma taxa constante a partir da aplicação da carga, e continua nessa taxa até o carregamento ser removido.

Entre esses dois comportamentos encontram-se os ligantes asfálticos, com parcelas elásticas e viscosas de comportamento, daí ditos materiais viscoelásticos. Ao ser aplicado um carregamento de *creep*, uma parcela da deformação ocorre imediatamente e outra cresce com magnitude dependente do tempo. Além disso, a parcela dependente do tempo pode incluir uma parcela puramente viscosa e outra elástica com um retardo associado. Na retirada do carregamento, a parcela elástica com retardo recupera seu estado inicial lentamente. O comportamento de um material viscoelástico sob carregamento de *creep* pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Comportamento de um material viscoelástico sob carregamento de *creep*



Fonte: Navarro (2017).

### 2.1.2 Ensaios e índices para avaliação de ligantes asfálticos

O amadurecimento do século XX e a popularização do automóvel, bem como as mudanças climáticas marcantes tornaram evidentes a necessidade de ligantes e misturas asfálticas de melhor desempenho. Diante disso, a caracterização adequada dos materiais é aliada nesse processo, especialmente dos ligantes asfálticos, uma vez que as misturas herdam seu comportamento (POSSEBON, 2018).

A análise de ligantes asfálticos baseia-se em critérios de consistência, pureza e segurança. No entanto, foram e estão sendo desenvolvidas novas especificações com base na durabilidade e desempenho em campo desses materiais. Os ensaios mais comuns realizados pela indústria da pavimentação visam principalmente o controle de qualidade, permitindo que os fabricantes atinjam as propriedades necessárias antes de enviar o material ao consumidor.

As especificações atuais baseiam-se em ensaios empíricos que obtêm algum parâmetro de consistência em apenas uma temperatura especificada. Portanto, são realizados ensaios com baixa correlação com o desempenho em campo, mas ainda assim utilizados como limites para classificação de ligantes nas especificações. Os ensaios principais são: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, pureza, ponto de fulgor, ensaio de espuma e ductilidade. As respectivas normas e limites serão trazidos em seção posterior.

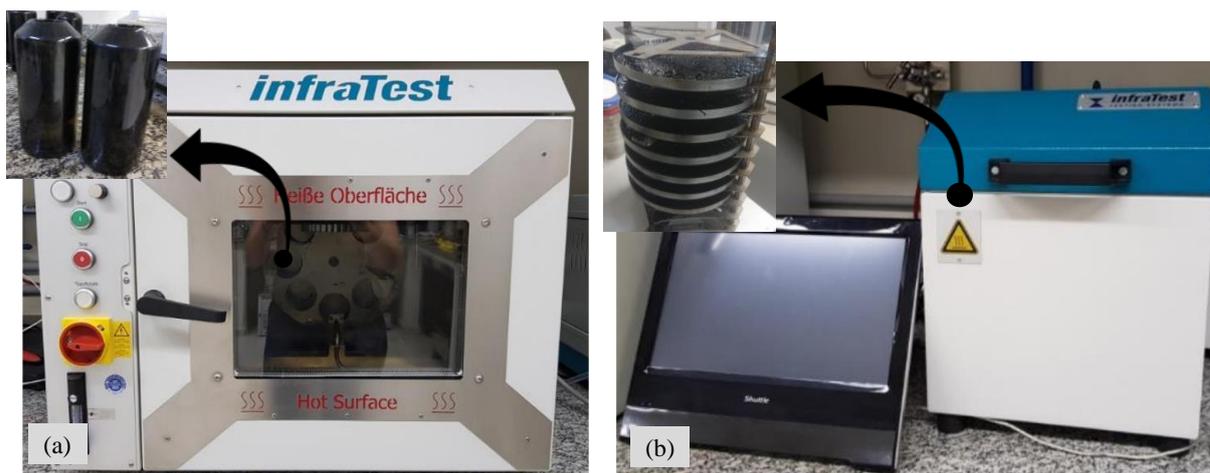
Atualmente os ensaios buscam caracterizar os ligantes asfálticos nas diferentes condições a que estarão expostos. Assim, são executados para representar fases distintas, ou seja, (i) transporte, estocagem e manuseio (condição virgem); (ii) mistura e construção (envelhecimento de curto prazo); e (iii) depois de longo período no pavimento (envelhecimento de longo prazo) (BERNUCCI et al., 2022). Os ligantes asfálticos, ainda, são ajustados para atender necessidades de solubilidade (pureza do material), viscoelasticidade (caracterização da rigidez) e durabilidade (danificação), daí o desenvolvimento de ensaios que captem esse comportamento em uma ampla faixa de temperaturas e frequências.

A oxidação dos ligantes asfálticos provoca um endurecimento do CAP e mudança de suas propriedades como ponto de amolecimento e penetração, além de propriedades reológicas e de danificação (FARROKHZADE; SABOURI; TABATABAEE, 2022; YANG et al., 2022b). A primeira oxidação ocorre com algumas características particulares: a película fina de ligante sobre os agregados, contato constante com o ar (oxigênio) e exposição a altas temperaturas. A Estufa de Película Delgada Rotacional (*Rolling Thin Film Oven Test* –

RTFOT) simula esse envelhecimento de curto prazo que ocorre durante a usinagem, transporte e compactação da mistura asfáltica (ABNT NBR 15235:2009; AASHTO T 240:2022) (Figura 2 a).

Já o envelhecimento de longo prazo que ocorre ao longo da vida de serviço de um pavimento é simulado utilizando o Vaso de Envelhecimento sob Pressão (*Pressure Aging Vessel* - PAV) (Figura 2b). A temperatura de envelhecimento é selecionada de acordo com o tipo de CAP, e as amostras são submetidas previamente ao envelhecimento de curto prazo em RTFOT (AASHTO R 28-22; ASTM D6521-22). No entanto, é necessário destacar que o PAV não é tão severo quanto o envelhecimento de campo (JING et al., 2019).

Figura 2 - Envelhecimento de (a) curto prazo (RTFOT) e (b) longo prazo (PAV)



Fonte: Autora.

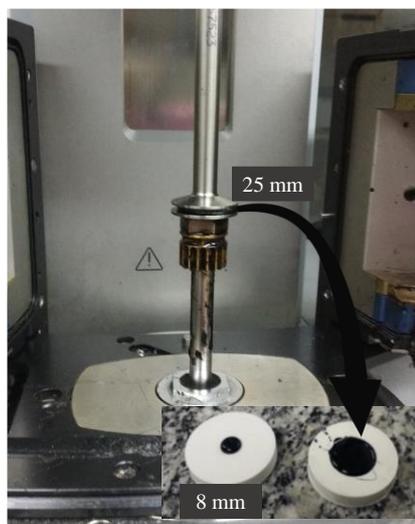
A reologia de ligantes asfálticos é um tema atualmente consolidado na comunidade científica, uma vez que o desempenho do CAP sob diferentes condições depende da sua condição de fluxo (AREGA; BHASIN, 2012). Nesse sentido, a medida da viscosidade é comumente avaliada. Um exemplo de equipamento que mede viscosidade absoluta (taxa de cisalhamento conhecida) é o viscosímetro rotacional (ABNT NBR 15184-21; AASHTO T 316-22; ASTM D4402/D4402M-15 (2022)), o qual calcula a viscosidade pelo torque de um *spindle* imerso no CAP.

A norma AASHTO T 315-22 dispõe sobre a obtenção das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos usando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), determinando

características de rigidez, ou seja, a resistência do CAP à sofrer deformação sob carregamento. Utilizando o DSR é possível obter o módulo dinâmico de cisalhamento ( $|G^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\phi$ ) do material, quando submetido a tensões oscilatórias entre duas placas paralelas, e em dois tamanhos de amostra a depender da faixa de rigidez do ligante no ensaio (Figura 3). O ângulo de fase representa a defasagem entre a aplicação da tensão e a resposta de deformação.

Além do DSR, cabe mencionar que o *Annular Shear Rheometer* (ASR) é um dispositivo atualmente utilizado em estudos de ligantes e masticues por propiciar ensaios homogêneos, realizando ensaios em amostras cilíndricas ocas. Além disso, é robusto e permite ensaios em temperaturas negativas ou níveis extremos de deformação com maior facilidade que o DSR (OLARD; DI BENEDETTO, 2003; DELAPORTE, 2006).

Figura 3 - Amostras do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico



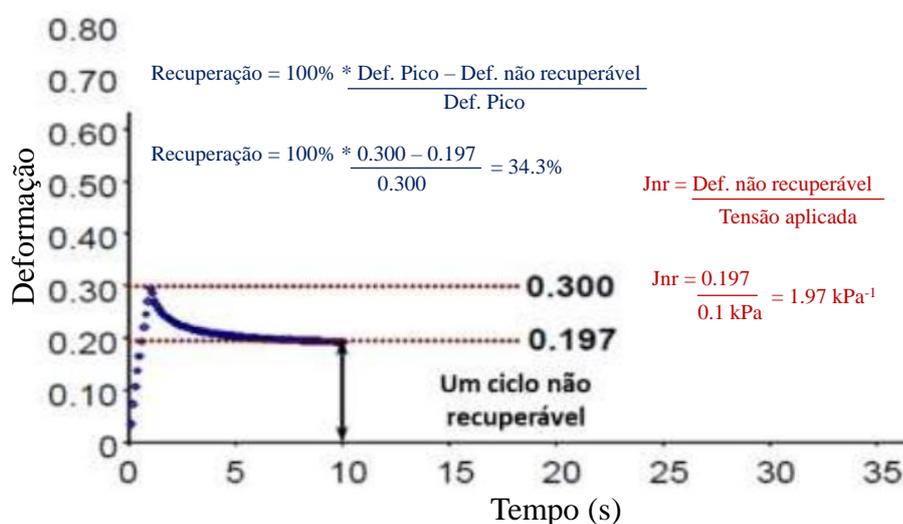
Fonte: Autora.

Embora a avaliação de propriedades reológicas dos ligantes asfálticos auxiliem na previsão do desempenho, a caracterização na falha é mais assertiva. Desse modo, podem-se citar três modos de falha principais: deformação permanente, fissuração por fadiga e trincamento térmico, embora no Brasil o trincamento térmico seja um fenômeno mais raro.

Atualmente o ensaio mais comum para avaliar a deformação permanente em ligantes, no domínio da danificação, é o *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), normatizado pela

AASHTO T 350-19 e ASTM D7405-20. O ensaio submete amostras a ciclos de carregamento e repouso em temperaturas mais elevadas. A partir desse método de teste, calcula-se o  $J_{nr}$ , indicativo da suscetibilidade à deformação permanente, e o percentual de recuperação (%R), indicativo da resposta elástica do material e sua dependência do nível de tensão. O cálculo desses parâmetros pode ser melhor observado pela Figura 4.

Figura 4 - Método de cálculo dos parâmetros  $J_{nr}$  e %R



Fonte: Adaptado de DNIT 423/2020 - ME.

Como será visto em seção posterior, relações simples de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase são limitadas com o objetivo de contribuir para o desempenho da mistura asfáltica final, iniciando já na escala de seleção do ligante asfáltico (como é o caso dos parâmetros  $|G^*|/\text{sen}\phi$  e  $|G^*|/\text{sen}\phi$ ). O atual parâmetro de fadiga da especificação Superpave  $|G^*|/\text{sen}\phi$  apresenta algumas limitações conceituais que abrem espaço para novos estudos na identificação de um índice mais representativo. O ensaio realizado no DSR que possibilita a obtenção do  $|G^*|/\text{sen}\phi$  é realizado no domínio das pequenas deformações (comportamento viscoelástico linear), ao passo que a fadiga é um fenômeno de danificação que ocorre fora desse domínio. Além disso, nem toda a energia de deformação dissipada é usada para provocar as fissuras, pois uma parte é devida justamente ao efeito da viscoelasticidade (ZEIADA et al., 2022).

Ainda, o envelhecimento dos ligantes asfálticos sinaliza a passagem para um comportamento mais frágil. A fissuração, no entanto, depende não só da fragilidade do CAP, como da magnitude do tráfego, da deformabilidade das camadas e da eficiência da drenagem, por exemplo. Daí o fenômeno da fadiga ser de complexo entendimento.

Pesquisadores do tema reconhecem que o fenômeno de fadiga tem início na escala ligante, e se propaga a partir desse, daí a importância de estudar a fadiga no asfalto (BAHIA et al., 2001). Bahia et al. (1999) observaram que a rigidez de ligantes com o mesmo PG não possuía as mesmas correlações com misturas executadas de maneira idêntica, e que as deformações nos ligantes em uma mistura asfáltica poderiam atingir valores relativamente elevados. Nesse sentido, os autores salientam a necessidade de avaliar a dependência da deformação e o efeito da não linearidade.

Assim, esse estudo propôs a adoção do ensaio de varredura de tempo (*time sweep test*), com cisalhamento senoidal oscilatório que se repete até a falha. Assim, é possível definir a vida de fadiga do material baseando-se em algum critério de falha, seja ele fenomenológico, baseado em energia dissipada ou baseado em uma relação de rigidez (LIU; LUO, 2020). Ainda não há um consenso acerca da definição da falha, e pesquisadores buscam critérios que independam do modo de carregamento. Em geral, é possível obter uma lei de fadiga, que descreve o crescimento do dano por fadiga com o aumento da tensão ou deformação.

Johnson e Bahia (2010) desenvolveram o ensaio de varredura linear de amplitudes (*linear amplitude sweep test* – LAS), utilizando a mecânica do dano contínuo na análise dos resultados, sendo que o ensaio foi sendo aprimorado ao longo do tempo. Segundo a norma AASHTO T 391 (2020), inicialmente é realizado um ensaio de varredura de frequências (*frequency sweep*), sem dano, para obter as propriedades reológicas. Em seguida, deve ser realizada a varredura de amplitudes (*amplitude sweep*) para avaliar o dano. Todas as etapas são realizadas no DSR, sendo o ensaio amplamente estudado no Brasil atualmente. As amostras, para garantir a representatividade do campo, devem ser envelhecidas antes do ensaio. Detalhes da metodologia de análise utilizando o S-VECD para ligantes asfálticos podem ser encontrados em Underwood, Kim e Guddati (2010), Underwood (2011) e Safaei et al. (2014). A norma brasileira para o ensaio é a DNIT 439/2022 - ME (2022).

A etapa final da análise consiste no estabelecimento de uma definição de falha e de um critério de ruptura. O primeiro determina a vida de fadiga nos ensaios, e o segundo correlaciona as respostas do material com as solicitações de entrada (ALMEIDA JR., 2022).

A AASHTO T 391 (2020) estabelece como critério de falha a redução de 35% do parâmetro  $|G^*|\sin\phi$ , como proposto por Johnson e Bahia (2010). Ainda podem ser estudados e utilizados outros critérios para efeito de comparação, como pico da tensão (BAHIA et al., 2013), pico do C vs. N (SAFAEI et al., 2014), pico do ângulo de fase (WANG et al., 2015a) e máxima energia de pseudodeformação acumulada, máxPSE (WANG et al., 2015a).

A proposta de Wang et al. (2015) foi a utilização do critério de ruptura baseado no  $G^R$  (taxa média da energia de pseudodeformação liberada) para analisar o LAS e o *time sweep test*. Os autores encontraram uma relação única entre  $N_f$  e  $G^R$ , que independe do histórico de carregamento, indicando que o LAS pode ser usado como na avaliação do desempenho à fadiga. No entanto, uma vez que não há consenso sobre qual o melhor critério de falha a ser utilizado para os ligantes asfálticos, o LAS ainda não foi incluso no sistema de classificação Superpave (seção 2.1.3.2).

Diversos estudos indicam que o LAS consegue fornecer boas correlações com o comportamento em campo (HINTZ, 2012; NASCIMENTO, 2015). Além disso, o Fator de Fadiga do Ligante ( $FFL_{19^\circ C}$ ) proposto por Martins (2014) tem sido utilizado no ranqueamento dos materiais quanto à fadiga. O  $FFL_{19^\circ C}$  é representado pela área abaixo da curva de fadiga (obtida pela teoria do VECD) entre as deformações de 1,25% e 2,5%. Quanto maior esse valor, maior a resistência à fadiga do material. A proposta é baseada nas considerações de Underwood (2011), o qual comenta que deformações aproximadamente de 200 microstrains a 400 microstrains são comuns nos pavimentos, e que o CAP sofre uma deformação próxima de 122,5 vezes maior que a sofrida pela mistura asfáltica integral. Possebon (2021) classificou os ligantes asfálticos da sua pesquisa utilizando os limites para  $FFL_{19^\circ C}$  da Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de ligantes pelo  $FFL_{19^\circ C}$

Classes	$FFL_{19^\circ C}$
1 - Pobre	$FFL < 1,22$
2 - Inferior	$1,22 < FFL < 1,31$
3 - Mediano	$1,31 < FFL < 1,48$
4 - Superior	$1,48 < FFL < 1,57$
5 - Excelente	$FFL > 1,57$

Fonte: Adaptado de Possebon (2021).

Outra maneira que permite a comparação de diferentes materiais quanto à fadiga é o uso de índices. Alguns fenômenos como o envelhecimento do ligante asfáltico podem reduzir a capacidade de relaxar tensões, fazendo com que possam ficar mais suscetíveis ao

trincamento. Dessa forma, a análise do ângulo de fase em faixas intermediárias de rigidez pode dar um indicativo desse comportamento, tendo em vista que, quanto menor seu valor, menor a capacidade de dissipação dessas tensões. Por exemplo, podem ser observados os indicadores  $\phi_{25^{\circ}\text{C};1\text{ Hz}}$  e  $\phi_{15^{\circ}\text{C};1\text{ Hz}}$ . As temperaturas de 25 e 15°C em geral destacam maiores variações no ângulo de fase com o envelhecimento. Já a frequência é representativa da região sul do Brasil, tendo em vista que a frequência reduzida média de ocorrência em campo para esse clima gira em torno de 1 Hz (VESTENA et al., 2021).

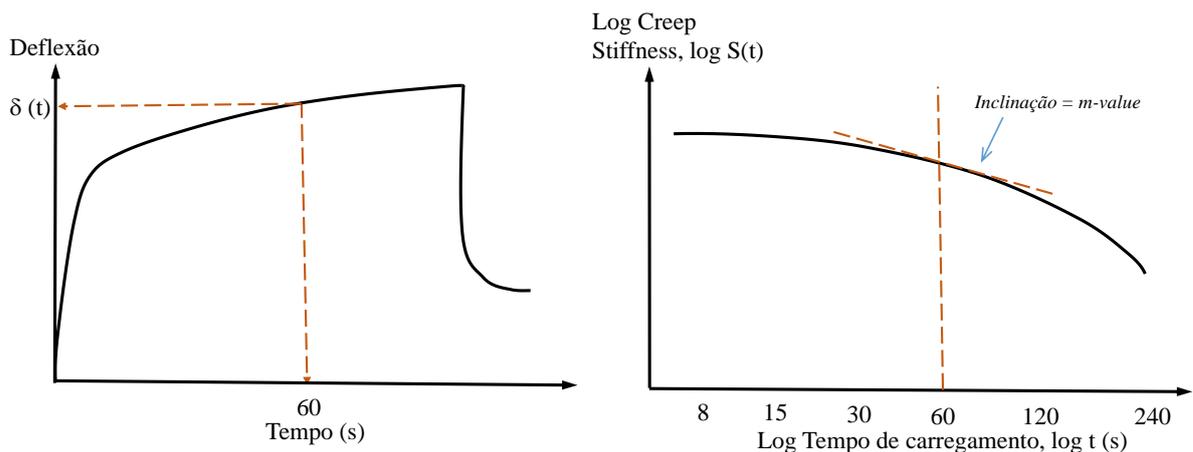
Outro parâmetro reológico que possui boa correlação com a resistência à fadiga é o *R-value*, juntamente com a frequência angular de cruzamento (*crossover frequency* –  $\omega_c$ ), calculados originalmente a partir do modelo reológico de Christensen-Anderson (CA). O *R-value* é diferença entre os módulos vítreo ( $G_g$ ), e de *crossover* ( $G_c$ ) que corresponde ao  $\omega_c$ , ou seja, onde o ângulo de fase é igual a 45° (CHRISTENSEN; ANDERSON; ROWE, 2017). Com o enrijecimento, a curva mestra atinge o platô vítreo e cresce rapidamente. Assim, o *R-value* aumenta e o  $\omega_c$  diminui, sugerindo que o comportamento elástico é mais ativo que o viscoso em uma faixa mais ampla de temperaturas. Assim, é desejável um menor valor de *R-value*.

A preocupação com o comportamento de ligantes em temperaturas muito baixas é necessária principalmente em países de clima frio (nos quais os pavimentos atingem temperaturas negativas), nos quais podem ocorrer trincas de origem térmica. O método de teste de rigidez à fluência (*creep stiffness*) é usado para determinar o nível de fragilidade dos ligantes já envelhecidos. Nesse caso, o *Bending Beam Rheometer* (BBR) é utilizado para realizar a avaliação (AASHTO T 313, 2019). O ensaio é realizado em amostras em forma de viga de ligantes asfálticos envelhecidos pelo PAV. O ensaio possui configuração de viga de três pontos. A rigidez à fluência (*creep stiffness*) -  $S(t)$  - e a inclinação da rigidez de fluência versus tempo (ambos em escala log) -  $m(t)$  - são utilizadas simultaneamente para estimar as propriedades de baixa temperatura dos ligantes asfálticos. Materiais muito rígidos a baixas temperaturas podem trincar quando carregados, mas os materiais asfálticos, por serem viscoelásticos, conseguem relaxar as tensões caso haja tempo suficiente (ZEIADA et al., 2022). Assim, o grau de baixa temperatura é determinado pela rigidez à fluência em 60 s,  $S(60)$ , e pelo valor  $m$  (*m-value*) em 60 s,  $m(60)$ , conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Apesar desses avanços, os pesquisadores buscam sempre métodos de rápida execução e que consumam pouca quantidade de material. Nesse sentido, o uso do DSR ainda possuía

algumas limitações na realização de ensaios em baixa temperatura, como torque insuficiente nas geometrias existentes, e a aproximação da rigidez do ligante à rigidez do sistema de carregamento, fazendo com que as deformações do equipamento fossem incluídas na medição. Assim, Sui et al. (2010) propuseram o uso da geometria de 4 mm no DSR, como forma de tornar o reômetro de cisalhamento dinâmico um aparato de teste universal. Diversos estudos mostraram o potencial promissor do uso dessa geometria (HAJJ et al., 2019; MICHAEL FARRAR et al., 2015; SUI et al., 2011). A partir do ensaio, é possível analisar correlações entre o módulo de relaxação  $G$  e a taxa de relaxação  $m$  do DSR com os valores do BBR.

Figura 5 - Determinação do PG de baixa temperatura pelo BBR



Fonte: Adaptado de Asphalt Institute (2003).

Outra forma de avaliar o comportamento ao trincamento térmico é por meio de índices que medem indiretamente a ductilidade. Tais índices também podem dar um indicativo da suscetibilidade do material ao trincamento por fadiga, tendo em vista que ambos os fenômenos estão ligados à capacidade de relaxar tensões.

O primeiro índice que pode ser utilizado é o parâmetro Glover-Rowe (G-R), inicialmente proposto nos estudos de Ruan, Davison e Glover (2003) e Glover et al. (2005), e posteriormente rearranjado por Rowe (2011). O parâmetro baseia-se nas propriedades viscoelásticas lineares dos ligantes, e pode ser calculado como  $|G^*|(\cos\phi)^2/\text{sen}\phi$  a  $15^\circ\text{C}$  e  $0,005$  rad/s. Rowe (2011) propôs limites de 180 kPa como sendo o início do dano (representa

uma ductilidade de 5 cm) e 600 kPa como o estágio de fissuração significativa (representa uma ductilidade de 3 cm). Ou seja, menores valores de G-R representam melhor desempenho.

King et al. (2012) propuseram o uso do G-R no Espaço Black, separando-o em zonas de acordo com os limites anteriormente propostos. As 3 zonas são: zona sem trincamento em bloco, zona de dano, e zona de trincamento em bloco. Quanto mais envelhecido está o ligante, mais para cima e para a esquerda ele se encontrará. O parâmetro é usado na África do Sul e possivelmente entrará nas especificações americanas, por ser um bom indicador de envelhecimento e atualmente é usado como avaliador do potencial de rejuvenescedores (ZEIADA et al., 2022).

Outra medida indireta de ductilidade pode ser obtida com o  $\Delta T_c$  (delta Tc), proposto por Anderson et al. (2011), para avaliar o potencial de trincamento com o envelhecimento do CAP. O  $\Delta T_c$  é a diferença entre duas temperaturas críticas do BBR: uma obtida a partir da rigidez e outra obtida a partir do *m-value* (taxa de fluência). O sinal dessa diferença indica se o PG de baixa temperatura é controlado pela rigidez ou pelo *m-value*, e a magnitude indica o grau em que o ligante é governado por um desses valores. O limite para o “aviso de fissuração” é de  $-2,5^\circ\text{C}$  e o limite de fissuração é de  $-5^\circ\text{C}$ . Alguns asfaltos modificados por polímero podem exceder esses limites sem sofrer trincamento térmico, pelas suas propriedades elastoméricas.

Por fim, o ensaio de tração direta (*direct tension test* – DTT) permite avaliar se o CAP é capaz de deformar sem a baixas temperaturas, mesmo que possuam uma rigidez estática nessas temperaturas maior do que a desejada. O ensaio utiliza amostras envelhecidas após RTFOT e PAV e é realizado nas temperaturas de  $-36^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ . Por meio do DTT é possível obter a tensão de ruptura, a partir do estiramento de uma amostra com formato de gravatinha-borboleta. A norma AASHTO T 314 (2022) regulamenta o ensaio.

### **2.1.3 Sistemas de classificação de ligantes asfálticos**

A suscetibilidade à temperatura confere aos ligantes asfálticos um comportamento termoplástico, ou seja, o material amolece reversivelmente quando aquecido. Assim, esse comportamento dita as temperaturas de mistura e compactação, sendo que em altas temperaturas o CAP precisa estar fluido o suficiente para cobrir o agregado, e em temperaturas de serviço deve ser viscoso o suficiente para segurá-lo (SPEIGHT, 2015). Os

sistemas clássicos de classificação realizam, em suma, o controle da variação da consistência com a temperatura.

Cabe ressaltar que esses sistemas não preconizam a caracterização em um espectro de temperaturas e/ou frequências. Portanto, como a passagem do estado sólido para o líquido é gradativo e não possui uma temperatura específica, os sistemas que utilizam ensaios empíricos fixam uma temperatura que faça sentido para analisar a condição desejada (por exemplo, temperaturas mais elevadas para inferir sobre deformação permanente).

Além dos sistemas clássicos de classificação, o estudo de novos métodos de teste e parâmetros de avaliação que possuam relação com o desempenho em campo levou ao desenvolvimento de especificações mais rigorosas e assertivas, como será abordado em seção posterior. Três sistemas de classificação utilizados atualmente: por penetração (ASTM D946/D946M-20, DNIT 155/2010 - ME), por viscosidade (ASTM D3381/D3381M-18) e o sistema *Performance Grade* (PG) do Superpave (ASTM D6373-21A; AASHTO M 320/2022).

#### 2.1.3.1 Sistemas clássicos de classificação

O sistema por penetração (ASTM D946/D946M-20) é uma classificação puramente empírica, tendo em vista que agrupa os ligantes em uma faixa de “dureza” dada pela penetração de uma agulha padronizada, segundo a norma DNIT 155/2010 - ME. O sistema por penetração possui vantagens como (MCGENNIS; SHULER; BAHIA, 1994; ROBERTS et al., 1996): mede a propriedade a 25°C, próximo da temperatura de serviço; baixo custo de equipamento; curto tempo de execução. Como desvantagens, pode-se citar: não mede a consistência dos ligantes em unidades fundamentais como ocorre na viscosidade; a taxa de cisalhamento é alta durante o ensaio; o comportamento não Newtoniano nessa temperatura influencia os resultados porque a taxa de cisalhamento varia durante o ensaio; não representa o comportamento em altas e baixas temperaturas; não fornece temperaturas ideais para mistura e compactação.

A viscosidade do ligante se relaciona com o grau em que o CAP penetra no agregado, e dita a seleção dos equipamentos necessários à construção da rodovia (SPEIGHT, 2015). Esse sistema é utilizado na classificação de asfalto borracha no Brasil utilizando o

viscosímetro rotacional Brookfield, e nos Estados Unidos é utilizada para classificar ligantes pelo o viscosímetro capilar a vácuo (ASTM D3381/D3381M-18).

Ao contrário da penetração, a viscosidade é um parâmetro fundamental de engenharia. Possui vantagens como (MCGENNIS; SHULER; BAHIA, 1994; ROBERTS et al., 1996): independe do sistema de ensaio e tamanho da amostra, por ser uma propriedade fundamental; é realizada em mais temperaturas; pode determinar a suscetibilidade térmica dos asfaltos já que é realizada em 3 temperaturas. Como desvantagens, pode-se citar: não capta o comportamento em baixas temperaturas; possui custo mais elevado que o penetrômetro; ligantes com a mesma classificação podem apresentar comportamentos diferentes em campo, visto que a viscosidade varia com o envelhecimento de curto prazo.

Assim, as principais limitações dos dois sistemas de classificação é que usam ensaios empíricos sem relação com desempenho em campo, necessitando de experiências anteriores documentadas que permitam a sua interpretação (ZEIADA et al., 2022). Além disso, não consideram o envelhecimento de longo prazo, que exerce influência nas propriedades de trincamento térmico e por fadiga. Por fim, não consideram características de campo, como volume e velocidade de tráfego, temperatura do local e estrutura do pavimento empregada.

As especificações de material são coleções de propriedades desejadas, variando com condições climáticas e ambientais. Mundialmente, os principais grupos formuladores de especificações são a *American Society for Testing and Materials (ASTM International)*, a *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, juntamente com a *Federal Highway Administration*, ambas nos Estados Unidos, e a Comunidade Econômica Europeia. No Brasil as especificações são baseadas nas diretrizes internacionais, especialmente americanas, com algumas adaptações às condições do país.

Como abordado anteriormente, os ligantes asfálticos são materiais viscoelásticos e termossensíveis. Assim, os ensaios requeridos nas especificações que medem suas propriedades físicas ou reológicas possuem temperatura especificada, sendo que alguns ainda definem o tempo e a velocidade de carregamento. No Brasil, os ligantes asfálticos são classificados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Os CAPs convencionais são divididos em CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200 (seguindo valores de penetração segundo a norma DNIT 155/2010 - ME. A Tabela 2 apresenta parte da especificação para os CAPs 30/45 e 50/70.

A Tabela 3 mostra a especificação brasileira para o CAP modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt). O TLA é um asfalto natural que pode ser encontrado no *Pitch Lake* de Trinidad e Tobago, possuindo elevada viscosidade e densidade. Nesse sentido, são utilizados na fabricação do CAP TLA, unindo o asfalto natural a um ligante comercial.

A Tabela 4 traz a especificação brasileira para asfalto modificado por borracha de pneus por via úmida. O inchamento e interação física da borracha com a matriz asfáltica tem capacidade de alterar as características do CAP. Também visando a modificação do ligante, a Tabela 5 mostra a especificação para asfalto modificado por polímero elastomérico, dos tipos 55/75 e 60/85.

Tabela 2 - Especificação brasileira para CAP 30/45 e CAP 50/70

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	52	46	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C, mín a 150°C, mín a 177°C	s	192 90 40 - 150	141 50 30 - 150	NBR 14950	E 102	ME 004/94
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm, mín a 150°C, SP 21, mín. a 177°C, SP 21	cP	374 203 76 - 285	274 112 57 - 285	NBR 15184	D 4402	-
Índice de susceptibilidade térmica	-	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín	cm	60	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85min				-	D 2872	-
Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,5	-	-	-
Ductilidade a 25°C, mín	Cm	10	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	NBR 6560	D 36	-
Penetração retida, mín	%	60	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT 095/2006 - ME.

Tabela 3 - Especificação brasileira para CAP TLA

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	CAP-TLA 40/55		Método de Ensaio	
		Limite da Especificação	ABNT	DNIT-ME	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	40 - 55	-	DNIT 155/2010	-
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	50	-	DNIT 131/2010	-
Ponto de fulgor mín	°C	232	11341:2008	-	-
Viscosidade Brookfield, mín. a 135°C, spindle 21, 20 rpm	cP	400	15184:2004	-	-
a 150°C, spindle 21, 50 rpm		215			
a 175°C, spindle 21, 100 rpm		80			
Solubilidade em tricloroetileno	%	75 - 90	14855:2002	-	-
Teor de Cinzas	%	7,5 - 19	9842:2009	-	-
Ductilidade a 25°C, 5cm/min., mín	cm	100	-	DNIT- 163/1998	-
Presença de TLA	-	Presença	-	-	D6608- 12
Efeito do calor e do ar - RTFOT, 163 °C, 85 minutos					
Varição de massa, máx	% massa	1,0	15235:2009	-	-
Porcentagem da Penetração Original, mín.	%	55	-	DNIT- 155/2010	-
Ductilidade a 25°C, 5cm/min., mín.	cm	50	-	DNIT- 163/1998	-

Fonte: Adaptado de DNIT 168/2013-EM.

Tabela 4 - Especificação brasileira para asfalto borracha

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	Asfalto Borracha		Método de ensaio
		Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30-70	30-70	DNIT ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	57	DNIT ME-247/94
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	2200-4000	NBR 15529
Ponto de Fulgor, mín	°C	235	235	DNIT ME 148/94
Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10 cm, min	%	50	55	NBR 15086:2006
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	9	DNIT ME-384/99
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C:				
Varição em massa, máx	%	1	1	NBR 15235:2006
Varição do Ponto de Amolecimento, máx	°C	10	10	DNIT ME-247/94
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	55	DNIT ME 003/99
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C 10cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Fonte: Adaptado de DNIT 111/2009 - EM.

Tabela 5 - Especificação brasileira para asfalto polímero

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	55/75-E	60/85-E	Método de Ensaio	
		Limites da Especificação		ABNT	DNIT - ME
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	45-70	40-70	-	155/2010
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	60	-	131/2010
Ponto de Fulgor, mín	°C	235	235	11341	-
Viscosidade Brookfield, máx.					-
a 135°C, spindle 21, 20 rpm	cP	3000	3000	15184	-
a 150°C, spindle 21, 50 rpm		2000	2000		-
a 175°C, spindle 21, 100 rpm		1000	1000		-
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	5	15166	-
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín	%	75	85	-	130/2010
Efeito do calor e do ar - RTFOT, 163 °C, 85 minutos					
Varição de massa, máx.	% massa	1,0	1,0	15235	-
Varição do PA, máx.	°C	- 5 a +7	- 5 a +7	-	131/2010
Percentagem de Penetração Original, mín.	%	60	60	-	155/2010
Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.	%	80	80	-	130/2010

Fonte: Adaptado de DNIT 129/2011 - EM.

### 2.1.3.2 Sistema de classificação Superpave

Tendo em vista o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos, os desenvolvimentos com relação a especificações por desempenho pautam-se na caracterização desse material em diferentes temperaturas e condições de serviço. Dessa forma, busca-se obter o comportamento dos ligantes asfálticos nas diferentes circunstâncias a que estarão expostos uma vez implantados na rodovia, garantindo durabilidade e desempenho (SPEIGHT, 2015). O desenvolvimento desse tipo de especificação baseia-se, portanto, na identificação de parâmetros e ensaios que se relacionam com o comportamento em campo.

A metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) foi desenvolvida nos EUA como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) na década de 1990, como forma de atender essas novas necessidades. A metodologia de classificação Superpave marca, portanto, a transição para métodos de teste mais avançados, tendo em vista as novas necessidades do tráfego e do clima. Além disso, trouxe mais severidade na caracterização e escolha dos ligantes asfálticos, e busca medir as propriedades fundamentais do material.

O Superpave prevê a realização de ensaios reológicos em diferentes condições de envelhecimento, como forma de caracterizar as diversas etapas de utilização do ligante. Uma diferença importante para os sistemas de classificação clássicos (por penetração e por

viscosidade) é que naqueles a temperatura dos testes era fixada, enquanto os valores especificados para cada material eram variados. No sistema PG Superpave, o valor da propriedade a ser atingida é o mesmo, mas a temperatura em que é alcançada varia entre os materiais (ZEIADA et al., 2022). Por exemplo, um ligante com PG 70-22 consegue atingir as mesmas propriedades que um ligante com PG 64-16, mas em uma faixa maior de temperaturas.

A metodologia especifica que os ligantes são classificados de acordo com seu PG (*Performance Grade*), sendo constituído por duas temperaturas (sistema é baseado no clima) (ASTM D6373/21; AASHTO M 320-22). A primeira visa o enfrentamento da deformação permanente, e representa a temperatura média máxima dos 7 dias mais quentes do ano, variando de 46°C a 82°C em classes de 6°C. A segunda representa a mínima temperatura do pavimento, e busca garantir o desempenho ao trincamento térmico, variando de -46°C a -10°C. Ou seja, um ligante com PG 76-22 deve atender aos critérios de desempenho em uma faixa de temperaturas de -22°C a 76°C. O nível de confiança normalmente utilizado é de 98%.

A temperatura do local da rodovia é calculada com base em séries históricas de temperatura do ar. As temperaturas no pavimento são então estimadas a partir de algoritmos inseridos em programas computacionais, ou diretamente pelas equações que deles derivam. As equações mais utilizadas são a do modelo SHRP (ASPHALT INSTITUTE, 2003) e a do modelo LTPP (*long-term pavement performance*), por exemplo na versão 2.1 (LTPPBind versão 2.1, 1999). No Brasil, já existem mapas de PG para todas as regiões (LEITE; TONIAL, 1994; CUNHA; ZEGARRA; FERNANDES JR., 2007; FACCIN et al., 2021).

A especificação estabelece indicadores para avaliar o desempenho à deformação permanente, fissuração por fadiga e trincamento térmico. Além disso, abrange questões de segurança e trabalhabilidade para dar suporte à escolha de um ligante (ZEIADA et al., 2022). A segurança é avaliada pelo ponto de fulgor (ASTM D92-18; AASHTO T 48/2022), o qual não pode ser inferior a 230°C. A adequação da trabalhabilidade é obtida pela especificação da viscosidade rotacional (AASHTO T 316/2022; ASTM D4402/D4402M-15, 2022), sendo desejável um valor inferior a 3 Pa.s a 135°C para evitar a necessidade de aquecimento excessivo. Além disso, faixas de viscosidade especificadas ditam a temperatura de mistura e compactação ( $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s, respectivamente).

Para inferência sobre deformação permanente, é realizado o ensaio de PG no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) em altas temperaturas. Assim, o parâmetro  $|G^*|/\sin\phi$  pode

ser usado para comparar os materiais, sendo que maiores valores são desejados (mínimo 1,0 kPa para a condição virgem e 2,2 kPa para a condição após RTFOT). A temperatura encontrada que atinge esses valores é a temperatura superior do PG.

Para avaliação da resistência ao trincamento por fadiga, O DSR é utilizado nas temperaturas intermediárias, pois é nelas que o pavimento tende a trincar em campo. A temperatura é calculada utilizando os PGs de alta e baixa temperatura. Além disso, é exigida a realização do ensaio após o PAV, visto que a fadiga tem mais tendência de ocorrer após mais anos de vida de serviço. Nesse caso, é utilizado o parâmetro  $|G^*| \sin \phi$  como indicador da resistência ao trincamento (ZEIADA et al., 2022).

A metodologia assume que toda a energia de deformação é dissipada para resistir à fadiga, fazendo com que menores valores de  $|G^*| \sin \phi$  sejam desejados. Por isso, o parâmetro é limitado a um máximo de 5000 kPa para a condição após PAV para evitar o trincamento por fadiga. Recentemente o Asphalt Institute sugere que, nos casos em que o material supera 5000 kPa (até o limite de 6000 kPa), pode ainda ser utilizado caso possua pelo menos  $42^\circ$  de ângulo de fase na temperatura intermediária do PG. Isso minimiza sua contribuição na fissuração em temperaturas intermediárias (KRIZ; REINKE; ANDERSON, 2019; ASTM D8239-21A).

Para evitar o trincamento térmico, as especificações limitam o  $S(60)$  a 300 MPa e o valor de  $m(60)$  a 0,3. Caso o  $S(60)$  resulte na faixa de 300 a 600 MPa, como ocorre para alguns ligantes modificados, é obrigatório realizar o ensaio de tração direta, no qual a deformação na falha não deve ser inferior a 1%.

É pertinente destacar que ligantes com o mesmo PG de alta temperatura podem possuir diferenças na deformação acumulada, indicando falha do parâmetro  $|G^*| \sin \phi$  (DELGADILLO; NAM; BAHIA, 2011). Nesse sentido, o recente avanço da metodologia foi a inserção do ensaio MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) para avaliação e classificação por desempenho em temperaturas mais elevadas (ASTM D8239-21A; AASHTO M 332/2022). Para garantir facilidade e rapidez na execução do teste, foram adotados apenas dois níveis de tensão nas especificações. O ensaio é realizado na temperatura superior do PG. Nesse sentido, é possível afirmar que o parâmetro  $J_{nr}$  possui boa correlação com o comportamento das misturas asfálticas (D'ANGELO, 2009; DREESSEN; PLANCHE; GARDEL, 2009; ZHANG et al., 2015).

Assim, o parâmetro  $|G^*| \sin \phi$  passa a valer somente para a condição virgem e o  $J_{nr3.2}$  passa a substituir esse valor na condição RTFOT, e ainda é utilizado para classificar os

ligantes quanto ao tráfego (S, H, V, E), como pode ser observado na Tabela 6. As letras de classificação do tráfego devem ser obtidas a partir do MSCR executado na temperatura do PG da rodovia. Nesse sentido, cabe destacar que os parâmetros  $|G^*|/\sin\phi$  e  $Jnr_{3,2}$  possuem boa correlação para ligantes convencionais, mas a metodologia foi um avanço importante na caracterização de asfaltos modificados (GUNDLA et al., 2020).

Tabela 6 - Classificação de tráfego para ligantes asfálticos

Limites $Jnr$ ( $kPa^{-1}$ )	Classificação MSCR
$Jnr_{3,2} \leq 4,5$	S – <i>Standard</i> (tráfego padrão)
$Jnr_{3,2} \leq 2,0$	H – <i>Heavy</i> (tráfego pesado)
$Jnr_{3,2} \leq 1,0$	V – <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)
$Jnr_{3,2} \leq 0,5$	E – <i>Extreme</i> (tráfego extremamente pesado)

Fonte: Adaptado da norma AASHTO M 332 - 2022.

Atualmente, estão sendo desenvolvidos estudos com o objetivo de refinar o ensaio de MSCR. Diversos autores discutem limitações quanto ao número de ciclos do ensaio, a duração das etapas de fluência e repouso, e a respeito das tensões selecionadas (KATAWARE; SINGH, 2015; WHITE, 2016; GOLALIPOUR et al., 2017; GASPAR et al., 2021). Os autores afirmam que ligantes modificados não atingem uma condição estável após 10 ciclos. Além disso, 9 segundos não seriam suficientes para a recuperação total da parcela viscoelástica da deformação e os níveis de tensão não são representativos de campo. No entanto, esse ainda é um método de teste que representa um avanço frente às inferências realizadas anteriormente com base em parâmetros de rigidez, e permite entender o desempenho do ligante em domínios em que realmente haja a danificação do material.

Recentemente, diversos países estão migrando para a metodologia Superpave, ou utilizando-a para o desenvolvimento de seus próprios sistemas de avaliação de materiais e projeto de misturas asfálticas, como Tailândia, Líbano, Iraque, Egito, Canadá, Jordânia, Coreia do Norte, Nova Zelândia, Chile, China, entre outros (KHALIL; BAHIA, 2009; HAMED M. H. ALANI, 2010; SALEH; TRAD, 2011; CHAROENTHAM; KANITPONG, 2012; GHUZLAN; AL-KHATEEB, 2012; KRIZ et al., 2012; DELGADILLO et al., 2018; LEE et al., 2018; BEARSLEY; GROUP; BOSMA, 2019; ZHANG et al., 2020). A diversidade de estudos evidencia a superioridade da metodologia Superpave com relação aos demais sistemas de classificação.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O comportamento das misturas asfálticas é influenciado por uma série de fatores, mas a consideração de todos eles em laboratório é uma prática ainda inviável. Assim, a caracterização de misturas asfálticas exige um balanço entre rigor e praticidade, com a consideração das variáveis mais importantes (BERNUCCI et al., 2022). A abordagem mecanístico-empírica de dimensionamento de pavimentos requer que análise estrutural, ou seja, o levantamento de tensões, deformações e deslocamentos, seja comparada com critérios de dimensionamento definidos. Para isso, as propriedades dos materiais utilizados devem ser caracterizadas por meio de ensaios apropriados.

O projeto de uma mistura asfáltica busca obter um material que deforme imediatamente sem romper quando solicitado, e recupere-se elasticamente após a retirada do carregamento, de maneira a evitar deformações plásticas (BOEIRA, 2018). A compressão gerada na superfície do revestimento pelo tráfego, especialmente em altas temperaturas ou por cargas lentas, contribuem para a formação de afundamentos. Por outro lado, a ação de cargas repetidas ao longo da vida útil do pavimento provoca tração na base do revestimento, podendo ocasionar a fadiga do material. Nesse sentido, a caracterização das misturas asfálticas no domínio viscoelástico linear e no domínio da danificação é necessária para o enfrentamento desses defeitos.

Nesta seção, é apresentado inicialmente o comportamento das misturas asfálticas, que norteia a elaboração e seleção de ensaios de caracterização. Em seguida, as propriedades mecânicas são divididas em: caracterização da ruptura com carregamento monotônico, obtenção da rigidez e avaliação da resistência à deformação permanente e à fadiga. Os ensaios diferem entre si pela geometria da amostra (que dita a forma de aplicação do carregamento e medição das deformações), e pelas características do carregamento (monotônico ou cíclico, forma da função de carregamento, presença ou não de períodos de repouso, etc.).

### 2.2.1 Comportamento das misturas asfálticas

As misturas asfálticas são responsáveis por resistir diretamente às ações impostas pelo tráfego, distribuindo as tensões de forma atenuada para as camadas inferiores. Seu comportamento depende das propriedades individuais dos constituintes, bem como da

combinação entre eles. A viscoelasticidade das misturas asfálticas provém do ligante, sendo que seu comportamento segue o mesmo padrão descrito na seção de ligantes asfálticos. Assim, as misturas são materiais viscoelastoplásticos, mas no domínio das pequenas deformações podem ser consideradas viscoelásticas (PINTO, 1991; DANIEL; KIM, 2002). Assim, as propriedades de rigidez (módulo dinâmico) e ângulo de fase são obtidas no intervalo de viscoelasticidade linear, sendo que os limites desse domínio variam para cada mistura.

Os materiais asfálticos, portanto, combinam os comportamentos de materiais elásticos e viscosos, sendo capazes tanto de armazenar energia mecânica quanto de dissipá-la, ou seja, possuem características de elasticidade instantânea e de fluência (CHRISTENSEN, 1982). A Figura 6 apresenta os diferentes comportamentos possíveis a depender da temperatura e da amplitude de deformação.

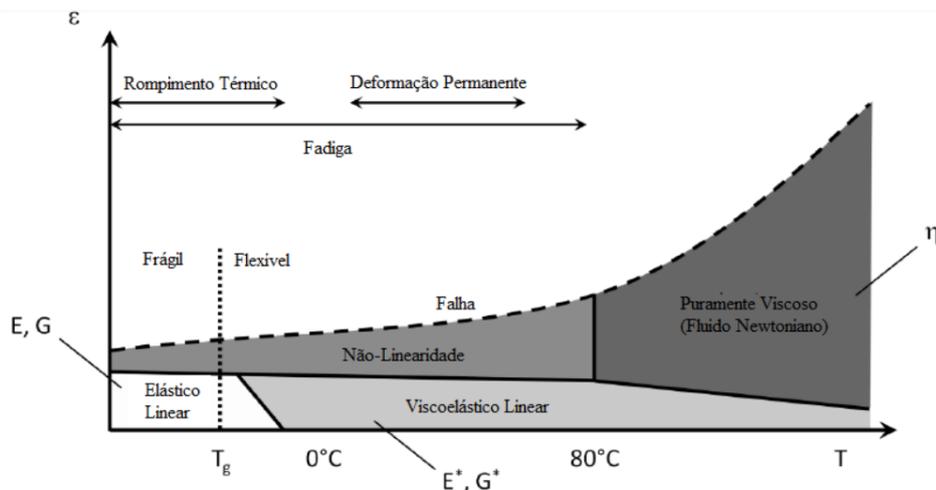
Em temperaturas muito baixas e deformações pequenas, os materiais asfálticos se comportam como sólidos elásticos lineares. No entanto, mesmo a baixas deformações, um número elevado de ciclos pode provocar a fadiga do material. Além disso, altas temperaturas e amplitudes de deformação conduzem o material ao domínio de ocorrência da deformação permanente. Os limites de transição são apenas ilustrativos. Di Benedetto et al. (2013) citam que a caracterização de rigidez e ângulo de fase, para estarem dentro do domínio viscoelástico linear, deve ser realizada com deformações abaixo de 100  $\mu\text{m/m}$ , para garantir que não há aplicação de dano.

Para abranger todos esses domínios de comportamento, os ensaios de caracterização de misturas asfálticas são desenvolvidos de maneira a simular diferentes condições de temperatura, bem como de magnitude, tempo e frequência de aplicação do carregamento. Ensaio mais simplificados são realizados em apenas uma frequência e uma temperatura, garantindo agilidade e simplicidade na execução. Por outro lado, como será descrito em seção posterior, não abrangem a totalidade do comportamento visualizado em campo.

Além disso, cabe ressaltar a complexidade de caracterização em laboratório dos fenômenos de degradação das misturas que ocorrem em campo. Nesse sentido, destacam-se a influência da radiação ultravioleta, da oxidação, dos ciclos de congelamento e descongelamento (incomuns no Brasil) e da penetração da umidade por deficiência de drenagem. Mesmo assim, os avanços nos ensaios de caracterização de misturas asfálticas já

buscam captar o máximo de variáveis que exercem influência nesse comportamento, de forma a diminuir a necessidade de maiores correções empíricas entre laboratório e campo.

Figura 6 - Domínios de comportamento para materiais asfálticos em função da temperatura e da amplitude de deformação



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014).

### 2.2.2 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Como comentado na seção anterior, o comportamento das misturas asfálticas é dependente de uma série de fatores. Assim, os ensaios de laboratório limitam-se a reproduzir as variáveis mais determinantes nesse comportamento, fazendo um balanço entre a precisão e a praticidade de execução.

Os métodos de dimensionamento empíricos fazem uso de ensaios relativamente simplificados, como é o caso do ensaio de estabilidade Marshall, ainda amplamente utilizado no Brasil no estado da prática. No entanto, ensaios simples como esse não são capazes de prever adequadamente o desempenho das misturas em campo.

Nesse sentido, as pesquisas na área da pavimentação caminham em direção a métodos de dimensionamento de pavimentos mecanísticos, sem a necessidade de calibração entre laboratório e campo. No Brasil, o novo método de dimensionamento de pavimentos, MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), já pode ser classificado como um método

mecanístico-empírico, utilizando previsões de comportamento frente ao dano por fadiga a partir das propriedades dos materiais e simulações da estrutura do pavimento.

Ainda, o software FlexPAVE™, desenvolvido pela *North Carolina State University* (NCSU) nos Estados Unidos, já é capaz de abranger o comportamento viscoelástico das misturas e carregamentos cíclicos, necessitando, assim, de ensaios mais robustos e que, aliado às funções de transferência de Nascimento (2015 e 2021), permite estimar a área trincada. Os ensaios mais comuns para caracterização de misturas asfálticas estão descritos a seguir.

#### 2.2.2.1 Caracterização da ruptura com carregamento monotônico

A definição da carga a ser utilizada no ensaio de Módulo de Resiliência e nos ensaios de fadiga parte da avaliação da resistência à tração estática. Além disso, essa medida é utilizada no ensaio de dano por umidade induzida (DUI). No Brasil, essa resistência normalmente é encontrada para a condição de compressão diametral da amostra, pela facilidade de execução. Nesse caso, o modo de falha é bem definido, daí também ser utilizado como um parâmetro de controle na dosagem das misturas, substituindo gradativamente o ensaio de estabilidade *Marshall* ainda defendido no meio técnico mais conservador.

Existem, ainda, outras configurações de geometrias e ensaios para avaliação da mecânica da fratura com carregamento monotônico, como: ensaio de flexão em viga com uma fenda (*single-edge notched beam* – SEB), ensaio de flexão em semicírculos com fenda (*semi-circular bending* – SCB) e ensaio de tração em disco com fenda (*disk-shaped compaction tension test* – DCT). Essas configurações não serão abordadas nesta revisão da literatura pois não estão presentes no banco de dados desta pesquisa.

##### 2.2.2.1.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral preconiza a solicitação de um cilindro com cargas de compressão ao longo de duas geratrizes opostas, de modo a gerar tensões de tração perpendiculares à aplicação da carga (Figura 7). O ensaio é realizado a  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s até a ruptura (AASHTO T 322/2007; ABNT NBR 15087/2012; ASTM D6931-17; DNIT 136/2018). A partir da carga máxima de ruptura, calcula-se a resistência à tração pela Equação 1.

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (1)$$

Onde:

RT = resistência à tração, na temperatura do ensaio, em MPa;

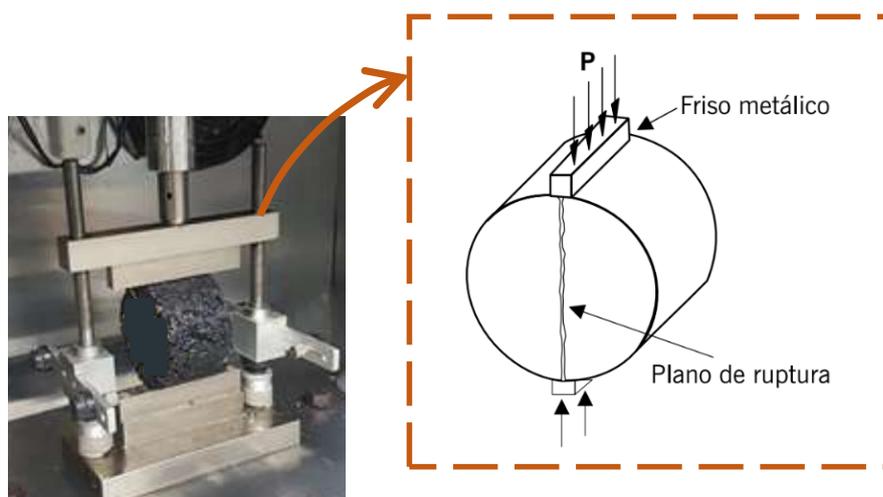
F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro de corpo de prova, em mm;

H = altura do corpo de prova, em mm.

A medida de RT pode ser obtida em corpos de prova moldados em laboratório pelo compactador Marshall ou mais recentemente pelo Compactador Giratório do Superpave (CGS) (DNIT 136/2018 - ME). Além disso, pode ser realizada em corpos de prova extraídos de campo. A RT já faz parte de algumas especificações. A norma DNIT 031/2006 - ES menciona valor mínimo de RT de 0,65 MPa para misturas asfálticas com ligantes convencionais. Além disso, alguns autores optam por avaliar as medidas de energia dissipada pelo cálculo do índice de resistência ao trincamento ( $CT_{index}$ ) do ensaio IDEAL-CT (ASTM D8225-19), uma vez que o ensaio utiliza o mesmo aparato e quase as mesmas diretrizes do ensaio de RT, embora as dimensões das amostras sejam ligeiramente diferentes. Esse é um índice que vem se mostrando promissor nas pesquisas internacionais.

Figura 7 - Configuração do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT)



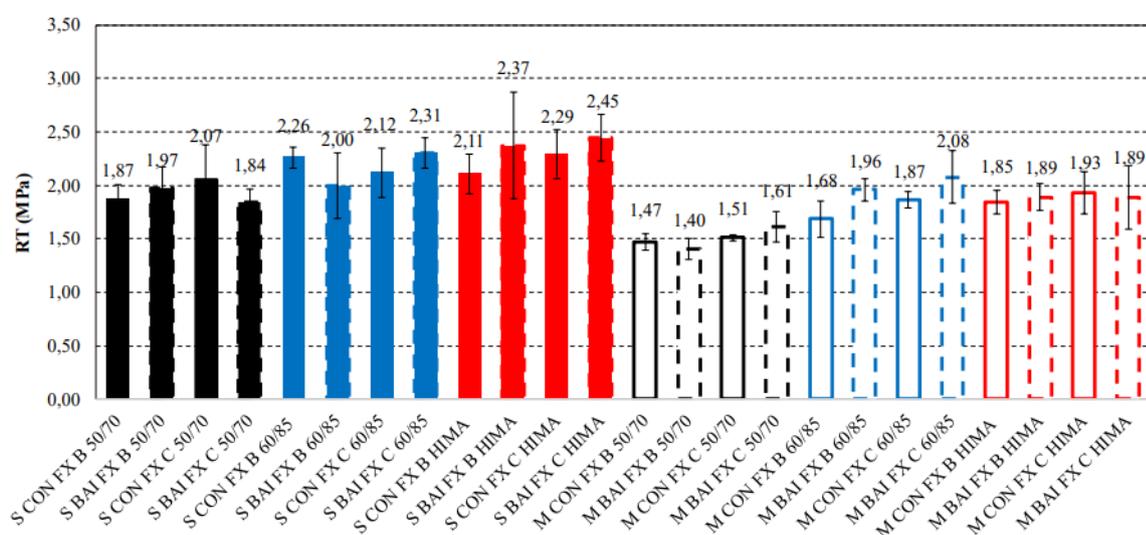
Fonte: DNIT 136/2018 - ME.

Almeida Jr. (2016), estudando o comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem, evidenciou que o tipo de ligante asfáltico é determinante na resistência à tração. Nesse sentido, para as amostras do módulo de resiliência, os ligantes modificados por polímero 60/85 mostraram resultados superiores, para ambos os métodos de dosagem e de composição granulométrica.

Boeira (2018) realizou a caracterização completa de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados, muitas delas sendo as mesmas de Almeida Jr. (2016). Em seu estudo, o autor confirma a influência do tipo de ligante e, especialmente, do método de dosagem, nos resultados de RT. Nesse sentido, ligantes modificados mostraram resultados superiores aos convencionais, bem como as misturas dosadas pelo Superpave tiveram maiores valores de RT (para as amostras do módulo complexo), conforme a Figura 8.

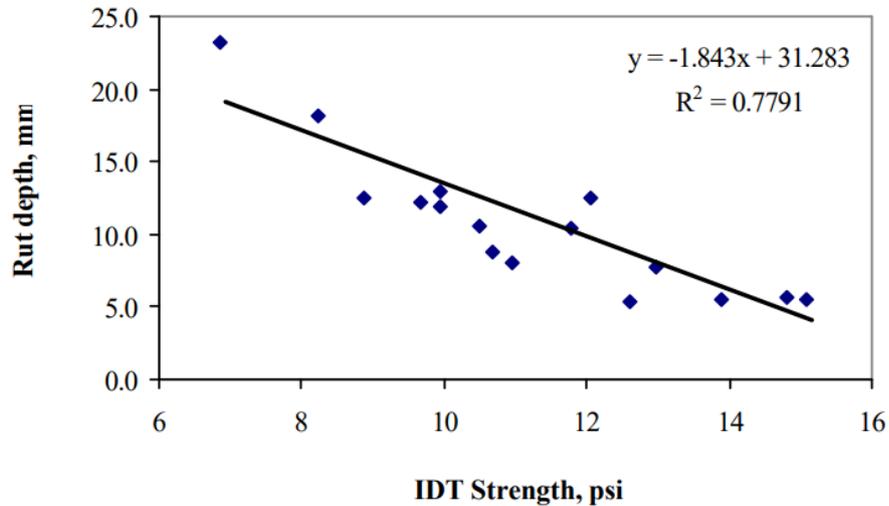
Srinivasan (2004) avaliou o uso da resistência à tração indireta para identificar o potencial de afundamento do CBUQ a partir do APA (*Asphalt Pavement Analyzer*). O autor conclui, por análise de regressão, que a resistência à tração indireta (*IDT Strength*) é um fator capaz de dar um indicativo do potencial de afundamento por deformação permanente, com um  $R^2$  de 0,7791 (Figura 9). No entanto, destaca que outras variáveis devem ser levadas em consideração na previsão mais precisa da deformação permanente, como teor e tipo de ligante.

Figura 8 - Resistência à tração (RT) de amostras de módulo complexo com diferentes dosagens, ligantes e granulometrias e métodos de composição granulométrica



Fonte: Boeira (2018).

Figura 9 - Relação entre RT e o potencial de afundamento pelo APA



Fonte: Srinivasan (2004).

#### 2.2.2.2 Caracterização da rigidez: domínio viscoelástico linear

O projeto de um pavimento visa compatibilizar o carregamento externo com a resistência de cada material em uma dada camada. Para isso, busca-se uma combinação de espessuras de camadas e materiais diversos, com propriedades distintas, que atendam às solicitações impostas. Os parâmetros de rigidez ditam a resposta estrutural e global da estrutura, gerando tensões, deformações e deslocamentos que definem qual será a vida útil do pavimento.

O módulo de elasticidade (ou módulo de Young) e o coeficiente de Poisson descrevem o comportamento de materiais elástico lineares, nos quais a rigidez não depende do estado de tensões (LOVE, 1944). Para carregamentos pequenos com relação à resistência e repetidos por ciclos suficientemente longos, as misturas asfálticas, apesar de viscoelásticas, podem ser consideradas elásticas lineares. Assim, a análise desse sistema de camadas pode ser realizada de maneira analítica ou numérica.

Dada a natureza viscoelástica das misturas asfálticas, que herdaram o comportamento do ligante, o valor de sua rigidez não é único, e depende de diversos fatores (KIM, 2009). Para uma mesma magnitude de carregamento, a mistura responde com maior rigidez para carregamentos dinâmicos e mais rápidos, e menor rigidez para carregamentos estáticos. Além

disso, maiores rigidezes são observadas quanto maior é a frequência de aplicação do carregamento, ou seja, menores tempos entre um pico de carga e outro.

A temperatura é outro fator determinante nesse comportamento, sendo a mistura mais rígida em temperaturas mais baixas. Diversos outros fatores podem influenciar no valor da rigidez, como as partículas do agregado, o tipo de CAP, a espessura da película de CAP sobre os agregados, os finos no mástique, o volume de vazios, o nível de envelhecimento, a reatividade com o oxigênio, e a presença de aditivos e modificadores.

Existem diferentes conceituações para a palavra “módulo”, tendo em vista que pode ser medido de diferentes formas. Neste trabalho serão abordadas as metodologias para obtenção do módulo de resiliência e do módulo complexo, amplamente utilizados atualmente no Brasil. O módulo de resiliência possui a mesma definição do módulo de Young da Teoria da Elasticidade (relação entre tensão e deformação no regime elástico), embora obtido sob carregamento repetido. O valor não fornece o espectro de comportamento viscoelástico como ocorre no ensaio de módulo complexo. As diferenças entre as duas metodologias estão resumidas na Tabela 7, sendo as especificidades de cada ensaio discutidas nas seções subsequentes.

Tabela 7 - Diferenças entre os ensaios de Módulo de Resiliência e Módulo Complexo

Variável	Módulo de Resiliência	Módulo Complexo
Forma de carregamento	Carregamento repetido (0,1 s de carga e 0,9 s de repouso)	Carregamento dinâmico (o tempo de aplicação e repouso dependente da frequência utilizada)
Configuração do ensaio	Compressão diametral gerando um estado de tensão biaxial de tensão	Carregamento de compressão axial senoidal
Temperatura	25°C	-10°C; 4°C; 21°C; 37°C; 54°C
Frequência	1 Hz	25 Hz; 20 Hz; 10 Hz; 5 Hz; 2 Hz; 1 Hz; 0,5 Hz; 0,2 Hz; 0,1 Hz e 0,01 Hz
Dimensões do corpo de prova	100 mm diâmetro e 63,5 mm altura	100 mm diâmetro e 150 mm altura

Fonte: Adaptado de Boeira (2018).

#### 2.2.2.2.1 Módulo de Resiliência

O termo resiliência significa “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (HVEEM, 1955). O ensaio de módulo de resiliência é realizado pela aplicação de cargas repetidas diametralmente sobre um corpo de prova cilíndrico.

O MR é a relação entre a tensão de tração verificada diametralmente na amostra e a deformação específica recuperável correspondente, a uma dada temperatura (Equação 2). A Figura 10 mostra o esquema do ensaio e as variáveis para o cálculo. O coeficiente de Poisson varia com a temperatura. Contudo, no Brasil é comum a adoção do valor de 0,3 para ensaios a 25°C.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{F}{t\Delta} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

F = carga vertical repetida aplicada no CP, N;

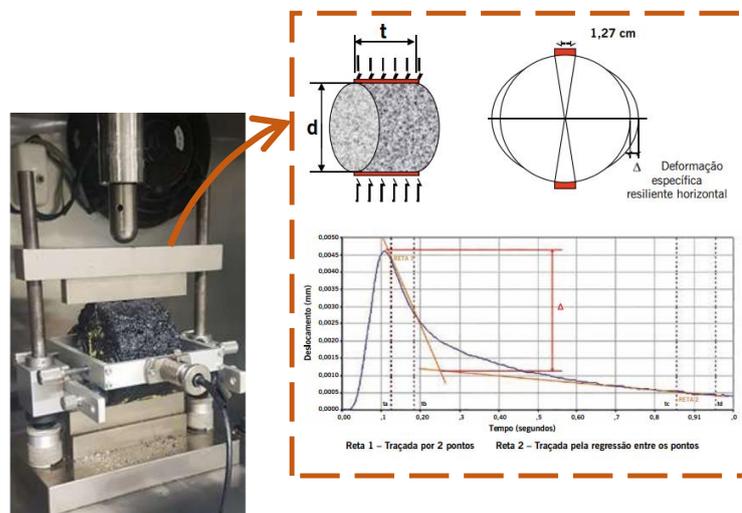
$\Delta$  = deslocamento resiliente registrado, mm;

t = altura do CP, mm;

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

Cabe aqui destacar que o módulo de resiliência não representa puramente o comportamento elástico do material, uma vez que a deformação viscoelástica desenvolvida no ensaio é parcialmente contabilizada no cálculo (BERNUCCI et al., 2022). Os valores podem variar com o tipo de mistura, granulometria, tipo de CAP, propriedades volumétricas, temperatura, entre outros fatores. As diferentes formas de compactação das metodologias Marshall e Superpave mudam a estrutura do esqueleto mineral, também influenciando no valor do MR (NASCIMENTO et al., 2006).

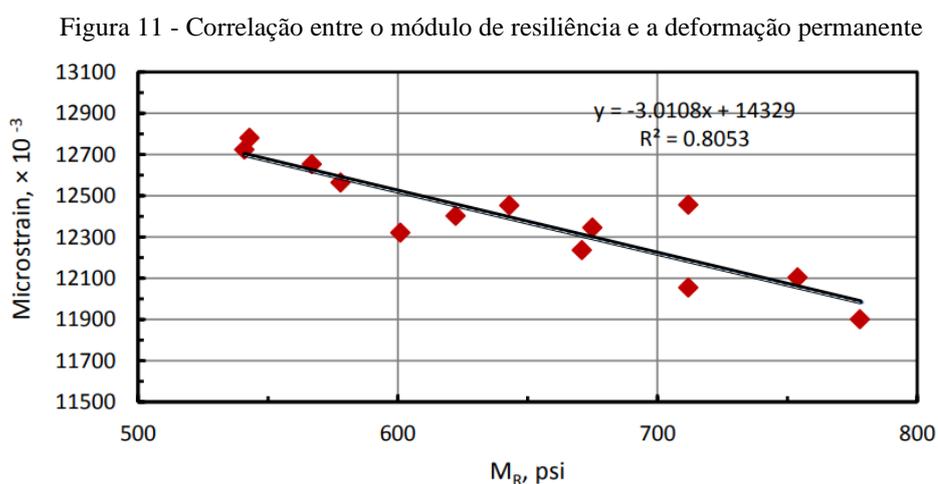
Figura 10 - Ensaio de MR e variáveis de cálculo



Fonte: Adaptado de Medina (1988).

As misturas asfálticas com AMP apresentam menores valores de MR quando comparados a misturas produzidas com ligante convencional. Isso ocorre porque a inserção do polímero aumenta a flexibilidade das misturas, produzindo menor módulo de resiliência e, como visualizado na seção anterior, maiores valores de resistência à tração (LEITE, 1999).

Hamdou, Ismael e Abed (2014), em um estudo conduzido com misturas asfálticas modificadas por diferentes tipos de polímeros, mostram a alta correlação entre o módulo de resiliência e a deformação permanente. Os autores demonstram que misturas com maiores valores de módulo de resiliência proporcionam menores valores de afundamento medido em ensaio cíclico, com períodos de carga e repouso (Figura 11).



Fonte: Hamdou, Ismael e Abed (2014)

Specht et al. (2017) aplicaram a teoria da viscoelasticidade para modelar o ensaio de MR em misturas asfálticas e investigaram o efeito de diferentes procedimentos experimentais na análise estrutural pelo AEMC (*Multilayer Elastic Analysis Software* – programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas). Para quatro misturas asfálticas, os autores realizaram o ensaio de módulo dinâmico, e os dados foram modelados pelo 2s2p1d. Utilizando o Princípio da Correspondência Elástico-Viscoelástico para simular a solução viscoelástica do ensaio de MR, em diferentes condições de temperatura e frequência, foram encontrados valores de rigidez em torno de 30% menores do que os valores medidos no ensaio de MR.

Na análise de pavimentos, a deformação horizontal (extensão/alongamento) na parte inferior da camada asfáltica e a deformação vertical (contração) na parte superior do subleito foram aproximadamente 23% e 13% menores na análise que utilizou os valores de MR medidos. Os autores ressaltam, nesse sentido, as limitações do procedimento de ensaio de MR e suas interpretações baseadas na elasticidade para explicar materiais que são, na verdade, viscoelásticos.

#### 2.2.2.2.2 *Módulo Complexo*

O pavimento asfáltico, ao longo de sua vida útil, está submetido a uma ampla faixa de temperaturas e frequências de carregamento. Portanto, a rigidez não é um valor único, como considerado pelo módulo de resiliência. Nesse sentido, o ensaio de módulo complexo fornece tanto o comportamento elástico quanto o viscoelástico dos materiais asfálticos (CHRISTENSEN, 1982).

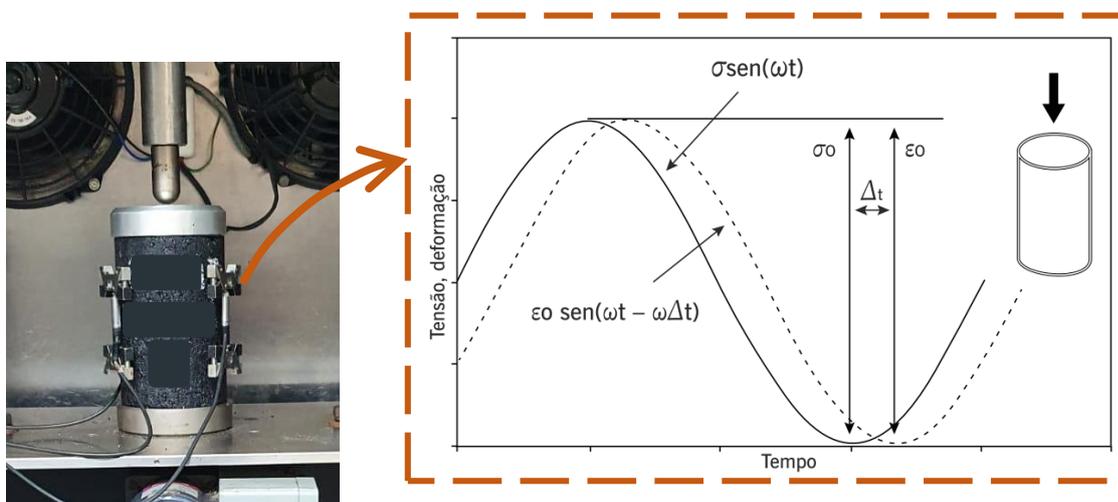
Analogamente ao módulo de elasticidade no regime elástico, o valor do módulo complexo ( $E^*$ ) define a relação entre a tensão e a deformação para um material viscoelástico linear submetido a uma carga senoidal. A primeira parcela do módulo complexo é denominada módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e representa seu valor absoluto (razão entre a amplitude de tensão e a amplitude de deformação), o que define a propriedade elástica de um material asfáltico. Por outro lado, a segunda parcela do módulo complexo é chamada de ângulo de fase ( $\varphi$ ), representando a defasagem entre a aplicação da tensão e a resposta de deformação. Assim, o ângulo de fase dá um indicativo acerca da viscoelasticidade linear do material.

Para obtenção dessas propriedades o ensaio segue as normativas AASHTO T 342 (2022) e DNIT 416 (2019), aplicando um carregamento de forma senoidal (*haversine*) e pequenas deformações (Figura 12). É realizada uma varredura de frequências e temperaturas para captação do comportamento em amplo espectro.

Partindo do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), é possível realizar a translação das isotermas geradas a partir do ensaio até uma isoterma de referência, gerando uma curva única. Essa curva é chamada de curva mestra, que descreve o comportamento do material em ampla faixa de frequências e temperaturas. Esse princípio se aplica a materiais termoreologicamente simples, e propõe uma equivalência nos comportamentos em altas temperaturas e baixas taxas de carregamento, com o material se

comportando como um líquido viscoso. Ao contrário, também se verifica uma correspondência nas baixas temperaturas e altas frequências, com o comportamento de um sólido elástico (FERRY, 1980). Para a translação das isothermas, são utilizados *shift factors*, que podem ser descritos pela Equação 3 de Williams, Landel e Ferry em uma temperatura de referência (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955)

Figura 12 - Esquema de aplicação de carga no ensaio de módulo complexo



Fonte: Adaptado de DNIT 416 (2019).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (3)$$

Onde:

C1 e C2 = constantes de regressão.

A análise, além das curvas mestras, pode ser realizada partindo das isothermas, isócronas, plano Cole-Cole (plotagem da componente viscosa imaginária do módulo dinâmico contra a componente elástica real) e espaço Black (módulo dinâmico vs. ângulo de fase). A mesma metodologia é aplicada na escala dos ligantes asfálticos, utilizando o DSR.

Para alguns ligantes modificados por polímero o PSTT não pode ser aplicado, uma vez que não é possível formar uma curva única no diagrama Black. No entanto, o princípio se aplica apenas para curvas mestras de módulo dinâmico de cisalhamento ( $|G^*|$ ), sendo

chamado, portanto, de Princípio da Superposição Tempo-Temperatura Parcial (PSTTP) (OLARD; DI BENEDETTO, 2003; DI BENEDETTO et al., 2004).

A modelagem e extrapolação dos dados experimentais para intervalos não captados pelo ensaio deve ser realizada com modelos adequados. Diversos modelos reológicos são utilizados para descrever o comportamento LVE dos materiais, para então ajustar curvas aos dados de módulo dinâmico e ângulo de fase. No entanto, o modelo 2s2p1d (2 *Springs*, 2 *Parabolic*, 1 *Dashpot*) é o que melhor representa a maioria das misturas betuminosas, por minimizar o erro entre a modelagem matemática e os dados experimentais (VESTENA et al., 2021). O modelo consiste em um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola, e esse conjunto em paralelo com uma segunda mola (OLARD; DI BENEDETTO, 2003).

Para ajustar o modelo aos dados é necessário ajustar manualmente 7 coeficientes. A Equação 4 descreve o cálculo do módulo complexo utilizando o 2s2p1d. A mesma metodologia é utilizada para modelagem do módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) para os ligantes asfálticos.

$$E^* = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (4)$$

Onde:

$G_{00}$  = módulo estático assintótico (quando  $\omega \rightarrow 0$ );

$G_0$  = módulo vítreo assintótico (quando  $\omega \rightarrow \infty$ );

$h$  = constante adimensional de um dos elementos parabólicos (relacionado à inclinação inicial da curva de módulo complexo no plano Cole–Cole);

$k$  = constante adimensional de um dos elementos parabólicos (relacionado à inclinação final da curva de módulo complexo no plano Cole–Cole);

$\delta$  = fator de forma adimensional;

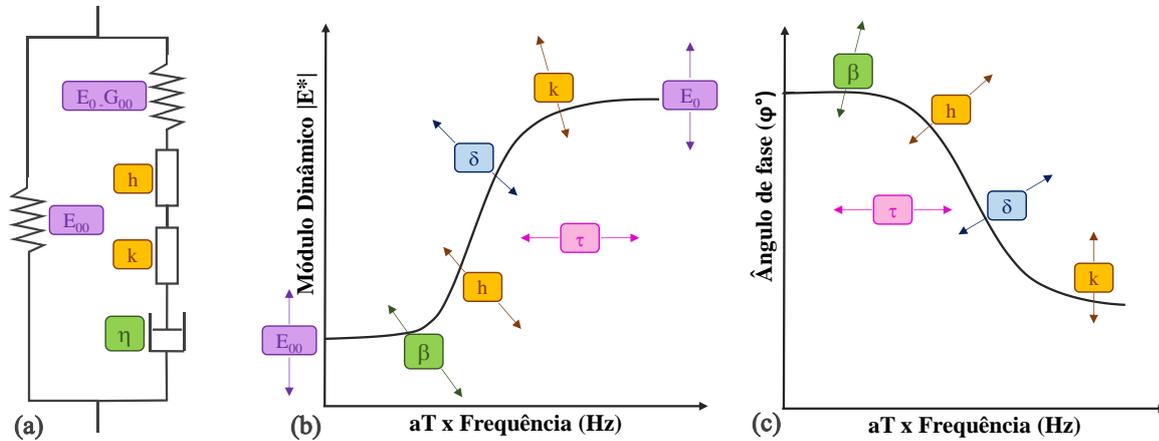
$\tau$  = tempo característico (único parâmetro dependente da temperatura);

$\beta$  = parâmetro adimensional relacionado à viscosidade  $\eta$  do amortecedor linear

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

Cada um dos sete parâmetros do modelo influencia em uma faixa de frequências/temperaturas. A Figura 13 mostra essa influência.

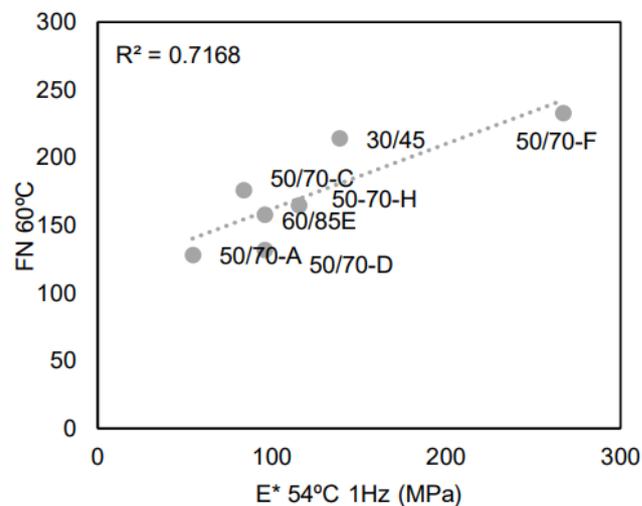
Figura 13 - (a) Análogo mecânico do modelo 2s2p1d e impacto dos parâmetros do modelo nas curvas mestras de (b) módulo dinâmico e (c) ângulo de fase.



Fonte: Autora.

Conforme descrito por Possebon (2021), para misturas com ligantes convencionais e modificadas por polímero, maiores valores de módulo dinâmico a  $54^\circ\text{C}$  indicam menor suscetibilidade à deformação permanente. A autora encontrou boa correlação entre os parâmetros, com  $R^2$  de 0,7168 (Figura 14). Nesse caso, a deformação permanente foi avaliada pelo parâmetro *Flow Number* (FN), que será descrito em seção posterior.

Figura 14 - Correlação entre  $\text{FN}_{60^\circ\text{C}}$  e  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  encontrada por Possebon (2021)



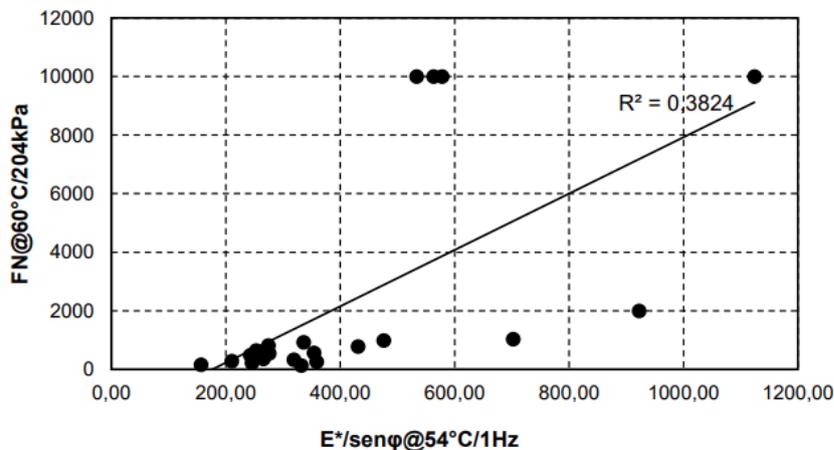
Fonte: Adaptado de Possebon (2021).

Quando se observa os valores de rigidez à 25°C para uma mesma frequência utilizando os ensaios de MR e módulo dinâmico, é possível perceber algumas discrepâncias entre os resultados, conforme avaliado por Faccin (2018). O autor, ao correlacionar os dois valores na frequência de 10 Hz, identifica essas diferenças, devido ao ensaio de módulo dinâmico considerar a parcela viscosa de comportamento e reproduzir estados de tensões diferentes, mais aproximados da realidade.

O mesmo autor ainda identifica que inferências quanto à danificação a partir de valores de viscoelasticidade devem ser realizados com cautela. Partindo do índice  $|E^*|/\text{sen}\phi$  54°C:1Hz, o autor identificou baixa correlação com o valor de *Flow Number* (Figura 15). De qualquer forma, é possível observar certa tendência de melhora no FN com o aumento de  $|E^*|/\text{sen}\phi$ .

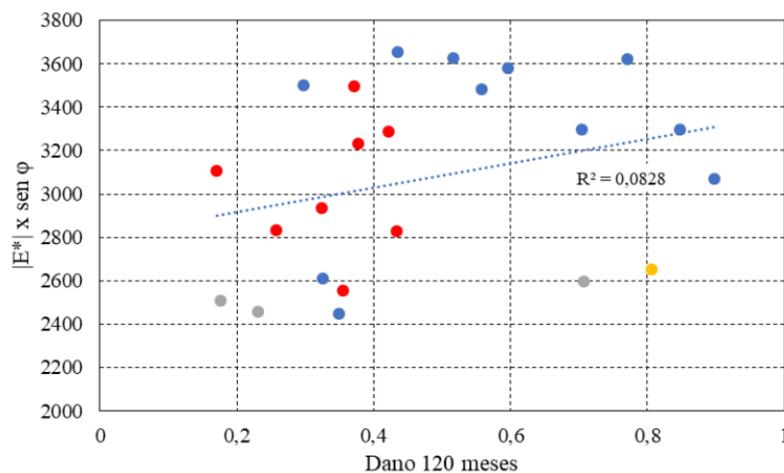
Da mesma maneira, Schuster (2018), avaliando as mesmas misturas de Faccin (2018), identifica que o parâmetro  $|E^*|/\text{sen}\phi$  a 21°C e 1 Hz não é capaz de inferir sobre o comportamento à fadiga. O autor encontrou baixa correlação com o dano acumulado por fadiga em 120 meses, calculado pela mecânica do dano contínuo simplificada no software LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses*) (Figura 16). Possebon (2018) também encontrou relações inconclusivas do parâmetro  $|E^*|/\text{sen}\phi$  com o desempenho à fadiga por meio das curvas geradas na simulação com o critério de falha  $G^R$ .

Figura 15 - Correlação entre  $\text{FN}_{60^\circ\text{C}/204\text{kPa}}$  e  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  encontrada por Faccin (2018)



Fonte: Faccin (2018).

Figura 16 - Correlação entre  $|E^*|/\text{sen}\phi_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e o dano acumulado por fadiga em 120 meses de Schuster (2018)



Fonte: Schuster (2018).

### 2.2.2.3 Caracterização da resistência à deformação permanente

A deformação permanente em pavimentos asfálticos ocorre quando há o acúmulo progressivo de pequenas parcelas de deformações plásticas, provocando uma distorção da superfície (YODER; WITCZAK, 1975). A deformação pode ser por consolidação do material ou por afundamento plástico (com levantamento de material nas laterais) (DNIT 005/2003 - TER). A Figura 17 ilustra esses fenômenos. Além disso, a deformação permanente pode ocorrer apenas no revestimento asfáltico, ou também nas camadas inferiores como consequência da densificação adicional pelo tráfego ou ruptura por cisalhamento.

Para evitar esse defeito nas camadas granulares e de solos, é necessário que se faça uma adequada seleção de materiais e correta compactação, além de compatibilizar as tensões recebidas com os níveis admissíveis. Nas misturas asfálticas, fatores como arranjo dos agregados, tipo de ligante asfáltico e volumetria das misturas, são fundamentais na definição do comportamento à deformação permanente (FACCIN, 2018). Além desses fatores, cabe destacar que o enfrentamento da deformação permanente possui grande correlação com a correta dosagem da mistura asfáltica.

Nascimento (2008) comenta que agregados maiores, mais cúbicos e com granulometria contínua melhoram o comportamento frente à deformação permanente, por auxiliarem no intertravamento do esqueleto mineral. Além disso, o excesso de ligante na

mistura pode acarretar em fluência, e a utilização de ligantes mais duros ou modificados contribuem no enfrentamento desse processo.

Figura 17 - Afundamentos por consolidação (trilha da esquerda) e plástico (trilha da direita)



Fonte: Adaptado de Silva (2008).

A deformação permanente diminui o conforto e a segurança ao rolamento aos usuários, uma vez que provoca o acúmulo de água e aumenta o risco de acidentes. A instabilidade da mistura é agravada sob tráfego lento e canalizado, e temperaturas muito elevadas. Atualmente, as mudanças climáticas e o aumento progressivo do tráfego (maiores volumes, cargas e pressão de inflação dos pneus) exigem soluções mais assertivas.

O uso de ligantes asfálticos modificados é um exemplo disso. Diversos estudos evidenciam a significativa influência do ligante asfáltico na deformação permanente, com ligantes modificados mostrando comportamento superior (ALMEIDA JR, 2016; CORTÉ et al., 1994; MOURA, 2010; NASCIMENTO, 2008; SPECHT, 2004).

A caracterização das misturas asfálticas quanto à deformação permanente pode ser realizada de diversas maneiras. A primeira é por meio de ensaios fundamentais (ensaio de *creep* estático ou ensaio uniaxial de carga repetida – *creep* dinâmico). O ensaio de *creep* estático foi utilizado no Brasil no início do desenvolvimento de estudos a respeito desse assunto, ensaiando CPs Marshall. No entanto, a metodologia e configuração das amostras não representam bem a condição de campo. Por esse motivo, este trabalho abordará apenas o ensaio que utiliza *creep* dinâmico (*Flow Number*), por ser mais promissor e amplamente estudado no país.

A segunda forma de caracterizar a deformação permanente é utilizando simuladores de tráfego que buscam se aproximar ainda mais da realidade de campo. Nesse caso, a passagem repetida das rodas permite obter a vida útil dos pavimentos de forma acelerada, embora não reproduza fatores climáticos. Os simuladores de tráfego podem ser de pequeno, médio e grande porte. Dois exemplos de simuladores são o do tipo APA (*Asphalt Pavement Analyzer*), que surgiu em 1985, no Departamento de Transportes da Geórgia (EUA), e o do LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), desenvolvido entre 1968 e 1970 na França. Neste trabalho será abordado com mais detalhes o simulador Hamburgo, de crescente internacional.

#### 2.2.2.3.1 Ensaio de creep dinâmico: *Flow Number*

Para medir as características da mistura asfáltica frente à deformação permanente, é realizado o ensaio uniaxial de carga repetida, no qual é possível monitorar a deformação das amostras em função dos ciclos decorrentes do ensaio. Para simular o fenômeno, esse ensaio é realizado em temperatura mais elevada, com ciclos de carregamento e repouso.

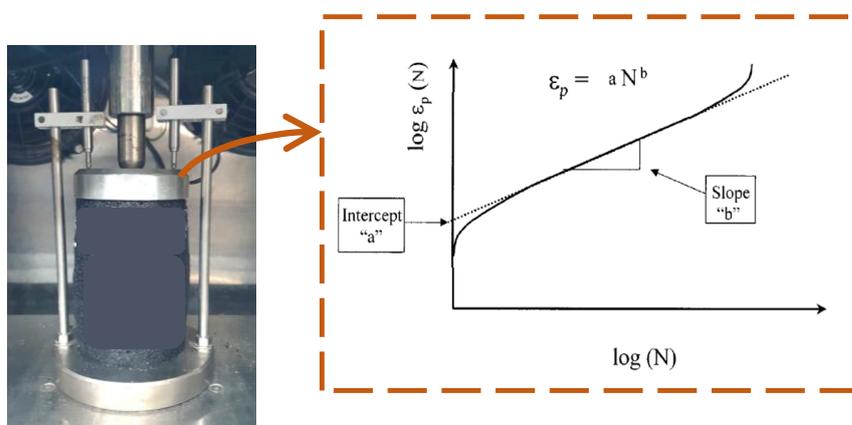
A Figura 18 ilustra o desenvolvimento da deformação permanente acumulada ( $\epsilon_p$ ) ao longo dos ciclos do ensaio. No decorrer dos ciclos, é possível observar uma região primária (inicial), caracterizada pela alta taxa de acúmulo das deformações permanentes na amostra. Também é possível perceber uma região secundária, na qual esse acúmulo de deformação ocorre de maneira linear. Por fim, em uma região terciária do gráfico ocorre a ruptura da amostra, com uma rápida inflexão da curva e crescimento acelerado de  $\epsilon_p$ . A passagem da zona secundária para a terciária caracteriza o parâmetro *Flow Number* (FN).

O intercepto “a” da Figura 18 representa a deformação plástica na região inicial do ensaio, e a inclinação “b” da reta da região secundária representa a taxa de variação da deformação plástica. Maiores valores de “a” indicam menor rigidez da mistura e maior suscetibilidade à densificação, e altos valores de “b” indicam que a mistura se deforma muito rapidamente, com efeito negativo na resistência à deformação permanente (ONOFRE, 2012).

Na literatura é possível encontrar diversas recomendações do parâmetro FN de acordo com o nível de tráfego. A Tabela 8 exemplifica esses limites. Nesse sentido, observa-se que os critérios estabelecidos por Nascimento (2008) eram os mais conservadores até então. No entanto, um estudo mais recente conduzido por Faccin (2018) no Rio Grande do Sul indica

que os limites de Bastos, Soares e Nascimento (2017) para tráfegos médios e pesados podem não tender os limites de ATR de órgãos rodoviários, especialmente as misturas com CAP 50/70.

Figura 18 - Deformação permanente acumulada ao longo do ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do Flow Number



Fonte: Adaptado de Witczak et al. (2002).

O mesmo autor comenta que os limites de Nascimento (2008) são mais coerentes nesse cenário, e ainda propõe um limite mínimo de FN mais exigente para tráfego extremamente pesado, uma vez que o RS é um estado predominantemente agrícola e a fiscalização das cargas máximas nas rodovias não é efetiva. O autor propôs limites considerando um ATR crítico de 7 mm para tráfegos leves e médios, e de 5 mm para tráfegos pesados e extremamente pesado. Por fim, não indica a utilização de tais limites para misturas mornas e com asfalto borracha.

Diversos estudos ainda propõem a avaliação de propriedades das misturas que são influentes no valor de FN, de modo a permitir a construção de modelos de previsão de desempenho. Destaca-se inicialmente o estudo de Almeida Jr. et al. (2018), os quais avaliaram 24 misturas contendo o mesmo agregado, mas três ligantes asfálticos (50/70, AMP 60/85 e *Highly Modified Asphalt - HiMA*), além de quatro granulometrias (duas Faixa B e duas Faixa C) e dois métodos de dosagem (Marshall e Superpave). Os autores concluíram que os fatores

mais influentes foram o tipo e o teor de ligante asfáltico, pelas altas correlações encontradas entre os parâmetros reológicos e o teor de ligante com o FN das misturas.

Tabela 8 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego encontrados na literatura

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N USACE)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
				$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	-	300	750	-
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
AASHTO T 378 (2022)	$7 \pm 0,5$	-	600	-	50	190	740
Bastos, Soares e Nascimento (2017)	5,5 a 7,5	60,0	204	-	100	300	>1000
Faccin (2018)	6,4 a 7,5	60,0	204	-	300	600	>2000

Fonte: Adaptado de Bastos, Ferreira e Soares (2016).

Bastos (2016) verificou a correlação entre dados do ensaio de MSCR em ligantes com valores de FN das misturas. A autora encontrou fraca correlação entre os parâmetros do MSCR  $J_{nr,3.2}$  e  $R_{3.2}$  e o FN, com um  $R^2$  inferior à 0,3. No entanto, o parâmetro  $J_{nr,diff}$  do MSCR melhor correlacionou-se com o FN das misturas ( $R^2 > 0,8$ ). A autora destaca o uso do MSCR como uma forma de selecionar os ligantes asfálticos, mas que a influência dos agregados deve ser levada em consideração. Assim, o modelo preditivo para deformação permanente proposto no estudo que levou em consideração a proporção AG e a forma 2D, proporcionou um  $R^2$  de 0,82.

Apeagye (2014) também propõe um modelo preditivo de avaliação do FN com base em dados de 13 misturas asfálticas. O autor encontrou um  $R^2$  de 0,94, sendo os parâmetros mais influentes:  $|G|*/\sin\phi$ , teor de ligante efetivo, vazios de ar e relação de pó/ligante efetivo.

Cabe aqui destacar que o novo método de dimensionamento brasileiro, o MeDiNa, não utiliza os dados de *Flow Number* no dimensionamento. No entanto, o software assume que a mistura atende os limites de FN para o tráfego da rodovia, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Limites e classes de desempenho das misturas quanto à deformação permanente do MeDiNa

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
1	$FN \geq 100$ ciclos	$N < 1e6$	Não recomendado
2	$100 \text{ ciclos} \leq FN < 300$ ciclos	$1e6 \leq N < 1e7$	$N < 1e6$
3	$300 \text{ ciclos} \leq FN < 750$ ciclos	$1e7 \leq N < 1e8$	$1e6 \leq N < 1e7$
4	$750 \text{ ciclos} \leq FN < 2000$ ciclos	$N \geq 1e8$	$1e7 \leq N < 1e8$
5	$FN \geq 2000$ ciclos	-	$N_{ser} \geq 1e8$

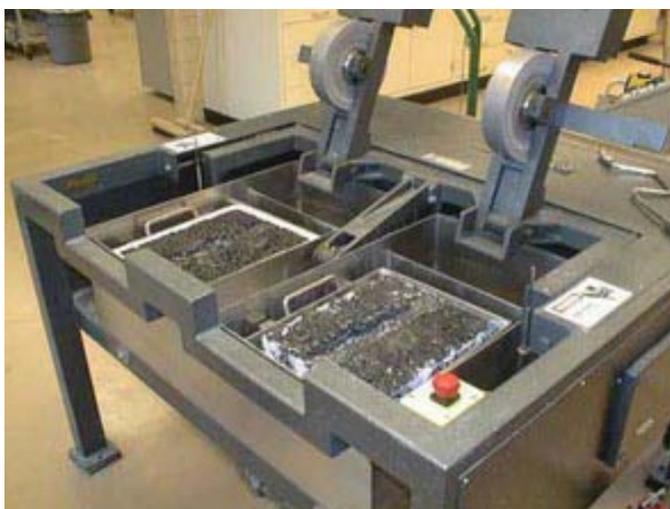
Fonte: Nascimento (2014).

### 2.2.2.3.2 Ensaio de Hamburgo

O simulador de tráfego Hamburgo (*Hamburg Wheel Tracking Device* – HWTD) foi desenvolvido na Alemanha, com o objetivo de simular o afundamento em trilha de roda e avaliar, ainda, a suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas (Figura 19). A norma AASHTO T 324:2022 regulamenta o ensaio.

As amostras podem ser extraídas de campo ou moldadas em laboratório. Além disso, podem ser utilizados corpos de prova cilíndricos ou em formato de placas, com volume de vazios de  $7 \pm 1\%$ . O ensaio é realizado pela passagem de uma roda padronizada sobre amostras submersas em água, usualmente a  $50^{\circ}\text{C}$ . As amostras são consideradas dentro do padrão de qualidade apenas quando sua deformação é inferior à 10% de sua altura para a condição de ensaio da AASHTO T 324.

Figura 19 - Simulador de tráfego de laboratório Hamburgo (HWTD)

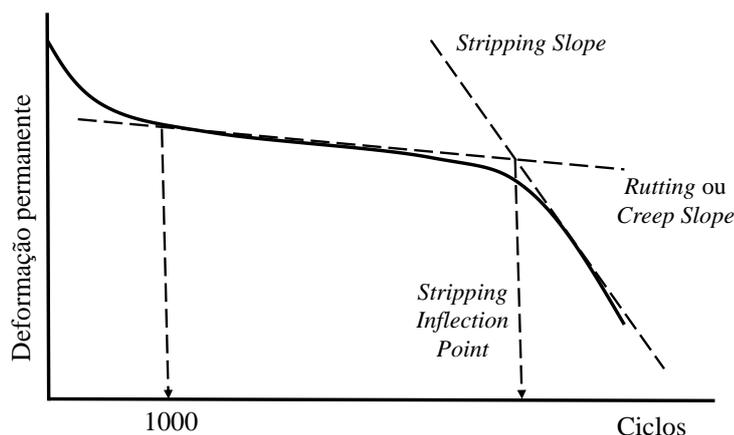


Fonte: Nascimento (2008).

A Figura 20 permite observar a evolução da deformação permanente ao longo dos ciclos do ensaio. A curva mostra um estágio inicial de consolidação da amostra, seguida por uma fase de taxa linear de deformação, associada ao fluxo de cisalhamento plástico (cuja inclinação é conhecida como *rutting* ou *creep slope*), e por último uma terceira região com inclinação diferente (*stripping slope*). O ponto de inflexão da segunda para a terceira fase é

denominado *stripping inflection point*. Além disso, a deformação em 1000 ciclos representa a consolidação da amostra (*postcompaction consolidation*).

Figura 20 - Esquema da evolução da deformação permanente no ensaio de Hamburgo



Fonte: Adaptado de Anderson (2002).

O *stripping inflection point* representa o grau de resistência ao dano por umidade da mistura. Nesse ponto inicia o arrancamento do ligante asfáltico do agregado e, por consequência, o aumento das deformações. Solaimanian et al. (2003) observaram que em pavimentos com bons resultados de adesividade o *stripping inflection point* foi superior à 10000 ciclos. Por outro lado, em pavimentos com problemas de adesividade esse valor foi inferior à 3000 ciclos. Os mesmos autores ainda perceberam a influência das propriedades do agregado (como a presença de argila na superfície dos agregados graúdos) nos resultados do ensaio.

Possebon (2021) encontrou classificações diferentes das misturas do estudo pelo ensaio de FN e pelo ensaio de Hamburgo. A mistura com CAP borracha apresentou maior resistência à danos por deformação permanente no Hamburgo em comparação com as misturas feitas com ligante convencional e modificado por polímero. A autora cita que maiores investigações a respeito da correlação dos ensaios devem ser realizadas.

Walubita et al. (2021), avaliando 10 misturas asfálticas diferentes, concluíram que o ensaio de Hamburgo possui a melhor repetibilidade e menor variabilidade nos resultados do teste, quando comparado ao ensaio de módulo dinâmico e o ensaio de deformação permanente

sob cargas repetidas. Os autores consideram o ensaio simples de ser executado, e o recomendam pois é capaz de fornecer dados de deformação permanente e de dano por umidade, além de terem obtido boa correlação com dados de campo. No entanto, destacam que o Hamburgo não fornece dados de viscoelasticidade, como o módulo dinâmico, necessários na análise de tensões e deformações, e projetos estruturais de pavimentos.

#### 2.2.2.4 Caracterização da resistência à fadiga

Um material pode ser levado à falha pela aplicação repetida de tensões mesmo que elas sejam inferiores à tensão admissível última (WÖHLER, 1870). Além disso, o nível de tensão aplicado tem influência nesse processo, visto que tensões mais elevadas geram um menor número de ciclos até a falha do material. Wöhler define, portanto, a vida de fadiga em curvas que correlacionam a amplitude de deformação aplicada com o número de ciclos até a falha, de maneira que é possível realizar uma regressão estatística para obter o modelo de vida de fadiga.

Diferente da deformação permanente, que está principalmente ligada à dosagem do material quando se observa um pavimento com uma única camada asfáltica (tensão na camada igual à pressão do pneu do veículo), o problema da fadiga ainda depende das camadas inferiores do pavimento. Isso acontece porque o padrão de comportamento e a consequente danificação por fadiga da camada asfáltica dependem também da rigidez e das espessuras das camadas inferiores, fazendo com que o estudo desse fenômeno utilize as tensões e deformações decorrentes da composição do pavimento como um todo.

Juntamente com os modelos de fadiga, é necessária a utilização de teorias que contemplem a acumulação do dano por fadiga na avaliação de estruturas de pavimentos. A teoria do dano cumulativo linear, ou de Palmgren-Miner (MINER, 1945; PALMGREN, 1924), é a mais conhecida, e entende que, a cada carregamento, o dano se acumula até um limite superior do material analisado. Assim, a um determinado nível de tensão, cada ciclo contribui de maneira idêntica para o dano final acumulado.

Esse é um modelo simplista e que deve ser utilizado como aproximação da realidade, uma vez que o dano se manifesta de formas diferentes para cada material, além de não ser linearmente proporcional ao nível de tensão aplicado (MANGIAFICO, 2014). A fadiga se manifesta nas misturas asfálticas decorrentes da solicitação à flexão repetida pelo tráfego,

gerando tensões de tração na base do revestimento (PREUSSLER; PINTO; MEDINA, 1981; TAYEBALI et al., 1994). Nesse caso, ocorre o fenômeno conhecido como trincamento base-topo. No entanto, se houver a presença de tensões cisalhantes muito elevadas na superfície, o revestimento pode ser submetido ao trincamento topo-base (HINTZ, 2012).

Esse processo gera perda de rigidez e de integridade ao longo da vida útil do pavimento. Além disso, a perda de rigidez pela formação de microtrincas eleva as deformações observadas, contribuindo para o agravamento desse fenômeno (DI BENEDETTO et al., 2004).

Assim, como a deformação permanente, a fadiga em misturas asfálticas, especificamente, depende de fatores como as características do concreto asfáltico, condições climáticas e cargas impostas. No entanto, sua complexidade vai além da deformação permanente, uma vez que esse fenômeno também depende das condições estruturais do pavimento (SCHUSTER, 2018). O tipo de ligante asfáltico e o teor utilizado possuem importância fundamental no comportamento à fadiga, em geral com ligantes modificados mostrando resultados superiores (PELL, 1962; EPPS et al., 1969; BRENNAN; LOHAN; GOLDEN, 1990; SPECHT, 2004; NASCIMENTO et al., 2014).

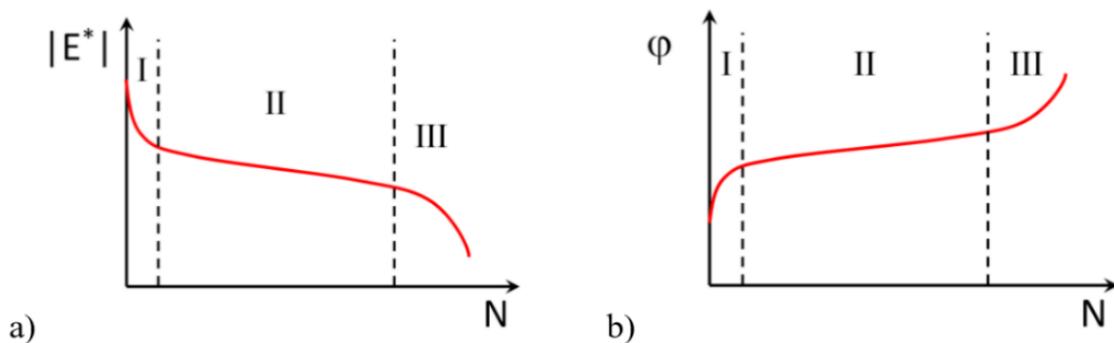
A avaliação dos agregados e sua composição também deve ser realizada no estudo da fadiga. Em geral, autores apontam a melhora no comportamento à fadiga para agregados mais rugosos (melhora da adesividade) e mais cúbicos (KIM; KIM; KHOSLA, 1992). Soares (2000) ainda afirma que granulometrias mais finas são mais adequadas nesse sentido. Outros estudiosos indicam que a densidade e o volume de vazios também possuem influência na vida de fadiga (HARVEY et al., 1995). No entanto, Park e Kim (2014) defendem que problemas estruturais são os maiores responsáveis pelo fenômeno de fadiga em pavimentos asfálticos.

Todos os ensaios de fadiga, para reproduzirem o fenômeno de maneira mais aproximada em laboratório, são cíclicos. Podem ser testes de tração (direta ou por compressão diametral) ou de flexão (vigas de 2, 3 ou 4 pontos). A diferença entre o ensaio uniaxial de tração direta ou de tração-compressão, além da configuração do ensaio, é que apenas esse é homogêneo (em uma seção transversal da amostra, todos os pontos recebem a mesma solicitação em um dado instante de tempo). Como isso não ocorre nos ensaios não homogêneos, os resultados precisam de manipulação matemática e levantamento de hipóteses para obter a propriedade do material.

O ensaio de fadiga por compressão diametral, o qual será abordado na seção seguinte, possui como principal vantagem sua simplicidade de execução e análise. No entanto, apresenta desvantagens como o surgimento de deformações permanentes no local dos frisos de aplicação de carregamento (COLPO, 2014). Além disso, é um ensaio que, apesar de simples, dispende muito tempo para ser realizado.

Ao longo de ensaios cíclicos, observa-se a queda do módulo dinâmico e o aumento do ângulo de fase (Figura 21). A fase I é chamada de fase de adaptação, onde ocorre a queda acentuada do módulo, assim como o aumento rápido do ângulo de fase, devido ao próprio dano por fadiga, pelo aquecimento e dissipação de energia, e pela tixotropia do ligante. Na fase II a evolução dos valores de módulo e ângulo de fase é quase linear, e deve-se em sua maioria ao fenômeno de fadiga propriamente dito. Nessa fase são iniciadas as microfissuras. A fase III caracteriza a formação e propagação de microfissuras, sendo observadas uma queda rápida do módulo dinâmico. A falha por fadiga não necessariamente ocorre no momento em que há a ruptura visível da amostra. Para essa identificação, são determinados critérios de falha por diversos autores, que buscam identificar o momento correto da ruptura da amostra.

Figura 21 - Evolução do (a) módulo dinâmico e do (b) ângulo de fase em ensaios cíclicos



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014).

O primeiro critério desenvolvido segue uma abordagem “clássica” de determinação da ruptura, sinalizando-a no ciclo em que ocorre a queda de 50% da rigidez inicial (PRONK; HOPMAN, 1990; TAYEBALI et al., 1993). No entanto, é apenas arbitrário e não leva em conta os fenômenos não correlatos à fadiga como tixotropia e aquecimento da amostra.

A segunda abordagem consiste em calcular a energia dissipada ao longo dos ciclos do ensaio, calculando a área da elipse formada na curva tensão-deformação. Assim, calcula-se a razão de energia dissipada (DER) e a falha é determinada no ciclo em que ocorre uma inversão de comportamento desse parâmetro. O DER é obtido pela razão da energia dissipada total pela energia dissipada a cada ciclo do ensaio (KIM, 2009).

O terceiro critério que pode ser utilizado, e mais razoável que a abordagem clássica, consiste em identificar o ponto de inflexão do ângulo de fase, que ocorre após o seu pico. Esse ponto normalmente corresponde à segunda inflexão da curva de módulo dinâmico, onde o material já perdeu de 70 a 80% da sua rigidez inicial (KIM; LITTLE; LYTTON, 2003).

Por fim, o critério “local” consiste em identificar a passagem da fase II para a fase III de fissuração, visto que a formação de microfissuras perturba a homogeneidade do meio. Ao longo do ensaio de fadiga, as medidas de deformação de três extensômetros posicionados na amostra permanecem próximas da amplitude média de tensão. A ruptura é identificada quando um dos extensômetros monitorar uma deformação que difere em mais de 25% a deformação média da amostra, mostrando que o material não está mais homogêneo (BAAJ, 2002).

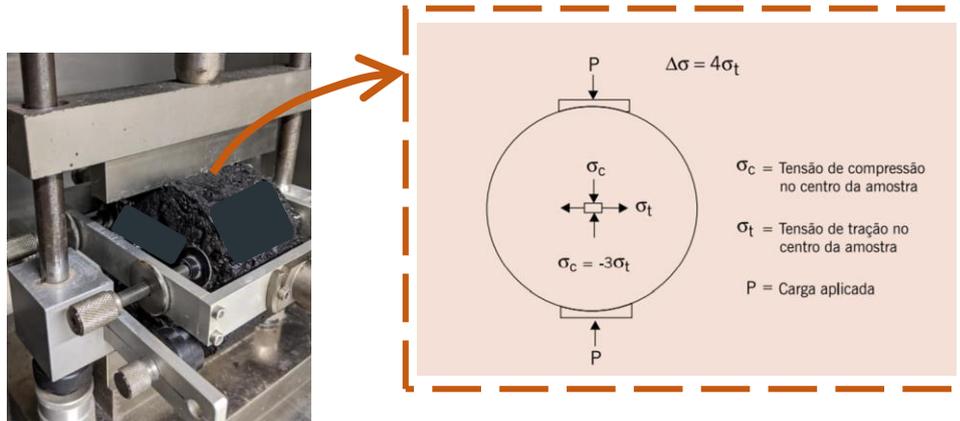
A seguir serão descritos os ensaios de fadiga mais utilizados no Brasil: o ensaio de fadiga por compressão diametral (estado da prática) e o ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração direta, ainda no âmbito de pesquisas acadêmicas.

#### *2.2.2.4.1 Ensaio de fadiga por compressão diametral e sua utilização no MeDiNa*

O ensaio de fadiga por compressão diametral é uma adaptação do ensaio criado por Fernando Lobo Carneiro em 1943, para concreto de cimento Portland. A configuração do ensaio é a mesma utilizada no módulo de resiliência, na qual a carga é aplicada sobre o diâmetro da amostra, resultando em tração nas outras direções (CERATTI, 1991).

O ensaio é realizado seguindo a norma DNIT 183/2018 - ME. A Figura 22 apresenta o estado de tensões biaxiais geradas pelo protocolo. Esse ensaio é de fácil execução, além de ser comercialmente viável. Além das desvantagens comentadas na seção anterior, é importante destacar que inferências sobre o desempenho da mistura em campo somente a partir das curvas de fadiga devem ser realizadas com cautela, uma vez que o estado de tensões gerado ainda depende da estrutura do pavimento e do valor do MR das camadas.

Figura 22 - Estado de tensões no centro de um CP cilíndrico sob compressão diametral



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2022).

Para ensaios à tensão controlada, o número de ciclos para a ruptura pode ser calculado pelas Equações 5 ou 6. Por essas relações são geradas as curvas de vida de fadiga. O carregamento constante não necessariamente gera tensão constante ao longo do ensaio, sendo apenas uma simplificação. Assim, são consideradas as tensões e a deformação inicial relativas no início do ensaio (primeiro ciclo), onde não há ainda o acúmulo de dano. Outra simplificação adotada pelo ensaio é a admissão de um material elástico, isotrópico e sem danos.

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (5)$$

$$N = k_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (6)$$

Onde:

$N$  = número de ciclos até a ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\sigma_t$  = tensão de tração repetida solicitante;

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

$k_i, n_i$  = constantes de regressão linear dos pares  $N$  e  $\sigma_t$  (ou  $\Delta\sigma$ ) do ensaio, em escalas logarítmicas.

Cabe ressaltar que o ensaio não considera aspectos como o envelhecimento da mistura, a progressão do dano, variações térmicas e o fenômeno de recuperação de trincas em períodos de repouso de carregamento (*healing*) (RODRIGUES, 1991). O ensaio de fadiga à tração por compressão diametral é atualmente utilizado no novo método de dimensionamento de pavimentos do DNIT, o MeDiNa. Nesse método, embora o ensaio seja realizado à tensão controlada, as curvas de fadiga devem ser construídas em função da deformação de tração inicial, visto que assim foi realizada a calibração da função de transferência (fator laboratório-campo), conforme a Equação 7.

$$N = k_1 * \varepsilon_t^{k_2} \quad (7)$$

Onde:

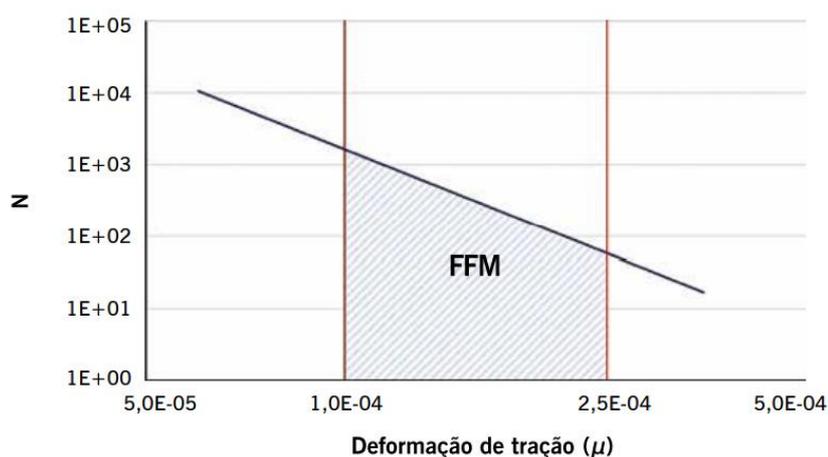
N = número de ciclos até a ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$k_1$  e  $k_2$  = constantes experimentais;

$\varepsilon_t$  = deformação de tração inicial do ensaio em cada nível de tensão.

Assim, são geradas as curvas de N vs.  $\varepsilon$ , e calcula-se o fator de fadiga da mistura (FFM), como a área abaixo da curva entre as deformações de 100  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$  (Figura 23).

Figura 23 - Área considerada no cálculo do Fator de Fadiga da Mistura (FFM)



Fonte: Fritzen et al. (2019).

O MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), é o novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos brasileiros. Ao programa de análise de pavimentos SisPav, de Franco (2007), foi adicionado por Fritzen (2016) um banco de dados

com uma função de transferência calibrada com 45 segmentos experimentais do Projeto Fundão. A validação da função foi realizada com 13 segmentos monitorados, no Rio de Janeiro (RJ), Rio Grande do Sul (RS), São Paulo (SP) e Ceará (CE). Atualmente, foram feitas algumas modificações na função de transferência de Fritzen para inserção no MeDiNa, conforme detalhado no manual do programa (FRANCO; MOTTA, 2023). A função de transferência do programa será detalhada em seção posterior.

O programa assume como premissas:

- 1) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é realizada por meio de iterações elásticas lineares);
- 2) A hipótese de Hooke é válida e o módulo de compressão é similar ao módulo de tração;
- 3) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- 4) Todas as camadas possuem espessura finita, com exceção da camada inferior (subleito) que é considerada semi-infinita;
- 5) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- 6) Na área que está carregada ocorrem apenas tensões normais;
- 7) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- 8) As tensões e deformações são nulas à grandes profundidades;
- 9) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida (entre materiais asfálticos) para lisa ou sem aderência (em interfaces granulares e granular-asfáltico).

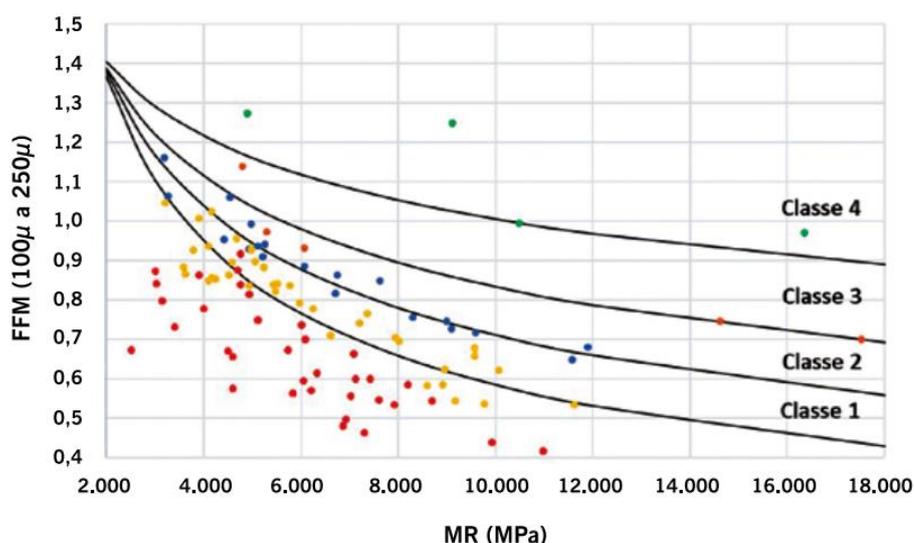
O programa permite o cálculo de pavimentos novos, reforços, ou apenas realizar a análise de um pavimento. A área trincada em misturas asfálticas é avaliada pela curva de fadiga e pelo módulo de resiliência. Além de determinar o N de fadiga, o software calcula o dano médio acumulado por fadiga em uma malha de 20 pontos. Atrelando esses dados a uma função de transferência integrada ao MeDiNa, permite-se calcular a área trincada prevista para o revestimento. A função de transferência será abordada na seção de “abordagem multiescala”.

A resistência à deformação permanente é garantida pelo atendimento do FN (Tabela 9). Os limites para área trincada e ATR também serão descritos na seção de “abordagem multiescala”. Para solos e materiais granulares é possível calcular valores de deformação

permanente, sendo exigidos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente triaxiais. Mais detalhes da formulação para esses materiais em Franco e Motta (2023).

O tráfego é considerado pela passagem do eixo padrão rodoviário, com a carga sendo igual à pressão de inflação dos pneus e distribuída em uma área circular entre pneu e pavimento. O programa fornece a evolução mensal dos danos (área trincada e ATR) e as bacias de deflexão estimadas (para realizar o controle executivo). O FFM correlacionado com o MR do material pela metodologia gera as 4 classes de fadiga do MeDiNa, auxiliando projetistas, por exemplo, nas fases de anteprojeto e dosagem de misturas asfálticas (Figura 24). Nesse sentido, materiais da classe 1 são os menos resistentes à fadiga e os da classe 4 os mais resistentes.

Figura 24 - Classes de fadiga do MeDiNa para misturas asfálticas densas



Fonte: Fritzen et al. (2019).

Custódio (2022) caracterizou o comportamento à fadiga de 9 misturas asfálticas, sendo 6 coletadas durante a execução segmentos rodoviários monitorados pela UFSM e 3 de laboratório, com ligantes convencionais e asfalto borracha, utilizando os ensaios de fadiga por compressão diametral e fadiga à tração-compressão. As simulações realizadas pelo MeDiNa com os dados de fadiga por compressão diametral refletiram satisfatoriamente os percentuais de área trincada observados nos trechos monitorados. Além disso, o autor observou que

misturas com maiores rigidezes atingiram classes de fadiga superiores, e o FFM foi considerado um bom indicador para ranqueamento das misturas.

O mesmo autor identificou que a análise de fadiga pelo LVECD utilizando o ensaio de tração-compressão captou melhor o benefício da utilização de asfalto borracha. Quanto às simulações de área trincada, para estruturas menos robustas o MeDiNa tende a ser mais rigoroso. Por fim, ao confrontar a vida de fadiga pelo  $N_f$  previsto pelo tração-compressão e o  $N_f$  encontrado pelo ensaio de fadiga por compressão diametral, o autor encontrou um  $R^2$  relativamente baixo (0,5), e menores valores de  $N_f$  (obtidos por maiores deformações aplicadas) apresentaram maior dispersão. No entanto, ao desconsiderar o comportamento atípico de uma de suas misturas, a relação passou para um  $R^2$  de 0,82, considerado por Custódio como satisfatório.

#### 2.2.2.4.2 Ensaio uniaxial de fadiga à tração direta, S-VECD e uso do FlexPAVE<sup>TM</sup>

O ensaio uniaxial de fadiga à tração direta consiste em aplicar uma deformação cíclica senoidal em corpos de prova cilíndricos, e está normatizado pela AASHTO T 400 (2022). Ao longo do ensaio de tração direta, a deformação atinge um pico determinado, e retorna ao eixo zero, repetindo ciclicamente essa aplicação até a ruptura.

Uma primeira fase deve ser realizada antes do ensaio de fadiga, denominada de *fingerprint*, na qual é aplicado um carregamento baixo na mesma frequência do ensaio de fadiga, de modo que a deformação fique entre 50 e 75  $\mu\text{m/m}$  (dentro do domínio viscoelástico linear). Nessa etapa são obtidas as características viscoelásticas lineares do material, e identificadas as variações de amostra para amostra. Em seguida, é realizado o ensaio de fadiga propriamente, no qual é aplicada uma frequência de 10 Hz em temperaturas intermediárias, por exemplo, 19°C. Cada amostra é submetida a uma amplitude de deformação.

A partir do ensaio, inicialmente podem ser geradas as curvas de Wöhler, a partir da qual é calculado o fator de área de fadiga (FAF) para ranqueamento de misturas asfálticas. As curvas de Wöhler são obtidas plotando a deformação vs. o número de ciclos de ruptura em escala log-log. A área abaixo da curva fornece o FAF, atualmente conhecido como Fator de Fadiga da Mistura (FFM). Schuster (2018) optou por calcular a área entre as deformações de 150 e 250  $\mu\text{m/m}$  (níveis de deformação encontrados para a maioria das misturas do estudo). No entanto, Nascimento (2015) utilizou o intervalo de 100 a 200  $\mu\text{m/m}$  após a aplicação do S-

VECD (mais próximos das deformações encontradas na fibra inferior do revestimento segundo o autor).

Com os resultados do ensaio de módulo complexo e do uniaxial de fadiga à tração direta, é possível obter a curva característica de dano única de cada material, utilizando o modelo S-VECD que será discutido a seguir. Esse modelo independe das características do ensaio como a temperatura, e atualmente está sendo amplamente estudado no âmbito das pesquisas brasileiras.

O modelo viscoelástico de dano contínuo (*Viscoelastic Continuum Damage* - VECD) surge como uma necessidade de aliar as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas com o acúmulo do dano por fadiga, com uma abordagem baseada em desempenho. A concepção do modelo inicia Kim e Little (1990), mas foi desenvolvido efetivamente por Lee e Kim (1998), incorporando também a teoria do trabalho potencial para materiais com danos crescentes de Schapery (1981).

As bases do VECD consistem na quantificação do dano utilizando a teoria do trabalho potencial, e o emprego do princípio da correspondência elástico-viscoelástico para aplicação do método aos materiais asfálticos (NASCIMENTO, 2015). Além disso, a teoria faz uso da superposição tempo-temperatura com dano. Ao final da metodologia, são encontrados os valores de C, pseudorrigidez ou integridade, e S, dano, formando uma curva característica (C vs. S) que independe das condições do ensaio. Para materiais viscoelásticos, a deformação é substituída pela pseudodeformação. Assim, a pseudorrigidez ou integridade é calculada pela Equação 8. Ao longo do crescimento do dano, a integridade diminui.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão;

$\varepsilon^R$  = pseudodeformação.

A pseudodeformação pode ser calculada pela a integral de convolução da Equação 9.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_r} \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (9)$$

Onde:

$E_r$  = módulo de referência, normalmente unitário;

$E(t)$  = módulo de relaxação viscoelástico linear;

t = tempo de interesse;

$\tau$  = variável de integração.

Quando há a aplicação de um carregamento, o trabalho realizado é parcialmente armazenado como energia de deformação, e parcialmente consumido gerando dano. Assim, pela teoria do trabalho potencial, o dano pode ser calculado de acordo com a Equação 10.

$$S = \sum_{t=1}^N \left[ \frac{1}{2} (\varepsilon^R)^2 (C_{i-1} - C_1) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_{i-1} - t_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (10)$$

Onde:

$\alpha$  = taxa de evolução do dano ( $1/m+1$ ), em que  $m$  é a inclinação máxima do módulo de relaxação em função do tempo reduzido no espaço (ambos em escala log).

Além disso, o princípio da superposição tempo-temperatura também pode ser aplicado aos domínios de danificação. Isso é verificado pois os mesmos *shift factors* utilizados na construção das curvas mestras são capazes de formar uma curva única de tensão vs. tempo reduzido no domínio do dano (CHEHAB et al., 2002).

O protocolo VECD é baseado em ensaios monotônicos, exigindo cargas muito altas e não possui um critério de falha por fadiga devido à inexistência de ciclos. Assim, os trabalhos de Underwood, Baek e Kim (2012) e Underwood e Kim (2009) propuseram o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage – S-VECD*) para ensaios cíclicos, de maneira a também agilizar os protocolos de caracterização por fadiga. As funções do modelo podem ser inseridas em uma ferramenta para análise estrutural para simular de maneira mais precisa o desempenho em campo. Mais detalhes da formulação final do S-VECD podem ser encontrados em Underwood, Baek e Kim (2012). Uma revisão mais ampla desse modelo ainda pode ser consultada em Nascimento (2015).

Cabe ressaltar que o protocolo simplificado utiliza a etapa de *fingerprint* na normalização da pseudorrigidez pela relação de módulo dinâmico (DMR). Esse parâmetro é calculado pela razão entre o módulo dinâmico da etapa de *fingerprint* ( $|E^*|_{\text{fingerprint}}$ ) e o módulo dinâmico do ensaio de módulo complexo que deve ser realizado anteriormente ( $|E^*|_{\text{LVE}}$ ). Essa normalização tem como objetivo retirar a variabilidade entre amostras.

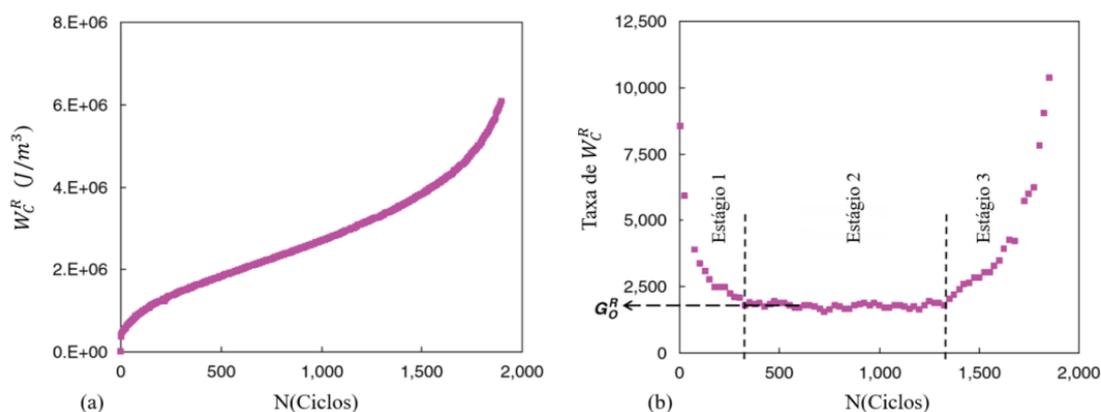
O modelo incorpora, por fim, um critério de falha que se baseia em propriedades fundamentais do material. Inicialmente o critério de falha foi pautado na observação da taxa da energia de pseudodeformação liberada ( $W_C^R$ ), definindo como indicador a taxa estável da energia de pseudodeformação liberada ( $G_O^R$ ) (Zhang et al., 2013). Essa taxa ocorre no estágio

II da taxa de  $W_C^R$  (Figura 25), e os ciclos até a falha previstos por essa metodologia possuem boa correlação com o  $N_f$  obtido experimentalmente pela queda do ângulo de fase.

No entanto, o critério utilizado atualmente foi obtido pela atualização do  $G_0^R$  no trabalho de Sabouri e Kim (2014). Os autores propuseram o critério que utiliza a taxa de variação da média da energia de pseudodeformação liberada ( $G^R$ ), válido para qualquer modo de carregamento do ensaio de fadiga (Equação 11).

$$G^R = \frac{\overline{W_C^R}}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{N_f} \quad (11)$$

Figura 25 - Evolução de  $W_C^R$  e (b) taxa de  $W_C^R$



Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014).

Até então os pavimentos asfálticos eram analisados estruturalmente como um sistema de camadas elásticas sob cargas axissimétricas estacionárias. Para considerar a viscoelasticidade sob cargas móveis e o estado tridimensional de tensões que é gerado, Eslaminia et al. (2012) desenvolveram o software *Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses* (LVECD), de nome comercial FlexPAVE™.

O FlexPAVE™ prevê a deformação permanente por modelos viscoplásticos e a fadiga pela mecânica do dano contínuo descrita acima, com algumas hipóteses:

- 1) As camadas são consideradas horizontalmente infinitas, com as propriedades do material variando apenas ao longo da profundidade;

- 2) Para a análise dos efeitos do tráfego em um segmento do pavimento e em um determinado período, o perfil de temperatura é considerado como fixo, uma vez que as variações da temperatura são capturadas em dados horários e o tráfego varia em segundos;
- 3) A temperatura varia ao longo da profundidade, e é considerada constante para pontos na mesma profundidade;
- 4) Os cálculos de tensão e deformação são realizados para um ano representativo, visto que a temperatura é uma função cíclica ao longo do perfil pelo período de 1 ano;
- 5) O tráfego é considerado como uma carga cíclica que possui área de contato do pneu com o pavimento e velocidade constantes;
- 6) As camadas de base, sub-base e subleito são idealizadas como sendo elástico lineares;

Assim, para simular o comportamento à fadiga do revestimento, os dados de entrada são: clima, tráfego, estrutura do pavimento, propriedades LVE da mistura (a partir dos coeficientes do modelo sigmoidal e com consideração também dos *shift factors*), e coeficientes do modelo S-VECD. Do modelo S-VECD são utilizados os coeficientes  $C_{11}$  e  $C_{12}$  da curva C vs. S ajustada por modelo de potência (ou a e b se for ajustada por modelo exponencial, a depender da versão do software utilizada), parâmetro de evolução do dano ( $\alpha$ ), e coeficientes das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$  ( $\gamma$  e  $\Delta$ ). Após o tratamento dos dados do ensaio é possível obter as curvas características de dano (C vs. S), que colapsam entre si independentemente das condições do ensaio (Figura 26). O ajuste das curvas é realizado pelo modelo de potência (Equação 12), ou exponencial (Equação 13).

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

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (13)$$

Onde:

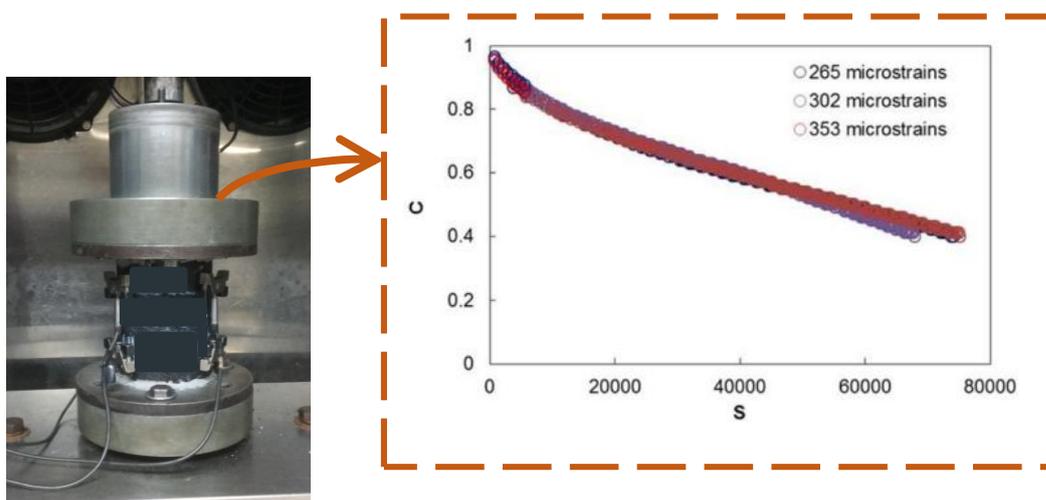
$C_{11}$ ,  $C_{12}$  = coeficientes de regressão do modelo de potência.

a, b = coeficientes de regressão do modelo exponencial.

Schuster (2018) avaliou o comportamento à fadiga de 24 misturas utilizadas em campo. O autor conclui que não há correlação significativa entre os índices do ensaio de

resistência à tração por compressão diametral (como o RT, a tenacidade e o índice de tenacidade) e o dano acumulado em 120 meses pelo LVECD. Ainda, comparando o desempenho à fadiga pelo mesmo critério com dados de viscoelasticidade, o autor observou que misturas com melhor comportamento apresentam o pico do ângulo de fase em frequências reduzidas mais altas. Schuster também encontrou boa correlação entre o FAF e o dano acumulado em 120 meses.

Figura 26 - Curvas características de dano (C vs. S)



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Assaf (2019) ao estudar 58 diferentes misturas asfálticas, observou que, ao cruzar dados de dano médio acumulado em 180 meses (estimado pelo LVECD) e o parâmetro FN, misturas com menores danos e maiores FN destacava-se em relação às demais. Nesse sentido, ficou evidente no estudo do autor a superioridade das misturas modificadas com polímero. Sobre esse tipo de análise, Schuster (2018) recomenda que a primeira avaliação seja eliminatória para a classe de tráfego desejada e realizada pelo FN (como é realizado hoje no MeDiNa), seguindo da avaliação do dano por fadiga de maneira classificatória.

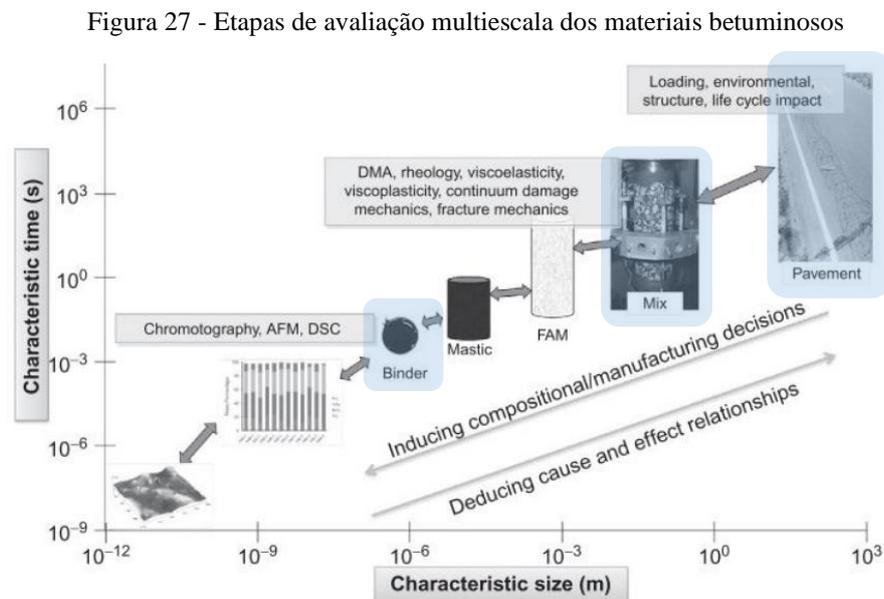
### 2.3 ABORDAGEM MULTIESCALA

A análise multiescala almeja estabelecer relações de causa e efeito que possibilitam melhores escolhas no projeto de misturas e pavimentos asfálticos. Como comentado em

seções anteriores, os ligantes asfálticos, em sua menor escala, podem ser definidos como uma estrutura complexa de hidrocarbonetos e alguns heteroátomos. No entanto, quando observado em uma escala maior, pode ser observado como um material viscoelastoplástico e termo dependente. Nesse sentido, a reologia é a ciência capaz de descrever seu comportamento, fornecendo parâmetros potencialmente influentes no comportamento da mistura asfáltica final.

Por outro lado, é rotineiro a avaliação mecânica na escala das misturas asfálticas como uma combinação de ligantes asfálticos, agregados dos mais diversos tamanhos e vazios preenchidos com ar. Ainda nessa escala, a primeira análise que pode ser realizada é acerca do mástique, contendo ligante e fíler (partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ ), uma vez que esse dita o comportamento que ocorre na interface entre o agregado e o CAP.

Em seguida, é coerente a consideração da matriz de agregado fino (MAF), que consiste no conjunto mástique + partículas finas do agregado. Essa parcela é grande responsável pela deformação em altas temperaturas, bem como pelo trincamento em temperaturas intermediárias, sendo o contato entre as partículas o fenômeno de maior interesse nesse caso (POSSEBON, 2021). Assim, o entendimento dos mecanismos que ocorrem em cada escala pode culminar em formulações analíticas de previsão de um fenômeno de interesse. A Figura 27 estabelece essas relações, e estão destacadas as escalas que foram estudadas neste trabalho.



Fonte: Underwood (2015).

### 2.3.1 Previsões e inferências acerca do comportamento das misturas

A qualidade de um pavimento asfáltico depende, dentre outros fatores, de uma seleção e projeto adequados da mistura asfáltica, uma vez que é a camada responsável por resistir diretamente as ações do tráfego. De maneira análoga, a avaliação na escala ligante é necessária pela relação direta com a qualidade da mistura, relacionando-se, portanto, ao desempenho final do pavimento (HINTZ et al., 2011; SAFAEI; CASTORENA; KIM, 2016; PIRES et al., 2022).

A previsão de comportamento das misturas asfálticas a partir da reologia, ou mesmo da química dos ligantes, tem se tornado um tema emergente, visto que a caracterização completa de uma mistura asfáltica é demasiadamente laboriosa. A metodologia Superpave vem indicando, desde a década de 1990, que é possível garantir um desempenho adequado da mistura apenas pela seleção criteriosa do ligante asfáltico, contanto que a combinação de agregados atenda a um conjunto de características denominadas “propriedades de consenso”. Essa previsão inicia com a identificação de parâmetros em menores escalas que se correlacionam com o desempenho das misturas ou com dados de campo, que posteriormente podem ser incorporados a modelos matemáticos. Os modelos, portanto, são utilizados para calcular propriedades desejadas, a partir de dados em menores escalas, por exemplo de ligantes para misturas, e de misturas para pavimentos reais.

Embora a caracterização das misturas asfálticas diretamente seja mais apropriada para a realização da análise estrutural e de desempenho dos pavimentos, a caracterização inicial dos ligantes asfálticos pode servir como um processo de seleção mais assertivo e que requer menor tempo de ensaio. Nesse sentido, os seguintes tópicos dedicam-se a elucidar os possíveis métodos de análise entre escalas, abrangendo a viscoelasticidade linear, a deformação permanente e a fadiga.

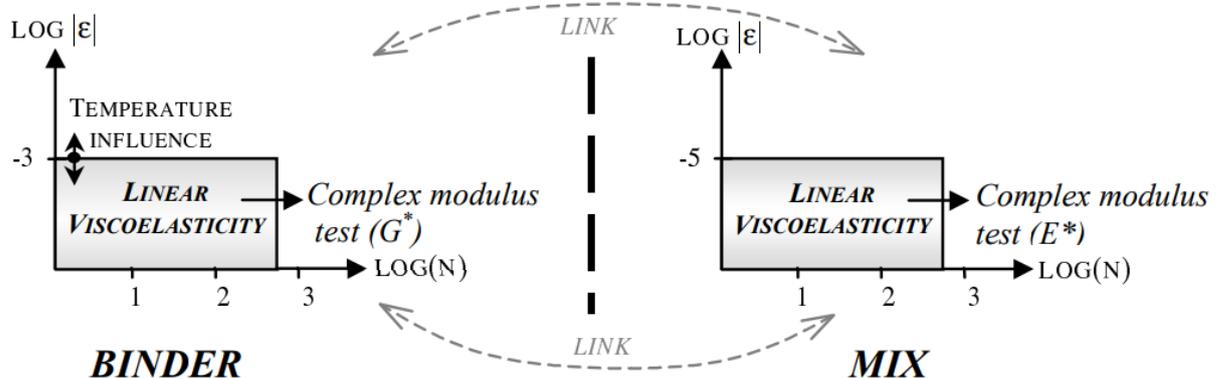
#### 2.3.1.1 Viscoelasticidade linear

A fase inicial da avaliação multiescala deve ser realizada no domínio viscoelástico linear, uma vez que a reologia das misturas asfálticas é determinada pela reologia do ligante. Dados de rigidez são essenciais no cálculo de tensões e deformações, e a previsão da rigidez

das misturas a partir da rigidez dos CAPs se torna interessante uma vez que os ensaios necessitam de uma pequena quantidade de amostra e são de fácil e rápida execução.

Olard et al. (2011) buscaram relações entre a reologia dos ligantes com o comportamento das misturas, ambos avaliados no domínio viscoelástico linear, usando os ensaios de módulo complexo em ligantes e misturas. A Figura 28 esquematiza a avaliação da viscoelasticidade linear de ligantes e misturas. Os autores observaram que o princípio da superposição tempo-temperatura em misturas depende do comportamento do ligante, uma vez que os *shift factors* ( $a_T$ ) são quase idênticos entre os ligantes e suas respectivas misturas. Assim, foi possível encontrar uma relação simples entre  $\log|G^*|$  (módulo de cisalhamento dinâmico do ligante) e  $\log|E^*|$  (módulo dinâmico da mistura). Unindo essa relação com a equação de WLF, é possível prever o módulo da mistura a partir do módulo do ligante em qualquer combinação de frequência e temperatura. Cabe ressaltar que os coeficientes dessa equação variam de acordo com o esqueleto pétreo.

Figura 28 - Domínio viscoelástico linear de ligantes e misturas asfálticas no gráfico deformação vs. número de ciclos em escala log-log e ensaios realizados



Fonte: Olard et al. (2011).

Di Benedetto et al. (2004), baseados no estudo de 16 diferentes materiais betuminosos, propõem a Equação 14 para prever a rigidez da mistura a partir da rigidez do ligante, a uma dada temperatura. As constantes  $E_{0 \text{ mix}}$  e  $E_{\infty \text{ mix}}$ , segundo os autores, já são reportadas na literatura como altamente dependentes da composição da mistura.

Já o parâmetro  $\alpha$  pode depender do projeto/dosagem da mistura e/ou do envelhecimento causado pelo processo de homogeneização da mesma. Assim, para um mesmo projeto de mistura, bastaria que fosse testada apenas uma mistura asfáltica, e os módulos das demais (com diferentes ligantes) seriam facilmente previstos. Além disso, os autores demonstraram, a partir da modelagem 2s2p1d, que 4 das 7 constantes do modelo foram idênticas para ligantes e misturas em seu estudo e concluem, portanto, que a reologia das misturas asfálticas depende principalmente da reologia dos ligantes.

$$E_{mix}^*(\omega, T) = E_{0\ mix} + [E_{binder}^*(10^\alpha \omega, T) - E_{0\ binder}] \frac{E_{\infty\ mix} - E_{0\ mix}}{E_{\infty\ binder} - E_{0\ binder}} \quad (14)$$

Onde:

$E_{mix}^*$  = módulo previsto da mistura na temperatura T e frequência  $\omega$

$E_{binder}^*$  = módulo medido do ligante na temperatura T e frequência  $\omega$

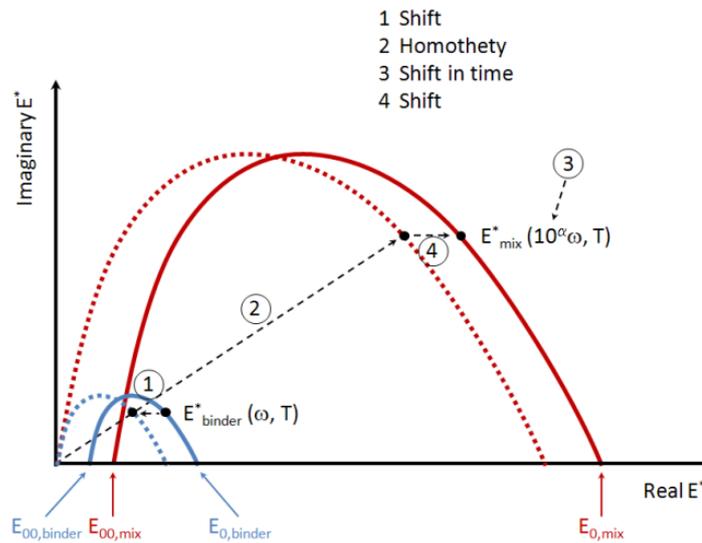
$E_{0\ mix}$  e  $E_{0\ binder}$  = mínimo valor assintótico módulo dinâmico (quando  $\omega \rightarrow 0$ ) para misturas e ligantes, respectivamente

$E_{\infty\ mix}$  e  $E_{\infty\ binder}$  = máximo valor assintótico módulo dinâmico (quando  $\omega \rightarrow \infty$ ) para misturas e ligantes, respectivamente

Mangiafico (2014) realizou a caracterização mecânica de ligantes e misturas com RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), além de obter relações entre as duas escalas. O autor utilizou a metodologia de previsão das características lineares viscoelásticas das misturas a partir dos ligantes, proposta no trabalho de Di Benedetto et al. (2004). A metodologia foi denominada de transformação SHStS (*Shift-Homothety-Shift in time-Shift*), baseada no plano Cole-Cole. Nele são realizados um deslocamento no eixo horizontal, uma transformação homotética, um deslocamento do tempo característico e outro segundo deslocamento ao longo do eixo horizontal (Figura 29). O autor encontrou previsões bastante assertivas no que diz respeito às curvas mestras de módulo dinâmico, ângulo de fase, plano Cole-Cole e diagrama Black.

Possebon (2021) realizou a caracterização avançada de misturas e ligantes asfálticos brasileiros. Na modelagem 2s2p1d, a autora encontrou valores de k, h e  $\delta$  idênticos ou muito parecidos nas escalas ligante e mistura. O parâmetro  $\beta$  mostrou-se significativamente menor para os ligantes. Além disso, a transformação SHStS foi capaz de prever satisfatoriamente as características LVE de 9 dos 10 ligantes convencionais da pesquisa. Para os ligantes modificados por polímero e por borracha, a transformação previu menores valores de módulo dinâmico e maiores valores de ângulo de fase quando comparados aos dados experimentais.

Figura 29 - Esquema da transformação SHStS para prever as propriedades da mistura a partir do ligante



Fonte: Mangiafico (2014)

### 2.3.1.2 Deformação Permanente

Como comentado em seção anterior, diversos esforços têm se voltado para o desenvolvimento de ensaios para ligantes asfálticos fora do domínio viscoelástico linear. O regime da danificação e a abordagem de diferentes variáveis na simulação do comportamento à deformação permanente levam à obtenção de diferentes índices que reproduzem com maior precisão esse fenômeno. No entanto, a definição e validação de um parâmetro essencialmente fenomenológico, que possua relação direta com o comportamento das misturas, ainda tem sido extensamente avaliado. Destaca-se, nesse sentido, o potencial do ensaio de MSCR na predição do comportamento de misturas com diferentes ligantes asfálticos.

Wasage, Stastna e Zanzotto (2011) realizaram a comparação entre parâmetros reológicos do MSCR com o afundamento por simulador de tráfego de laboratório, para 4 ligantes diferentes, incluindo convencional, AMP e AMB. Os autores discutem que as melhores correlações são obtidas na maior tensão do MSCR. Além disso, mostram que o ensaio pode fornecer o limite da viscoelasticidade linear dos ligantes asfálticos, além de salientarem que o potencial de previsão da deformação permanente depende da temperatura de ensaio.

Pires (2020) realizou análises de deformação permanente em 3 escalas: ligantes, misturas e campo (trechos experimentais) (foram ensaiadas 8 misturas asfálticas). A deformação permanente foi avaliada pelos ensaios de *Flow Number* e Hamburgo nas misturas, e MSCR nos ligantes. O autor demonstra a clara superioridade dos ligantes modificados quanto a esse defeito, e mostra que a rigidez das misturas em alta temperatura é um bom previsor de desempenho, uma vez que obteve excelentes correlações entre o marcador de rigidez das misturas  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e o FN, e entre a relação reológica  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e o FN.

As análises do autor indicam que o comportamento desejado em altas temperaturas para o enfrentamento desse defeito se reflete em maiores valores de rigidez e menores valores de ângulo de fase. Nesse mesmo sentido, altas correlações foram obtidas entre o FN e  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $|G^*|/\text{sen}\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  dos ligantes, quando realizada a análise separada por tipo de ligante. A respeito da rigidez em alta temperatura, o autor verificou que misturas com ligantes convencionais com  $|G|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  similares produzem misturas com  $|E|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  muito próximos, mesmo para curvas granulométricas e fontes mineralogias diferentes.

O Jnr3.2 avaliado no PG dos ligantes não mostrou uma tendência clara entre eles quando correlacionado com o FN, apenas obtendo correlação regular quando fixada a avaliação do MSCR a  $64^\circ\text{C}$ . No entanto, foi possível identificar que ligantes modificados por polímero desempenham melhor, seguidos por CAPs borracha e ligantes convencionais. A rigidez dos ligantes ( $|G^*|$ ) em alta temperatura correlacionou-se bem com o Jnr3.2, sendo capaz de classificar os ligantes na mesma ordem que o parâmetro do MSCR. O FN também diferenciou o comportamento de misturas com CAPs convencionais e modificados. Cabe ressaltar que Pires não encontrou correlações minimamente satisfatórias entre os resultados de Hamburgo com parâmetros de ligantes e misturas, quando observados os ligantes modificados.

Zhang et al. (2015) realizaram a avaliação de parâmetros de deformação permanente de ligantes ( $|G^*|/\text{sen}\phi$  e PG de alta temperatura do Superpave e Jnr do MSCR) com os resultados de DP das respectivas misturas (ensaio de Hamburgo e ensaio de deformação permanente sob carregamento repetido, RLPD). Os autores avaliaram 10 misturas asfálticas diferentes, incluindo misturas densas e do tipo SMA (*stone mastic asphalt*). Para as misturas e ligantes testados, os índices  $|G^*|/\text{sen}\phi$  e PG de alta temperatura apresentaram correlações fracas a médias com os ensaios das misturas. Por outro lado, os índices em ambas as tensões

do ensaio de MSCR apresentaram altos coeficientes de determinação para as regressões lineares simples quando correlacionados aos parâmetros dos ensaios realizados nas misturas asfálticas, evidenciando o potencial do ensaio na previsão da deformação permanente.

### 2.3.1.3 Fadiga

Assim como na deformação permanente, o fenômeno de fadiga pode ter sua avaliação iniciada nos ligantes asfálticos. No entanto, devido à natureza complexa do fenômeno, ainda não há uma metodologia no domínio da danificação incorporada nas especificações de ligantes e amplamente aceita. Destaca-se, no entanto, o esforço de diversos pesquisadores na avaliação do ensaio de LAS para predição da fadiga em misturas a partir dos ligantes asfálticos.

Safaei, Castorena e Kim (2016) afirmam que o ligante é o componente mais frágil da mistura asfáltica, e desempenha um papel determinante no comportamento à fadiga. Assim, a modelagem do comportamento à fadiga de ligantes asfálticos é um dos primeiros passos para se projetar uma mistura. Segundo os autores, o modelo S-VECD pode ser um aliado nesse processo. O estudo avaliou a aplicação do modelo para ligantes submetidos a ensaios no DSR, de *Frequency Sweep* (FS), *Time Sweep* (TS) e *Linear Amplitude Sweep* (LAS).

Os autores validaram o PSTT na modelagem pelo VECD em ligantes sob carregamento cíclico no DSR. Sob essa condição, o princípio da correspondência elástico-viscoelástico estendido de Schapery é válido também para os ligantes, e as curvas características de dano podem ser obtidas. Ainda, encontraram um  $R^2$  de 0,98 quando confrontadas as vidas de fadiga previstas pelo S-VECD e observadas no ensaio de LAS. Por fim, ao comparar a vida de fadiga observada na simulação de um pavimento com dados do S-VECD, os autores obtiveram um  $R^2$  de 0,84 entre o  $N_f$  da mistura e o  $N_f$  do ligante. Para a aplicação do S-VECD e simulação do ligante, a deformação de tração foi multiplicada por 80.

Martins (2014) demonstrou que existe uma alta correlação entre o fator de fadiga do ligante e o fator de fadiga da mistura, com um  $R^2$  de 0,86, afirmando que esses parâmetros são adequados na classificação dos materiais quanto à fadiga e convergem para uma mesma ordem de classificação. No entanto, a autora destaca que, além de os critérios considerarem apenas o comportamento a 19°C, não levam em conta a estrutura do pavimento em campo, que possui papel determinante na vida de fadiga das misturas. O critério  $a_f$  para ligantes

(tamanho da fissura na ruptura) utilizado pela autora também apresentou alta correlação com o  $FFM_{19^{\circ}C}$  ( $R^2 = 0,85$ ).

Nascimento (2015) avaliou se o modelo S-VECD (partindo do critério de falha  $G^R$ ) é capaz de prever a vida de fadiga de misturas brasileiras, quando submetidas ao ensaio de tração-compressão. Além disso, observou a relação entre a vida de fadiga dos ligantes pelo teste LAS, modelados pelo VECD, com os resultados das misturas asfálticas. O autor observou, com exceção de 1 ligante, que o FFL e o  $a_f$  possuem boa correlação com o FFM. Assim, como observa o autor, o ensaio LAS associado à teoria VECD, consegue prever satisfatoriamente o comportamento à fadiga de misturas asfálticas.

Almeida Jr. (2022) realizou a investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores, com foco na fadiga. O autor interpretou os resultados do ensaio de LAS pelas definições de falha do pico do C.N e pelo máximo  $C^2.N.(1-C)$ , realizando posteriormente a previsão da vida de fadiga pela equação de Wang et al. (2015). Essa previsão resultou em correlações com  $N/N_f$  das misturas acima de 0,84, mesmo para diferentes níveis de deformação (1,0%, 2,5% e 5%) e intervalos de FFL (1,0% a 2,5%, 2,5% a 5,0% e 1,0% a 5,0%). Portanto, o autor conclui que as formulações de cálculo utilizadas no trabalho podem ser eficazes para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor baseando-se no dano por fadiga.

### **2.3.2 Previsão do desempenho dos pavimentos: ATR e área trincada**

O desempenho dos pavimentos asfálticos resulta da combinação de uma série de fatores. Não é possível, na prática, controlar todos eles, uma vez que métodos de dimensionamentos sempre serão constituídos de previsões com erros associados. Assim, a otimização dos fatores influentes nesse comportamento gera uma maior vida útil para a rodovia.

A qualidade e a combinação dos materiais empregados é o fator chave na obtenção de um pavimento com características que atendam as especificações de órgãos rodoviários. Nesse sentido, torna-se razoável o estudo de parâmetros dos materiais constituintes das misturas asfálticas, visto que ensaios de laboratório buscam simular algumas variáveis de campo, e essa correlação com pavimentos reais se torna pertinente. Além disso, a observação direta de trechos em campo demanda anos de levantamentos, embora sejam necessários para a validação de índices e calibração de métodos de dimensionamento.

### 2.3.2.1 Deformação permanente: afundamento em trilha de roda

Os afundamentos observados nas trilhas de roda em campo podem ser decorrentes de diversos fatores, conforme descrito anteriormente, como falha na dosagem da mistura asfáltica, excesso de CAP, seleção inadequada do tipo de revestimento para as cargas solicitantes, deformação das camadas subjacentes, além de eventuais erros construtivos. Atualmente, no novo método de dimensionamento de pavimentos brasileiro, o MeDiNa, são delimitados alguns critérios de dimensionamento para deformação permanente, limitando o ATR a um determinado nível de confiança, a depender do tipo da via (Tabela 10). No entanto, cabe ressaltar que para contratos de concessão e manutenção de rodovias, os limites de ATR variam entre 5 e 12,5 mm, cabendo ao projetista adaptar-se ao exigido no contrato.

Tabela 10 - Limites de ATR segundo o Manual do MeDiNa

<b>Tipo de via</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Deformação permanente</b>
Sistema Arterial Principal	95%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	20 mm
Sistema Local	65%	20 mm

Fonte: Franco e Motta (2023).

As simulações realizadas em laboratório para avaliação da deformação permanente em materiais asfálticos busca abranger as principais variáveis que possuem influência nesse defeito. No entanto, não é possível captar toda a variabilidade existente em campo. Atualmente, diversos estudos buscam os melhores parâmetros capazes de prever o comportamento à deformação permanente em campo, buscando metodologias mais eficazes e menos dispendiosas.

Bukowski, Youtcheff e Harman (2011) utilizaram a instalação de simulação de carregamento acelerado da *Federal Highway Administration* (FHWA) para estudar diferentes seções de teste (com misturas contendo ligantes convencionais e modificados). O objetivo era avaliar a precisão dos parâmetros  $|G^*|/\text{sen}\phi$  do Superpave e Jnr do MSCR. O trabalho concluiu que o parâmetro  $|G^*|/\text{sen}\phi$  não é um bom indicador de deformação permanente, uma vez que a correlação com os valores de afundamento encontrados foi muito baixa ( $R^2=0,13$ ). Ainda, foi possível confirmar o potencial de previsão de desempenho do Jnr, com um  $R^2$  de

0,82. O ensaio também foi validado por D'Angelo (2009) em um estudo contendo ensaios de laboratório, instalações de carregamento acelerado e seções de rodovias. O autor ainda ressalta a capacidade dos índices do MSCR de salientarem as diferenças entre ligantes convencionais e modificados.

Pires (2020), como comentado na seção anterior, também avaliou a correlação de parâmetros de ligantes e misturas com o desempenho observado dos pavimentos em campo. Em pista, a deformação permanente foi avaliada pelo afundamento em trilha de roda. O autor encontrou boa correlação ( $R^2=0,6838$ ) entre o FN e o afundamento por solicitação de N em campo (ATR/Nacum 12meses). O autor conclui que o FN é um bom indicador de resistência à deformação permanente.

Além disso, observou que a relação  $|E^*|/\text{sen}\varphi$  54°C:1Hz das misturas forneceu melhor correlação com o comportamento em campo quando comparado ao FN ( $R^2=0,8635$ ). Quanto à observação dos ligantes, foram observadas correlações satisfatórias entre o  $|G^*|/\text{sen}\varphi$  65°C:1Hz ( $R^2 = 0,75$ ) e o parâmetro  $Jnr_{3,2}$  ( $R^2 = 0,72$ ) com o ATR/Nacum em 12 meses. Por fim, é importante destacar que o autor encontrou apenas correlação regular entre o ensaio de Hamburgo e o ATR/Nacum em 6 meses. No entanto, as correlações enfraquecem significativamente quando o pavimento é observado em 12 meses.

Kim et al. (2017) desenvolveram um modelo de potência para cálculo do afundamento em pavimentos, baseados em parâmetros que podem ser calculados a partir da coesão e do ângulo de atrito interno. Para previsão desses valores de coesão e atrito, foram propostas equações em termos de teor de ligante, agregados e propriedades volumétricas a partir de ensaios de laboratório e regressão linear múltipla. O modelo de deformação permanente considera o número de ciclos de aplicação do carregamento, resistência ao cisalhamento, temperatura e duração do carregamento. Os coeficientes foram determinados a partir da resistência à compressão triaxial e ensaio de deformação permanente sob carga repetida.

O modelo foi calibrado a partir de dados de afundamento de 26 seções de pavimentos, e validado utilizando o banco de dados de desempenho de pavimentos a longo prazo das rodovias nacionais coreanas. Os autores concluem, a partir da validação, que o modelo consegue estimar com precisão os ATRs sob carga repetida e diferentes condições ambientais, utilizando as variáveis citadas consideradas efetivamente influentes a um nível de 5% de significância. Mais detalhes da formulação completa em Kim et al. (2017).

### 2.3.2.2 Fadiga: área trincada

O trincamento por fadiga é um defeito comumente observado nas rodovias brasileiras. As trincas podem assumir diversas classificações, a depender da forma, comprimento e presença ou não de erosão. As fissuras, caso não reparadas no tempo correto, evoluem para erosões, ocorrendo o arrancamento do material. A falta de manutenção das rodovias permite a evolução dessa fissuração, que por si só diminui a rigidez global do material, além de permitir a entrada de água no pavimento. Assim, o incremento nas deflexões acelera ainda mais a degradação por fadiga de uma rodovia.

Nesse sentido, o MeDiNa estabelece como critério de parada de dimensionamento o valor de 30% de área trincada, independentemente do tipo da via, cabendo também ao projetista chegar a uma combinação de camadas e materiais de forma a obter uma otimização estrutural e econômica para o período de projeto estabelecido. No entanto, a caracterização dos materiais e a interpretação do fenômeno de fadiga ainda são complexas, existindo poucos trabalhos na literatura que correlacionam parâmetros de ligantes e misturas com a área trincada de um pavimento real, tendo em vista que o monitoramento de pavimentos é dispendioso e demorado.

Zhang et al. (2021) avaliaram a relação entre parâmetros de ligantes e misturas asfálticas com o trincamento em campo (térmico e por fadiga), a partir de 23 locais com uma seção de controle com mistura a quente e pelo menos uma seção com mistura morna em cada local, referentes ao projeto NCHRP 09-49A (*National Cooperative Highway Research Program*). Os ligantes foram ensaiados pela varredura de frequências e temperaturas no DSR e pelo ensaio de varredura de tensão-deformação monotônica. As misturas foram ensaiadas pelo módulo dinâmico e pelo ensaio de resistência à tração indireta (RT). Os autores encontraram boa correlação negativa entre o parâmetro  $T^*D$  (espessura da camada\*deformação de falha vertical do RT) e o comprimento da trinca por fadiga de campo, propondo um limite mínimo de 50 para esse parâmetro. Além disso, encontraram forte correlação negativa entre  $P_b\% * \epsilon_{b-low}$  (teor de ligante da mistura\*deformação de falha do ligante na varredura monotônica) e o comprimento da trinca térmica. Para esse parâmetro, que leva em consideração a propriedade do material e o projeto da mistura, os autores propõem um limite mínimo de 10.

Nascimento (2015) calibrou uma função de transferência por meio do modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado (S-VECD). O autor correlacionou o dano obtido em laboratório, utilizando o ensaio de fadiga à tração direta, e área trincada de pistas experimentais do “Projeto Fundação”. O projeto continha 113 pistas experimentais, das quais foram escolhidas 27 pistas para calibração da função (com estruturas e materiais diversos), de maneira a simular estruturas típicas do Brasil. Além disso, a validação do modelo foi realizada para 17 pistas experimentais da Rede Temática do Asfalto (no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e em São Paulo, além da Concessão CCR Nova Dutra).

A Equação 15 mostra a função de transferência obtida por Nascimento (2015). A equação utiliza o dano médio reduzido (Equação 16), calculado para uma porcentagem de área trincada de 10%. O dano médio reduzido ainda considera um fator de deslocamento (Função “S”), cuja variável é o tempo para atingir um dano de 35% (Equação 17). A Função “S” também pode ser escrita em função da taxa secante de dano médio entre o 12º e 1º mês (Equação 18). Mais detalhes da formulação e dos coeficientes de ajustes podem ser encontrados na tese do autor.

$$CA = C_1 \left( \frac{N}{N_f} red \right)^{C_2} \quad (15)$$

$$\frac{N}{N_f} red = \frac{N}{N_f} * Função "S" \quad (16)$$

$$S_{T_{0,35}} = A * T_{0,35} + B \quad (17)$$

$$S_{R_{12-1}} = \beta_1 (R_{12-1})^2 + \beta_2 (R_{12-1}) + \beta_3 \quad (18)$$

Onde:

CA = porcentagem de área trincada prevista;

N/N<sub>f</sub> red = dano médio reduzido;

C1 e C2 = coeficientes de regressão;

S<sub>T<sub>0,35</sub></sub> = Função “S” considerando T<sub>0,35</sub>;

T<sub>0,35</sub> = período em meses para atingir um dano de 35% nas simulações;

A e B = coeficientes de regressão;

S<sub>R<sub>12-1</sub></sub> = Função “S” considerando R<sub>12-1</sub>;

$R_{12-1}$  = taxa secante de dano médio entre os meses 12 e 1;

$\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  = coeficientes de regressão.

No entanto, a equação foi atualizada por Nascimento (2021), utilizando novos trechos monitorados pela Rede Tecnologia do Asfalto para calibração. A Equação (19) mostra a nova função de transferência, que utiliza diretamente o dano calculado pelo FlexPAVE™. A Equação (20) mostra o cálculo do erro padrão por essa abordagem.

$$AT(\%)_{prev,2021} = 4800 \left( \frac{N}{N_f} \right)^{6,64} \quad (19)$$

$$EP_{2021} = 24,219 \left( \frac{N}{N_f} \right)^2 + 0,8043 \left( \frac{N}{N_f} \right) - 0,1419 \quad (20)$$

Onde:

$AT(\%)_{prev}$  = área trincada prevista para 50% de confiabilidade;

$N/N_f$  = dano médio acumulado na camada.

Fritzen (2016) também calibrou uma função de transferência, atualmente utilizada no novo método de dimensionamento de pavimentos brasileiro (MeDiNa), com algumas adaptações. O autor avaliou 6 misturas asfálticas utilizadas em 45 trechos das principais vias da Cidade Universitária na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Os trechos também fizeram parte do “Projeto Fundação”. No entanto, essa calibração baseou-se em ensaios de fadiga por compressão diametral, sob tensão controlada e temperatura de 25°C. Fritzen (2016) validou o modelo para 13 segmentos experimentais da Rede Temática de Asfalto (Rio de Janeiro, São Paulo, Rio Grande do Sul e Ceará).

A função de transferência sofreu algumas modificações para aplicação no MeDiNa, e está representada na Equação 21. Por essa função, a evolução da área trincada se dá na forma de uma curva sigmoidal. A Equação 21 fornece, portanto, a melhor curva sigmoidal, ou seja, a que melhor descreveu a evolução da área trincada dos trechos monitorados, a qual utiliza as expressões para “A” (Equação 22) e “B” (Equação 23) (FRANCO; MOTTA, 2023).

Os valores de número N onde havia uma medida de área trincada foram multiplicados aleatoriamente por um fator de deslocamento (fS), até que se minimizasse o erro entre a evolução da área trincada observada e a curva sigmoidal padrão. O número N ajustado (N') é calculado pela Equação 24. Após os dados das seções do estudo de Fritzen (2016) serem

ajustados à curva sigmoide, obteve-se um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,82, com  $Z = 0,25$  e  $n = 5,0$ .

Da mesma forma realizada por Fritzen (2016), os fatores de deslocamento foram correlacionados com a resposta estrutural do pavimento, nesse caso, o dano médio por fadiga dos 110 pontos da malha de análise. No entanto, por simplificação, observou-se que a correlação com apenas 20 pontos (10 na superfície e 10 na fibra inferior da camada asfáltica) era satisfatória.

Assim, para cada período o dano médio é calculado para uma grade de 10 pontos na horizontal a partir do centro do carregamento considerando o eixo padrão (0 cm a 32,85 cm, na superfície e na parte inferior). O dano médio dos 20 pontos é calculado pela divisão de uma aplicação de carga do eixo padrão rodoviário pelo número admissível de aplicações de eixo de carga –  $N$  – conforme a Equação 25. Por fim, foi possível obter a transformação de dano em área trincada prevista definindo as constantes  $C1$  e  $C2$  com o processo de calibração, e a função deslocamento pode ser calculada pela Equação 26.

$$AT(\%)_{prevista} = \frac{e^{-A} * e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad (21)$$

$$A = \left( \frac{N' - 1}{Z - 1} \right)^n \quad (22)$$

$$B = \left( \frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (23)$$

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

$$D_{médio} = \frac{1}{20} \sum \left( \frac{1}{N} \right)_{t.c} \quad (25)$$

$$fS = C1 * (D_{médio})^{C2} \quad (26)$$

Onde:

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

$Z$  e  $n$  = parâmetros da curva sigmoide (0,25 e 5,0, respectivamente);

$N'$  = número equivalente deslocado;

$N$  = número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição de  $AT$ ;

$D_{\text{médio}}$  = dano médio calculado em uma malha de 20 pontos;

C1 e C2 = coeficientes de ajuste da função de deslocamento (1993,7 e 0,3737, respectivamente).

## 2.4 AVALIAÇÃO INTEGRADA DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS

Como discutido até aqui, caracterizar os materiais asfálticos permite a obtenção de propriedades que podem auxiliar tanto na fase de projeto de um pavimento, quanto no controle de qualidade da execução das misturas e do comportamento da rodovia ao longo de sua vida útil. No que se refere aos principais defeitos das vias (deformação permanente e fadiga), as metodologias atuais de escolha de materiais e concepção de misturas asfálticas (Superpave, por exemplo) preconizam testes e critérios especificados para aceitação e/ou classificação de ligantes e misturas. Nesse caso, ambos os defeitos são considerados separadamente, estabelecendo critérios de rigidez, danificação e propriedades volumétricas que devem ser atendidos para garantir um desempenho satisfatório em campo.

Considerando o protocolo do MeDiNa, por exemplo, a deformação permanente entra com um critério de aceitação da mistura asfáltica (pelo valor de *Flow Number*) e a fadiga é considerada por classes e cálculo de área trincada a partir do ensaio de fadiga por compressão diametral. No entanto, a consideração unificada desses dois defeitos vem ganhando força nos últimos anos, na busca de categorizar ligantes e misturas asfálticas de acordo com as respostas aos dois defeitos, e nortear a seleção de materiais e propriedades desejadas para o atendimento do projeto proposto.

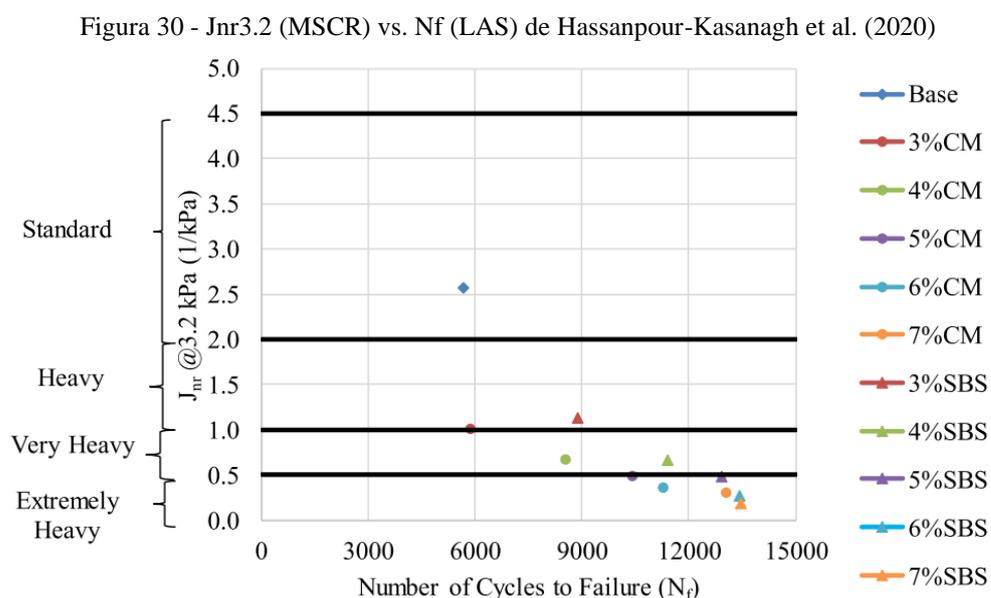
Uma vez que os ligantes asfálticos desempenham um papel significativo no comportamento das misturas, Hassanpour-Kasanagh et al. (2020) avaliaram a reologia de ligantes asfálticos modificados com material reciclado em diferentes teores (uma mistura de polietileno de alta densidade, monômeros de etileno propileno dieno e borracha de pneus moída), comparando os resultados com um ligante modificado por polímero SBS, que possui larga utilização na pavimentação atual. Destaca-se no trabalho dos autores a avaliação da danificação nesses materiais pelo ensaio de MSCR e LAS.

Os autores construíram o que chamaram de “diagrama de desempenho dos ligantes”, permitindo observar, simultaneamente, os comportamentos em altas temperaturas (Jnr3.2 a

64°C) e temperaturas intermediárias (Nf a uma deformação de 2,5%, obtido da curva de fadiga  $N_f = A(\gamma_p)^{-B}$  do VECD). A temperatura de 64°C no MSCR foi escolhida para efeitos de classificação porque era o PG do ligante base.

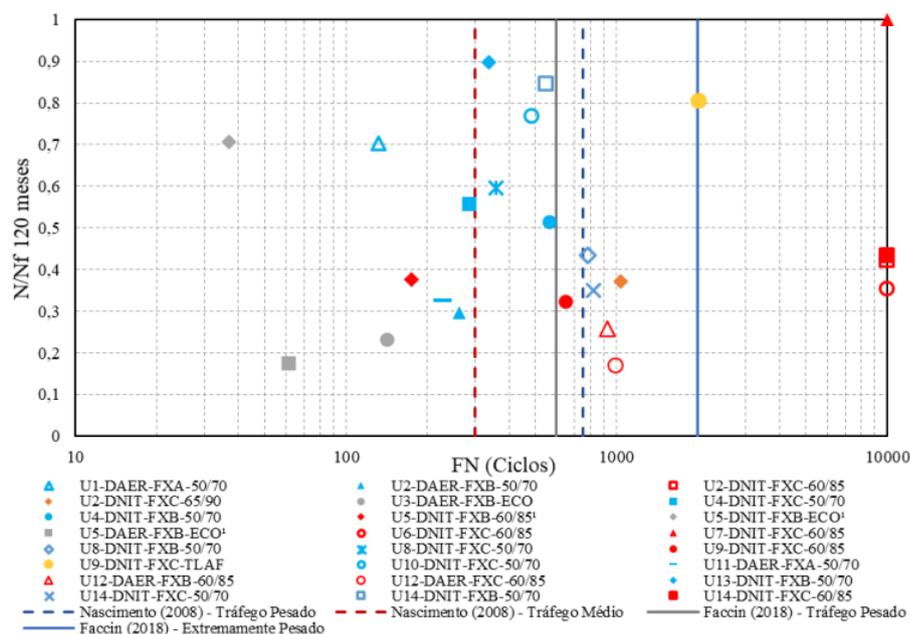
A Figura 30 mostra que, considerando um paralelo de mesmo teor entre material reciclado e SBS, a modificação dos ligantes com os resíduos utilizados praticamente não alterou o comportamento à deformação permanente, gerando a mesma classe de tráfego suportada pelas classes de Jnr3.2. Por outro lado, influenciaram negativamente na vida de fadiga, com menores números de ciclo até a falha. No gráfico é possível observar que maiores teores de modificação melhoram o comportamento à deformação permanente dos ligantes, assim como ocorre para a fadiga. No entanto, trabalhos como esse ainda são escassos, e a consideração conjunta dos defeitos nos ligantes asfálticos constitui uma lacuna de pesquisa.

No caso de misturas asfálticas, essa visão sistêmica é mais comum, embora também constitua ainda uma lacuna de pesquisa, especialmente no que se refere à proposição de classes de misturas que considerem os dois defeitos conjuntamente. Schuster (2018) realizou o cruzamento dos dados de N/Nf (120 meses) do FlexPAVE™ com os valores de FN de Faccin (2018) para as 24 misturas dos estudos, como pode ser observado na Figura 31. Como comentado em seção anterior, o autor sugere o uso do FN com caráter eliminatório, e o valor de dano com caráter classificatório. Destaca-se na figura a superioridade de misturas com AMP, especialmente para tráfegos mais pesados.



Fonte: Hassanpour-Kasanagh et al. (2020)

Figura 31 - Classificação global de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente de Schuster (2018)



Fonte: Schuster (2018).

Pensando em adequar o projeto de misturas asfálticas de maneira sistêmica, em 2015 o *Expert Task Group (ETG)* da *Federal Highway Administration (FHWA)* em “Misturas e Construção” formou um grupo de trabalho sobre o que foi denominado “*Balanced Mix Design*” (BMD) ou “Dosagem Balanceada de Misturas”, incluindo o termo “dosagem por desempenho” em suas premissas. A dosagem balanceada pode ser entendida como um projeto de misturas asfálticas que utiliza ensaios de desempenho em amostras condicionadas de maneira padrão, e que abordam vários modos de ruptura. Em resumo, a metodologia preconiza o uso de um ensaio de deformação permanente e outro de fadiga, para avaliar o quanto a mistura resiste aos defeitos mais comuns dos pavimentos asfálticos.

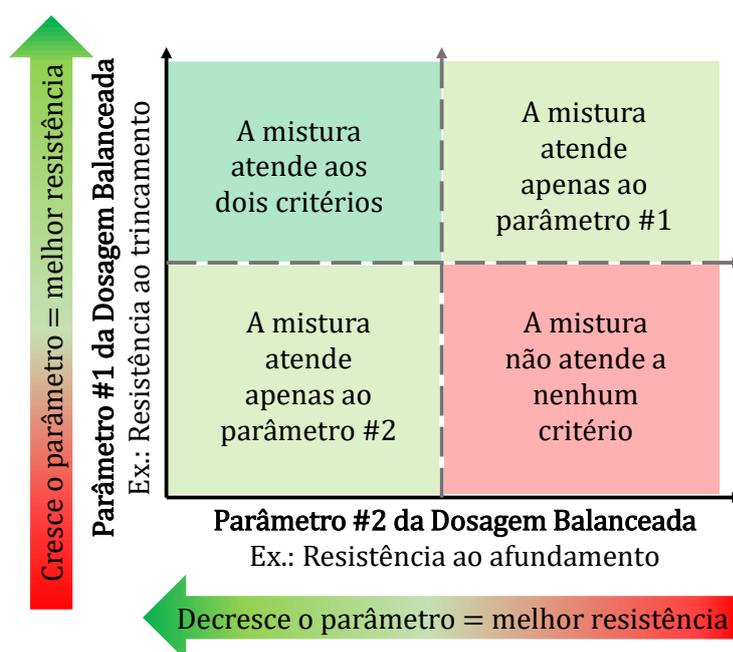
O desempenho da mistura asfáltica, nesse caso, é definido como a condição física de uma camada asfáltica dentro de uma estrutura de pavimento e a sua resposta às solicitações externas (tráfego e condições ambientais ao longo do tempo). Portanto, a dosagem balanceada preocupa-se principalmente com o desempenho da mistura asfáltica em si, não considerando todos os outros fatores que possam ter impacto no desempenho global do pavimento (como a estrutura e estado de suporte, drenagem, condições climáticas, etc.) (TRB, 2022).

Os ensaios utilizados são os mais diversos, e vêm sendo selecionados desde que possuam relação com o desempenho da mistura em campo. Essa adoção deve partir de seções

de pavimentos experimentais com condições controladas de tráfego e clima, de forma que a relação laboratório-campo possa ser observada com clareza e os critérios de aceitação desenvolvidos sejam mais confiáveis. Um dos objetivos da execução desses ensaios mecânicos é a construção de um diagrama de desempenho para as misturas, conforme a Figura 32. Nesse sentido, é possível avaliar se a mistura projetada atende aos critérios estabelecidos para os dois defeitos.

A dosagem balanceada trabalha com 4 abordagens diferentes. Na primeira abordagem, a dosagem balanceada desempenha apenas um papel de verificação do material. A dosagem é realizada por métodos tradicionais (Superpave ou Marshall, por exemplo), e a verificação pelos critérios da dosagem balanceada é realizada no teor de ligante estabelecido pela dosagem inicial. Na segunda abordagem, a dosagem balanceada é utilizada na otimização do teor de ligante. Inicialmente a mistura é dosada pelas abordagens tradicionais, e são testadas misturas em teores adicionais ao teor inicial de projeto, para que seja encontrado um teor final que atenda aos critérios da dosagem balanceada. Nessas duas primeiras abordagens, caso os critérios da dosagem balanceada não sejam atendidos, toda a mistura é refeita para fazê-lo, de modo que as propriedades volumétricas se mantenham nos limites das especificações tradicionais.

Figura 32 - Conceito de diagrama de desempenho de misturas pela dosagem balanceada



Fonte: Adaptado de TRB (2022).

Na terceira abordagem, a dosagem também é realizada inicialmente por metodologias convencionais, mas a dosagem balanceada é utilizada para modificar não só o teor de ligante, como também os materiais utilizados ou propriedades volumétricas, mesmo que algum parâmetro fique fora das especificações tradicionais. Por fim, a quarta abordagem não leva em consideração as metodologias de dosagem tradicionais. Os resultados de ensaios mecânicos da metodologia de dosagem balanceada ditam as propriedades da mistura, cabendo aos órgãos regulamentadores apenas o estabelecimento de critérios mínimos de aceitação para a qualidade dos ligantes e agregados.

É importante destacar, como menciona o *Transportation Research Board* (TRB, 2022), que parâmetros empíricos podem ser usados em correlações com o desempenho das misturas, mas não podem ser utilizados em modelos mecânicos de previsão desse desempenho. Isso ocorre pois variam com a forma em que são medidos, não sendo uma propriedade fundamental do material. Exemplos de índices empíricos são o Índice de Flexibilidade (*Flexibility Index* – FI) do ensaio de Índice de Flexibilidade de Illinois (AASHTO T 393-21) e o afundamento do ensaio de Hamburgo.

Já as propriedades fundamentais são aquelas que medem a resposta do material (tensões e deformações) às solicitações impostas (carga, deformação imposta, condições ambientais). Essas análises podem ser combinadas com modelos mecanicistas para prever o desempenho de misturas asfálticas em diferentes cenários de tráfego, clima e estruturas. Exemplos de propriedades fundamentais são o *creep compliance* do ensaio de tração indireta (AASHTO T 322-07 (2020)) e o módulo dinâmico. Os ensaios mais simples (chamados de “ensaios de substituição”) são indicados apenas para aceitação da produção das misturas, sendo necessário que se encontrem boas correlações com os ensaios mais robustos.

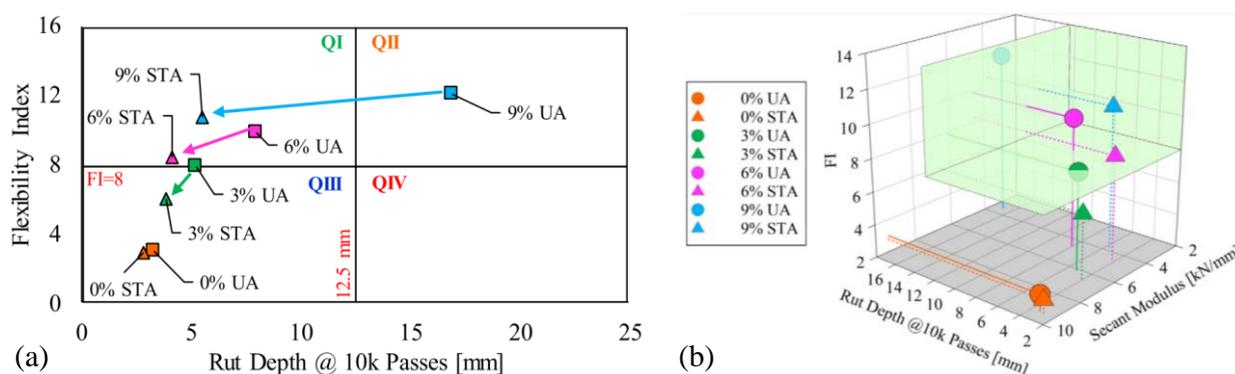
Um exemplo de uso do conceito de dosagem balanceada pode ser encontrado na pesquisa de Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer (2018). Os autores usaram a metodologia para encontrar o teor ótimo de agente rejuvenescedor que aumentasse a durabilidade do concreto asfáltico, para diferentes condições de envelhecimento (UA – sem envelhecimento e STA – com envelhecimento de curto prazo). A observação dos dados foi realizada em um diagrama 2D (com o Índice de Flexibilidade e o afundamento do Hamburgo) (Figura 33a) e 3D (incluindo o módulo secante aos dois primeiros parâmetros) (Figura 33b).

Os quadrantes no diagrama 2D foram definidos como: QI. Rígido e flexível (boa resistência à fadiga e à deformação permanente); QII. “mole” e flexível (resistência suficiente

à fadiga e maior potencial para sofrer deformação permanente); QIII. Rígido e frágil (baixa resistência à fadiga e alta resistência à deformação permanente); e QIV. “mole” e instável (resistência muito baixa aos dois defeitos). No diagrama 3D o volume em verde é a mais desejada. Assim, foi possível observar os melhores teores de AR, que, nesse caso, foi de 6% para as duas condições de envelhecimento e 9% para a mistura envelhecida à curto prazo.

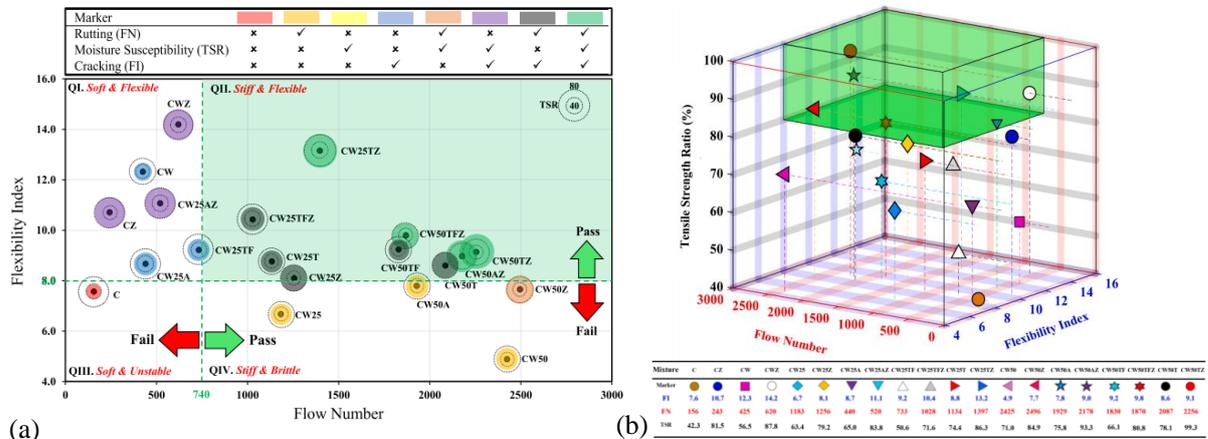
Em uma análise semelhante, o estudo de Yousefi et al. (2023) avaliou o efeito do uso de agentes rejuvenescedores e melhoradores de adesividade (agente *anti-stripping*) sobre as propriedades mecânicas de uma mistura morna com diferentes teores de RAP. A dosagem foi realizada por um critério de aceitação baseado no ensaio de dano por umidade induzida. Uma vez que o objetivo desta pesquisa não é avaliar esses efeitos, os diagramas construídos no estudo são mostrados na Figura 34 apenas para evidenciar que, assim como mencionam os próprios autores, a utilização dos Diagramas de Interação de Desempenho (*Performance Interaction Diagrams - PIDs*) podem ser muito efetivos na observação do efeito de diferentes variáveis, nesse caso, o teor de RAP, o aditivo utilizado nas misturas mornas, o melhorador de adesividade e os três diferentes agentes rejuvenescedores da pesquisa. Os índices utilizados foram a Razão de Resistência à Tração (dano por umidade), o Índice de Flexibilidade (fadiga) e o *Flow Number* (deformação permanente).

Figura 33 - Diagrama (a) 2D e (b) 3D para otimização do teor de agente rejuvenescedor de Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer (2018)



Fonte: Adaptado de Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer (2018).

Figura 34 - Diagramas de Interação de Desempenho de Yousefi et al. (2023)

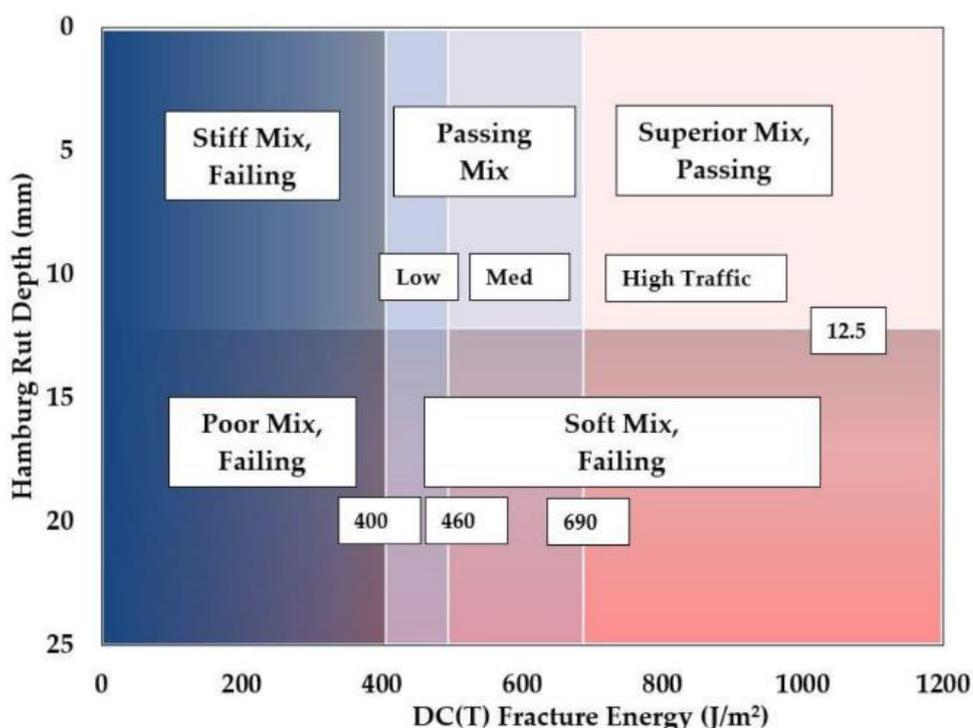


Fonte: Adaptado de Yousefi et al. (2023).

Seguindo essa mesma linha de análise, Buttlar et al. (2017) introduziram o conceito do diagrama “*Performance-Space*”, para auxiliar na dosagem balanceada ou simplesmente para avaliar diferentes materiais por meio de uma visão holística, em contrapartida à visão fragmentada que se tinha até então. Os autores indicam a construção de um gráfico que contenha uma característica em baixa temperatura e outra em alta temperatura, sugerindo ainda a utilização da energia de fratura do ensaio em disco circular com fenda (*disk-shaped compact tension – DC(T)*) e o afundamento medido no ensaio de Hamburgo. Assim, a Figura 33 mostra o diagrama de desempenho denominado pelos autores de gráfico “Hamburg-DC(T)”.

Os resultados do ensaio de Hamburgo são apresentados em escala aritmética inversa do eixo Y, e os resultados de DC(T) são apresentados no eixo X, em escala aritmética e ordem padrão. Dessa forma, é possível identificar regiões de comportamento que auxiliam na avaliação e seleção dos materiais. A parte superior esquerda abrange as misturas com boa resistência ao afundamento e baixa energia de fratura; a parte inferior esquerda, as misturas não recomendadas para nenhum dos critérios; a parte inferior direita, as misturas com boa energia de fratura, mas baixa resistência ao afundamento; e, por fim, a parte superior direita, as misturas ideais frente aos dois ensaios.

Figura 35 - Gráfico “Hamburg-DC(T)” de Buttlar et al. (2017)



Fonte: Buttlar et al. (2017).

Os autores comentam que esse tipo de gráfico pode ser utilizado para o projeto, avaliação e investigação forense de misturas asfálticas. Além disso, permitem ter uma ideia nas mudanças de desempenho com a variação das características dos materiais. Essa abordagem vem sendo utilizada também por outros pesquisadores (COOPER et al., 2014; KIM et al., 2018; MAJIDIFARD et al., 2021; RATH et al., 2019; WANG et al., 2019; ZHOU et al., 2011; ZHOU; HU; SCULLION, 2012). Como exemplo, pode-se mencionar que os estudos de Buttlar et al. (2017) e Rath et al. (2019) evidenciaram a possibilidade de utilizar um teor mais elevado de material reciclado em misturas asfálticas, desde que utilizado um ligante menos rígido, observando a posição do material no diagrama de desempenho.

Por fim, fica evidente que a consideração conjunta de índices que representam os defeitos dos pavimentos é a forma mais assertiva de se projetar uma mistura asfáltica ou avaliar efeitos de uma ampla gama de variáveis no seu comportamento. No entanto, o tema ainda precisa de avanços para efetivamente chegar a uma classificação unificada de materiais, especialmente no que se refere aos ligantes asfálticos.

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Nesta seção estão apresentados os procedimentos metodológicos necessários ao desenvolvimento deste trabalho. A seção inicia com o planejamento da pesquisa, de forma a facilitar o entendimento do leitor sobre o desenvolvimento do trabalho. Em seguida, foram descritos os trabalhos do GEPPASV que compuseram o banco de dados.

O seguinte item aborda a caracterização de novos materiais para inserção no banco de dados, seguindo da análise mecânica de pavimentos por duas metodologias distintas.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A partir desta seção, o desenvolvimento da pesquisa ficou estruturado em 5 grandes tópicos (Figura 36). Inicialmente foi realizado o levantamento dos trabalhos realizados no GEPPASV, que compuseram o banco de dados, e essas informações estão apresentadas na seção 3.2. Foram elencados os tipos de pesquisas, bem como o número de misturas asfálticas estudadas.

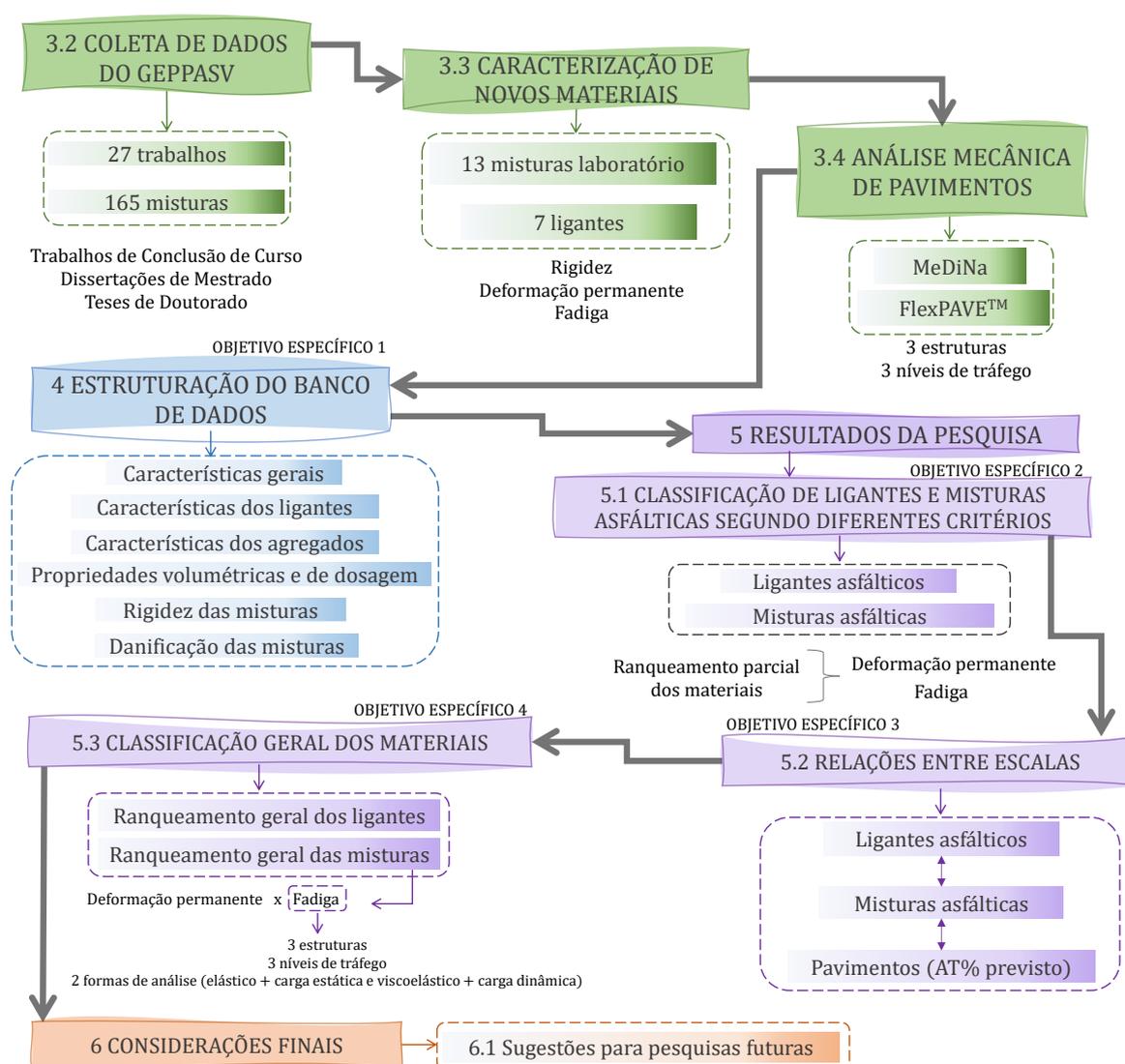
Para complementar o banco de dados, foram caracterizados novos materiais pela autora, conforme apresentado no item 3.3. A caracterização foi dividida em rigidez, deformação permanente e fadiga, sendo que cada tópico ainda está dividido em ligantes asfálticos e misturas asfálticas. Foram mostrados os procedimentos de ensaio e análise realizados, bem como os resultados encontrados. Uma vez que o objetivo deste trabalho não é a caracterização desses materiais, e sim a avaliação e classificação dos materiais asfálticos quanto ao seu desempenho, os resultados dos novos materiais não foram discutidos.

Para a obtenção de dados de fadiga associados à estrutura de um pavimento, os novos materiais foram simulados em dois softwares distintos, conforme está explicado no tópico 3.4, que discorre sobre como foram realizadas as simulações de pavimentos para os novos materiais desta pesquisa. Como será mostrado mais adiante, todas as demais misturas do banco de dados que permitiram tais análises também foram simuladas nas mesmas estruturas.

A construção do banco de dados do GEPPASV necessitou de algumas premissas para selecionar os trabalhos e as propriedades a serem inseridas. Essas considerações estão discutidas no capítulo 4. Foram elencadas as informações retiradas das pesquisas, a quantidade de cada tipo de dado e algumas singularidades adotadas nessa estruturação.

Com todos os dados reunidos, o passo seguinte da pesquisa foi realizar as análises, e os resultados estão apresentados no capítulo 5. Para atender aos objetivos específicos 2, 3 e 4, foram realizadas algumas investigações: primeiro, a classificação de ligantes e misturas asfálticas segundo diferentes critérios (apresentado no item 5.1); em seguida, foram estudadas as relações entre escalas (apresentado no item 5.2); e por último foi realizada a classificação geral dos materiais considerando conjuntamente a deformação permanente e a fadiga (apresentado no item 5.3). Com base nos resultados encontrados, foram elencadas algumas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros, que constam no capítulo 6.

Figura 36 - Planejamento da pesquisa



Fonte: Autora.

### 3.2 PESQUISAS DO GRUPO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM PAVIMENTAÇÃO E SEGURANÇA VIÁRIA (GEPPASV)

O GEPPASV atua desde 2010 no âmbito das pesquisas da Universidade Federal de Santa Maria. Desde então, foram desenvolvidas uma série de pesquisas que contribuíram para o entendimento de materiais para pavimentação, além de participar com trechos experimentais do desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos brasileiro (MeDiNa).

O banco de dados contará somente com as pesquisas do GEPPASV, uma vez que o grupo conta com uma vasta quantidade de dados provenientes de Trabalhos de Conclusão de Curso, Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado. Além disso, as práticas do grupo seguem o mesmo padrão de execução de ensaios, gerando maior homogeneidade na qualidade dos dados adquiridos. Estudos futuros poderão contar com dados externos, como forma de abranger uma classificação nacional de materiais asfálticos, por exemplo. Para esta pesquisa, foram levantados 27 trabalhos que contavam com a caracterização de misturas diversas, desde misturas de laboratório com diferentes ligantes, misturas usinadas e com materiais reciclado. Assim, o banco de dados contará com 165 diferentes misturas, ou 180 se somadas as misturas novas da autora.

É importante destacar que se teve o cuidado de separar realmente misturas diferentes entre os trabalhos, sem repetição, uma vez que existem trabalhos que realizaram diferentes tipos de caracterização para os mesmos materiais. Além disso, buscou-se extrair o maior número de informações possível dentro das análises realizadas por cada autor.

A Tabela 11 mostra a relação de autores, nomenclatura das misturas e dados que serão extraídos de cada trabalho, para composição do banco de dados. A nomenclatura das misturas seguiu o padrão dos autores, seguidas da referência. Quando os mesmos materiais eram estudados por mais de 1 autor, a referência da mistura segue com o nome e data do primeiro trabalho realizado, seguido da expressão “e outros”. A essa observação apenas se distingue os trabalhos de Pires (2020) e Schuster (2023), uma vez que a dissertação de Pires fez parte de um estudo mais amplo e completo com as mesmas misturas de Schuster. O mesmo ocorre com Almeida Jr. (2016) e Boeira (2018).

Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos

(continua)		
Autor	Nomenclatura da mistura	Dados de caracterização obtidos do trabalho
Boeira (2014)	Mat. Bagé (REF.) (Boeira, 2014)	Caracterização tradicional de ligantes
	Mat. Bagé (DOL.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Bagé (CALC.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Caçapava do Sul (REF.) (Boeira, 2014)	Caracterização dos agregados
	Mat. Caçapava do Sul (DOL.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Caçapava do Sul (CALC.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Sto. Ant. da Patr.(REF.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Sto. Ant. da Patr. (DOL.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Sto. Ant. da Patr. (CALC.) (Boeira, 2014)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	Mat. Sarandi (REF.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Sarandi (DOL.) (Boeira, 2014)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência)
	Mat. Sarandi (CALC.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Eldorado do Sul (REF.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Eldorado do Sul (DOL.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Eldorado do Sul (CALC.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Itaara (REF.) (Boeira, 2014)	
	Mat. Itaara (DOL.) (Boeira, 2014)	
Mat. Itaara (CALC.) (Boeira, 2014)		
Mat. Coronel Barros (REF) (Boeira, 2014)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , dano por umidade induzida)	
Mat. Coronel Barros (DOL 1%) (Boeira, 2014)		
Mat. Coronel Barros (DOL 2%) (Boeira, 2014)		
Mat. Coronel Barros (CALC 1%) (Boeira, 2014)		
Mat. Coronel Barros (CALC 2%) (Boeira, 2014)		
Bruxel (2015)	50/70 (Bruxel, 2015)	Caracterização tradicional e de rigidez de ligantes (PG <sub>H</sub> )
	TLA (Bruxel, 2015)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	60/85 (Bruxel, 2015)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	TLA Flex (Bruxel, 2015)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral)
Rossato (2015) <sup>1</sup> , Santos (2015), Bueno (2019)	CA <sub>CAMPO</sub> (Rossato e outros, 2015)	Caracterização tradicional de ligantes
	CA <sub>LAB 50/70</sub> (Rossato e outros, 2015)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	CA <sub>LAB 60/85-E</sub> (Rossato e outros, 2015)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
Santos (2015), Bueno (2019), Custódio (2022) <sup>2, 3, 4</sup>	UFSM 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga por compressão diametral, fadiga uniaxial à tração-compressão)
	UFSM 3 - 50/70 12,5 mm (a) (Santos e outros, 2015)	Caracterização tradicional de ligantes, e de rigidez (índices Superpave e PG <sub>H</sub> )
	UFSM 3 - 50/70 12,5 mm (b) (Santos e outros, 2015)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
		Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
		Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga por compressão diametral, fadiga uniaxial à tração-compressão)

Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos

(continuação)		
<b>Autor</b>	<b>Nomenclatura da mistura</b>	<b>Dados de caracterização obtidos do trabalho</b>
Centofante (2016)	Mistura referência (Centofante, 2016)	Caracterização tradicional de ligantes
	Mistura 10% (Centofante, 2016)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	Mistura 20% (Centofante, 2016)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	Mistura 30% (Centofante, 2016)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , dano por umidade induzida)
Schuster, (2016), Brondani, (2016), Vieira (2018)	0% Areia (Schuster e outros, 2016)	Caracterização tradicional de ligantes
	2% Areia (Schuster e outros, 2016)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	4% Areia (Schuster e outros, 2016)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	6% Areia (Schuster e outros, 2016)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão)
Barboza Junior (2018)	BS 50/70 (Barboza Jr., 2018)	Caracterização tradicional de ligantes
	GS 50/70 (Barboza Jr., 2018)	Caracterização dos agregados
	BC 50/70 (Barboza Jr., 2018)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	GC 50/70 (Barboza Jr., 2018)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	BS 60/85 (Barboza Jr., 2018)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , dano por umidade induzida)
	GS 60/85 (Barboza Jr., 2018)	
	BC 60/85 (Barboza Jr., 2018)	
GC 60/85 (Barboza Jr., 2018)		
Boeira (2018), Almeida Júnior (2016)	M BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	Caracterização tradicional de ligantes
	M CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	M BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	M CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	S BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	Rigidez de ligantes (índices no domínio LVE, PG <sub>H</sub> )
	S CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	S BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	S CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	
	M BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	M CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	M BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	M CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	S BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	S CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	S BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	S CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	
	M BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão)
	M CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	
	M BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	
	M CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	
S BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)		
S CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)		
S BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)		
S CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)		

Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos

(continuação)		
Faccin (2018), Schuster (2018), Brondani (2019), Nascimento (2023) <sup>5</sup>	U1-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	Caracterização tradicional de ligantes
	U2-DAER-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	
	U2-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	Rigidez de ligantes (módulo de cisalhamento dinâmico, PG <sub>H</sub> )
	U2-DNIT-FXC-65/90 (Faccin e outros, 2018)	
	U3-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	Danificação de ligantes (MSCR, LAS)
	U4-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	
	U4-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	Caracterização dos agregados
	U5-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	
	U5-DNIT-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	
	U5-DNIT-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	U6-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	
	U7-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	
	U8-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	
	U8-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	U9-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	
	U9-DNIT-FXC-TLAF (Faccin e outros, 2018)	
U10-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão, dano por umidade induzida)	
U11-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)		
U12-DAER-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)		
U12-DAER-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)		
U13-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)		
U14-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)		
U14-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	ATR em campo	
U14-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)		
Luzzi (2019)	M0 (Luzzi, 2019)	Caracterização tradicional de ligantes
	M10 (Luzzi, 2019)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	M20 (Luzzi, 2019)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	M30 (Luzzi, 2019)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão, dano por umidade induzida)
Oliveira (2019)	AMP 60/85 (Oliveira, 2019)	Caracterização tradicional de ligantes
	ECOFLEX B-3G (Oliveira, 2019)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
Vestena (2019)	RAP A 100°C (Vestena, 2019)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	RAP A 140°C (Vestena, 2019)	
	RAP A 170°C (Vestena, 2019)	
	RAP B 100°C (Vestena, 2019)	Caracterização dos agregados
	RAP B 140°C (Vestena, 2019)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	RAP B 170°C (Vestena, 2019)	
	REF (RAP A 140°C) (Vestena, 2019)	
	REF (RAP A 170°C) (Vestena, 2019)	Rigidez das misturas (módulo complexo)
	REF (RAP B 140/170°C) (Vestena, 2019)	
	REF (RAP B 100°C) (Vestena, 2019)	Danificação de misturas (fadiga uniaxial à tração-compressão)

Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos

		(continuação)
Bordin (2020), Custódio (2022)	V509 M1 (Bordin e outros, 2020)	Propriedades volumétricas das misturas
	V509 M2 (Bordin e outros, 2020)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	V509 M6 (Bordin e outros, 2020)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão e por compressão diametral)
Correa (2020)	REF 50/70 (Correa, 2020)	Caracterização química de ligantes
	10 RAP 50/70 (Correa, 2020)	Rigidez de ligantes (PG <sub>H</sub> )
	20 RAP 50/70 (Correa, 2020)	Caracterização dos agregados
	30 RAP 50/70 (Correa, 2020)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	REF 60/85 (Correa, 2020)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	10 RAP 60/85 (Correa, 2020) 20 RAP 60/85 (Correa, 2020) 30 RAP 60/85 (Correa, 2020)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão)
Possebon (2021)	50/70 - A (Possebon, 2021)	Caracterização química de ligantes
	50/70 - B (Possebon, 2021)	Caracterização tradicional de ligantes
	50/70 - C (Possebon, 2021)	Reologia de ligantes (módulo de cisalhamento dinâmico, PG <sub>H</sub> )
	50/70 - D (Possebon, 2021)	Danificação de ligantes (MSCR, LAS)
	50/70 - E (Possebon, 2021)	Caracterização dos agregados
	50/70 - F (Possebon, 2021)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	50/70 - G (Possebon, 2021)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	50/70 - H (Possebon, 2021)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , Hamburgo, fadiga uniaxial à tração-compressão)
	50/70 - I (Possebon, 2021)	
	30/45 (Possebon, 2021) 60/85E (Possebon, 2021) AR (Possebon, 2021)	
Vestena (2021)	CONV (Vestena, 2021)	Caracterização tradicional de ligantes
	CONV - cap extraído (Vestena, 2021)	Reologia de ligantes (módulo de cisalhamento dinâmico, PG <sub>H</sub> ), danificação de ligantes (MSCR, LAS)
	TLAF (Vestena, 2021)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	HIMA (Vestena, 2021)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	SBS (Vestena, 2021)	Danificação de misturas (resistência à tração por compressão diametral, <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão e por compressão diametral)
Ilha (2022) <sup>6</sup>	CONV lab (Ilha, 2022)	Caracterização tradicional de ligantes
	TLAF lab (Ilha, 2022)	Caracterização dos agregados, propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	HIMA lab (Ilha, 2022)	Rigidez das misturas (módulo de resiliência, módulo complexo)
	SBS lab (Ilha, 2022)	Danificação de misturas ( <i>Flow Number</i> , fadiga por compressão diametral)

Tabela 11 - Relação de autores do GEPPASV: nomenclatura das misturas e dados obtidos dos trabalhos

		(conclusão)
Almeida Júnior (2022)	Neat RAP (Almeida Jr., 2022)	Caracterização tradicional de ligantes
	Neat RAP + 8%R (Almeida Jr., 2022)	Reologia de ligantes (módulo de cisalhamento dinâmico, PGH)
	Neat RAP + 12%R (Almeida Jr., 2022)	
	Neat RAP + 16%R (Almeida Jr., 2022)	
	Neat RAP + 8%R + 1%HiMA (Almeida Jr., 2022)	Danificação de ligantes (MSCR, LAS)
	Neat REF (Almeida Jr., 2022)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	SBS RAP (Almeida Jr., 2022)	
	SBS RAP + 8%R (Almeida Jr., 2022)	Rigidez das misturas (módulo complexo)
	SBS RAP + 12%R (Almeida Jr., 2022)	
	SBS RAP + 16%R (Almeida Jr., 2022)	
SBS RAP + 8%R + 1%HiMA (Almeida Jr., 2022)	Danificação de misturas ( <i>Flow Number</i> , fadiga uniaxial à tração-compressão)	
SBS REF (Almeida Jr., 2022)		
Schuster (2023), Pires (2020) <sup>7</sup>	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	Caracterização tradicional de ligantes
	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	Rigidez de ligantes (índices no domínio LVE, PGH)
	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	Danificação de ligantes (MSCR, LAS)
	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	Caracterização dos agregados
	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	Propriedades volumétricas e de dosagem das misturas
	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	Rigidez das misturas (módulo complexo)
	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	Danificação de misturas ( <i>Flow Number</i> , Hamburgo, fadiga uniaxial à tração-compressão)
	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	ATR em campo

Fonte: Autora.

Notas:

<sup>1</sup> Foram obtidos os dados apenas dos ensaios realizados nas temperaturas preconizadas pelas normas do DNIT<sup>2</sup> A mistura denominada por Bueno (2019) como UFSM 2 - 50/70 12,5 mm foi caracterizada por Rossato (2015) e, portanto, será mencionada no respectivo trabalho, no qual é denominada CA<sub>CAMPO</sub><sup>3</sup> A mistura UFSM 4 - AB 12,5 mm foi caracterizada por Faccin (2018) e Schuster (2018), sendo trazida, portanto, nos materiais dos respectivos autores<sup>4</sup> As misturas que estão referenciadas à Santos (2015), Bueno (2019) e Custódio (2022) foram caracterizadas quanto à rigidez e à fadiga pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES - Rio de Janeiro/RJ), referenciadas no trabalho de Nascimento (2015)<sup>5</sup> Os ligantes asfálticos caracterizados por Nascimento (2023) são extraídos das misturas de campo, após serem aplicadas e compactadas em pista<sup>6</sup> O autor reproduziu em laboratório as misturas usinadas que foram coletadas para o estudo de Vestena (2021)<sup>7</sup> Uma vez que o trabalho de Pires fez parte de uma pesquisa mais ampla, a referência se dará pelo trabalho de Schuster (2023)

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS PARA INSERÇÃO NO BANCO DE DADOS

Esta seção destina-se à descrição da caracterização de novos materiais para inserção no banco de dados. A seção conta com a descrição dos materiais utilizados, bem como a descrição dos ensaios e resultados obtidos. A caracterização está dividida entre rigidez, deformação permanente e fadiga, de ligantes e misturas asfálticas.

### 3.3.1 Materiais utilizados

Para documentação das propriedades das novas misturas de maneira mais organizada, este tópico divide-se entre dois diferentes conjuntos de misturas.

#### 3.3.1.1 Primeiro conjunto de novas misturas

A misturas, que foram produzidas em laboratório, estão separadas em dois conjuntos. O primeiro conjunto contempla 5 misturas asfálticas com mesma granulometria e 5 ligantes diferentes. As misturas foram dosadas e moldadas utilizando a metodologia de dosagem Marshall (ABNT NBR 15785/2010). Os CPs foram compactados no Compactador Giratório, após as misturas serem submetidas a um tempo de 1 a 2 horas de condicionamento na temperatura de compactação.

Os agregados são basaltos provenientes de Jardinópolis/SP, sendo ainda utilizada a cal CH-I. As características dos agregados contidas no laudo fornecido pela empresa estão apresentadas na Tabela 12. A tabela também mostra o resultado geral de adesividade dos ligantes, uma vez que todos apresentaram resultados satisfatórios.

Todas as misturas possuem a mesma granulometria, enquadradas na Faixa III da especificação DERSA ET-P 00/027 (2005), conforme a Tabela 13. A Figura 37 traz o enquadramento da mistura nos limites da Faixa III da referida norma, juntamente com a faixa de trabalho. A cal foi adicionada em 1,5% e o tamanho máximo nominal do agregado é 12,5 mm.

Para esta pesquisa, foi retirada a nomenclatura comercial dos ligantes. Os CAPs utilizados são: 3 CAPs convencionais, sendo 2 ligantes 30/45 (denominados de 30/45 A e 30/45 B); e um CAP 50/70 manipulado pela empresa para um ponto de amolecimento alvo de 85°C (aqui denominado 50/70 PA 85); e dois CAPs modificados por polímero 60/85E (AMP 60/85E A e AMP 60/85E B). Dessa forma, a misturas de laboratório deste trabalho foram denominadas segundo sua granulometria, seguidas pelo tipo de ligante, por exemplo, “DERSA – FX III – 30/45 A”. A Tabela 14 mostra as propriedades dos ligantes e a Tabela 15 as propriedades de dosagem, resistência à tração por compressão diametral (RT) e o resultado do ensaio de dano por umidade induzida, pela razão de resistência à tração (RRT).

Uma vez que os agregados são os mesmos, bem como a faixa granulométrica, as diferenças encontradas estarão principalmente relacionadas às características dos ligantes.

Tabela 12 - Características dos agregados utilizados no primeiro conjunto de novas misturas

Agregado	%	Densidade - ASTM C 127, ASTM C-128		
		Seca (Gsa)	Saturada (Gsb)	Efetiva (Gse)
Brita 1 (Basalto)	20,5	2,945	2,911	2,928
Pedrisco (Basalto)	20	2,943	2,876	2,910
Areia artificial (Basalto)	45	2,951	2,860	2,906
Pó de pedra (Basalto)	13	2,947	2,854	2,901
Cal CH-I	1,5	2,435	2,435	2,435
<b>Equivalente de Areia (DNER ME 054/97)</b>				
<b>Especificação</b>		<b>Agregado</b>		<b>Resultado</b>
mínimo 55%		Pó de pedra (Basalto)		70,6%
<b>Adesividade do Agregado Graúdo (ABNT NBR 14329)</b>				
<b>Especificação</b>		<b>Ligante</b>		<b>Resultado</b>
90% de cobertura do ag.		TODOS		Satisfatória
<b>Desgaste por Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98)</b>				
<b>Especificação</b>		<b>Graduação</b>		<b>Resultado</b>
máximo 40%		B		16,2%
<b>Absorção de Água - ASTM C-127, ASTM C-128 e ASTM C1252</b>				
<b>Agregado</b>	Brita 1 (Basalto)	Pedrisco (Basalto)	Areia artificial (Basalto)	Pó de pedra (Basalto)
<b>Resultado</b>	0,40%	0,79%	1,08%	1,11%
<b>Ensaio Índice de Forma ASTM D-4791 / 95 (3:1)</b>				
<b>Especificação</b>		<b>Agregado</b>		<b>Resultado</b>
máx. 25		Graúdo		17,00
<b>Durabilidade pelo emprego de Solução de Sulfato de Sódio (DNER ME 089/94)</b>				
<b>Especificação</b>		<b>Agregado</b>		<b>Resultado</b>
< 12%		Graúdo		1,09%
< 12%		Miúdo		2,87%

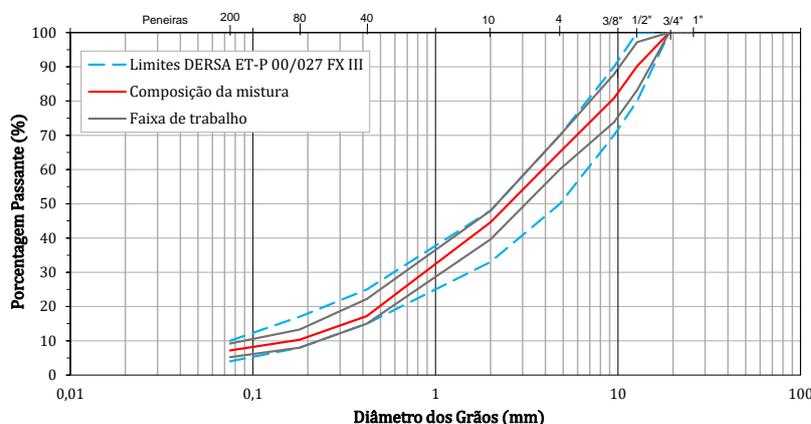
Fonte: Adaptado do laudo das misturas (2022).

Tabela 13 - Granulometria dos materiais individuais, granulometria final da mistura, faixa III e faixa de trabalho da especificação DERSA ET-P 00/027 (2005) do primeiro conjunto de novas misturas

Peneiras	Brita 1	Pedrisco	Areia Artificial	Pó de Pedra	Cal CH-I	Mistura	Faixa	Faixa Trab.
1"	100	100	100	100	100	100	100 - 100	100 - 100
3/4"	100	100	100	100	100	100	100 - 100	100 - 100
1/2"	52,3	100	100	100	100	90,2	80 - 100	83,2 - 97,2
3/8"	13,2	93,2	100	100	100	80,8	70 - 90	73,8 - 87,8
Nº4	1,5	30,4	98,2	99,9	100	65,1	50 - 70	60,1 - 70
Nº10	1,3	3,7	68,6	86,4	100	44,6	33 - 48	39,6 - 48
Nº40	1,2	1,7	24,7	30,8	100	17,2	15 - 25	15 - 22,2
Nº80	1,1	1,4	13,6	17,0	100	10,3	8 - 17	8 - 13,3
Nº200	0,6	1,1	9,3	10,5	90,3	7,2	4 - 10	5,2 - 9,2

Fonte: Adaptado do laudo das misturas (2022).

Figura 37 - Enquadramento do primeiro conjunto de novas misturas na Faixa III da especificação DERSA ET-P 00/027 (2005)



Fonte: Adaptado do laudo das misturas (2022).

Tabela 14 - Propriedades dos ligantes asfálticos do primeiro conjunto de novas misturas

PROPRIEDADE	30/45 A	30/45 B	50/70 PA 85	AMP 60/85E A	AMP 60/85E B
Penetração (0,1 mm)	32	33	30	50	63
Ponto de Amolecimento (°C)	54	54	88	71	67
Viscosidade Brookfield, 135°C, 20 RPM (cP)	480	451	450	1035	1340
Viscosidade Brookfield, 150°C, 50 RPM (cP)	216	225	222	518	643
Viscosidade Brookfield, 177°C, 100 RPM (cP)	78	81	80	193	210
Ponto de Fulgor (°C)	>235	>235	>235	>235	>235
Recuperação Elástica (%)	-	-	-	90	89
Índice de susceptibilidade térmica (IST)	-1,2	-1,2	-	-	-

Fonte: Adaptado do laudo das misturas (2022).

### 3.3.1.2 Segundo conjunto de novas misturas

O segundo conjunto de misturas produzidas em laboratório reúne 8 misturas, oriundas da combinação de 2 granulometrias, 2 fontes de agregados (ambos basaltos) e 2 ligantes diferentes, que foram destinadas a uma obra rodoviária no Rio Grande do Sul. Os ligantes utilizados foram um CAP 10/20 e um CAP TLA. Considerando essas combinações, a nomenclatura segue conforme exibido na Figura 38.

Tabela 15 - Características de dosagem e resistência do primeiro conjunto de novas misturas.

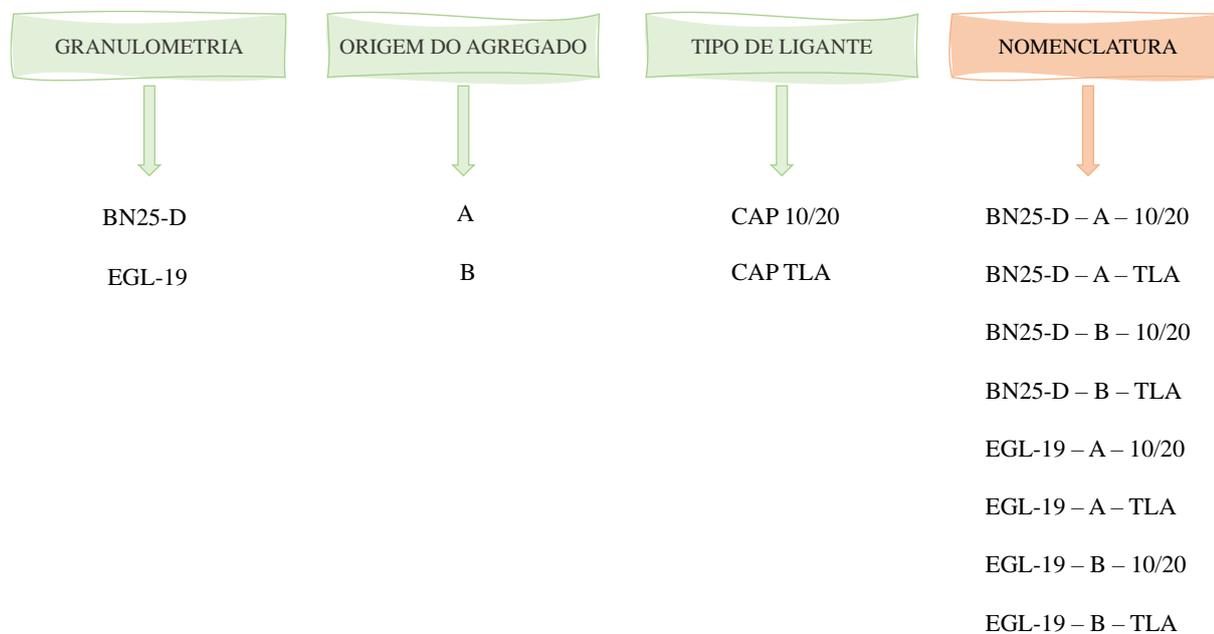
<b>PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS</b>						
<b>Mistura</b>	<b>Teor de Projeto (%)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>Relação Fíller Ligante</b>	<b>Densidade Rice - ABNT NBR 15619 - (g/cm<sup>3</sup>)</b>
DERSA - FX III - 30/45 A	4,75	3,8	75,2	15,4	1,5	2,645
DERSA - FX III - 30/45 B	4,77	3,8	75,5	15,4	1,5	2,645
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	4,73	3,7	75,3	15	1,5	2,675
DERSA - FX III - 60/85E A	4,83	3,82	75,6	15,7	1,5	2,639
DERSA - FX III - 60/85E B	4,83	3,8	75,8	15,7	1,5	2,638

<b>PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA</b>				
<b>Mistura</b>	<b>Estabilidade (kgf)</b>	<b>Fluência (mm)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>RRT - ABNT NBR 15617 - (%)</b>
DERSA - FX III - 30/45 A	1480	3,6	1,65	91,7
DERSA - FX III - 30/45 B	1451	3,7	1,59	93,5
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	1671	3,6	2,00	95,5
DERSA - FX III - 60/85E A	1653	3,8	1,94	92,6
DERSA - FX III - 60/85E B	1601	3,8	0,96	90,2

Fonte: Adaptado do laudo das misturas (2022).

Figura 38 - Nomenclatura do segundo conjunto de novas misturas



Fonte: Autora.

As misturas foram dosadas segundo a metodologia Marshall, para comporem as obras da BR-386 entre Lajeado e Carazinho (RS). O projeto segue a especificação EM-000/00-0000.00-GER-A1-PV/ED-E-002A. Tabela 16 traz as características dos agregados utilizados. Tais resultados foram fornecidos parte pelo laudo dos materiais, e parte foram executados pelo GEPPASV, no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da UFSM.

Tabela 16 - Características dos agregados do primeiro conjunto de misturas de laboratório

PROPRIEDADE	PEDRA A		PEDRA B		ESP.
	BN25-D	EGL-19	BN25-D	EGL-19	
Massa esp. Real Ag. Miúdo (g/cm <sup>3</sup> )	2,699	2,667	2,843	2,825	-
Massa esp. Real Ag. Graúdo (g/cm <sup>3</sup> )	3,006	3,010	2,887	2,862	-
Absorção Graúdo (%)	0,93	1,07	1,4	1,28	-
Equivalente de areia (%)	76,74	76,74	71,84	71,84	>60%
Durabilidade Graúdo (%)	0,89	0,89	0,89	0,89	<12%
Abrasão Los Angeles (%)	9,2	9,2	9,2	9,2	<40%
Índice de Forma	0,76	0,76	0,76	0,76	>0,5 Crivo

Fonte: Adaptado do laudo dos agregados (2022).

Para compor as misturas, foram utilizadas duas faixas granulométricas (BN25-D e EGL-19). A seguir, estão progressivamente apresentados os dados de granulometria individual dos materiais e composição das misturas, bem como os limites de cada faixa (Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24). Abaixo das composições ainda são mostrados os enquadramentos dos materiais nos limites da respectiva granulometria (Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42).

Tabela 17 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa BN25-D - Pedra A

PENEIRAS	ABERTURA (mm)	A					COMERCIAL	
		Brita 1"	BRITA #3/4"	PEDRISCO	PÓ - VSI	PÓ - CONE	CAL CH - 1	
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
1"	25,4	51,70%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
3/4"	19,1	3,20%	93,87%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
1/2"	12,7	0,39%	8,18%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
3/8"	9,53	0,32%	0,35%	86,04%	100,00%	100,00%	100,00%	
Nº 4	4,76	0,30%	0,23%	7,69%	96,63%	99,07%	100,00%	
Nº 10	2,00	0,29%	0,19%	0,32%	45,15%	66,66%	100,00%	
Nº 40	0,42	0,26%	0,18%	0,24%	19,82%	28,44%	100,00%	
Nº 80	0,18	0,24%	0,18%	0,24%	14,04%	18,14%	95,10%	
Nº 200	0,075	0,20%	0,17%	0,24%	9,72%	11,49%	77,20%	
<b>PORCENTAGENS NA MISTURA</b>		<b>26,50%</b>	<b>22,00%</b>	<b>10,00%</b>	<b>20,00%</b>	<b>20,00%</b>	<b>1,50%</b>	

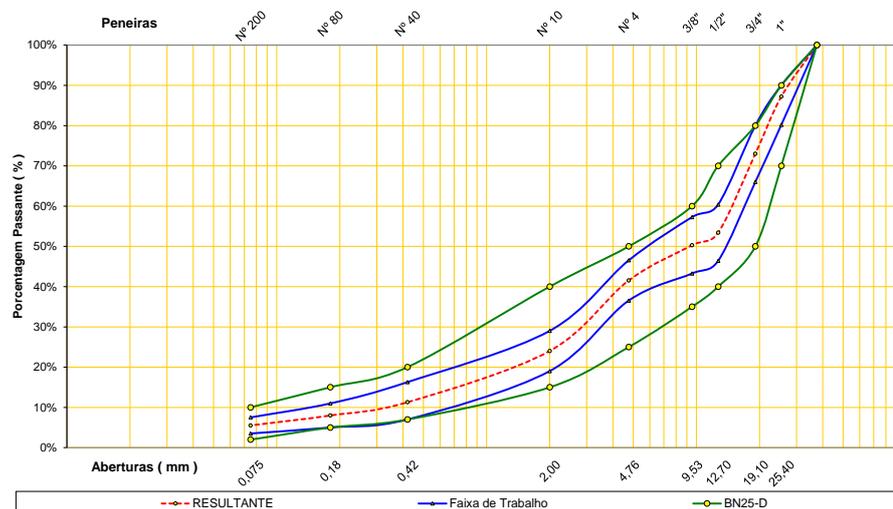
Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 18 - Composição das misturas da faixa BN25-D - Pedra A

PENEIRAS Pol	ABERTURA (mm)	MISTURA %	FAIXA DE TRABALHO		FAIXA ESPECIFICADA		
			Mín	Máx	Mín	Máx	Tol.
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	7,00%
1"	25,4	87,20%	80,20%	90,00%	70,00%	90,00%	7,00%
3/4"	19,1	73,00%	66,00%	80,00%	50,00%	80,00%	7,00%
1/2"	12,7	53,40%	46,40%	60,40%	40,00%	70,00%	7,00%
3/8"	9,53	50,30%	43,30%	57,30%	35,00%	60,00%	7,00%
Nº 4	4,76	41,50%	36,50%	46,50%	25,00%	50,00%	5,00%
Nº 10	2	24,00%	19,00%	29,00%	15,00%	40,00%	5,00%
Nº 40	0,42	11,30%	7,00%	16,30%	7,00%	20,00%	5,00%
Nº 80	0,18	8,00%	5,00%	11,00%	5,00%	15,00%	3,00%
Nº 200	0,075	5,50%	3,50%	7,50%	2,00%	10,00%	2,00%

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Figura 39 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa BN25-D - Pedra A



Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 19 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa BN25-D - Pedra B

PENEIRAS	ABERTURA (mm)	B			COMERCIAL	
		Brita 1 1/2"	BRITA #3/4"	PEDRISCO	PÓ	CAL CH - 1
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	49,49%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,1	4,86%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7	1,44%	53,26%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	9,53	1,42%	10,02%	88,84%	100,00%	100,00%
Nº 4	4,76	1,35%	2,01%	4,44%	87,76%	100,00%
Nº 10	2	1,32%	1,80%	0,78%	46,90%	100,00%
Nº 40	0,42	1,28%	1,79%	0,54%	21,53%	100,00%
Nº 80	0,18	1,25%	1,79%	0,50%	15,62%	95,10%
Nº 200	0,075	1,16%	1,78%	0,45%	10,79%	77,20%
<b>PORCENTAGENS NA MISTURA</b>		<b>26,50%</b>	<b>22,00%</b>	<b>10,00%</b>	<b>40,00%</b>	<b>1,50%</b>

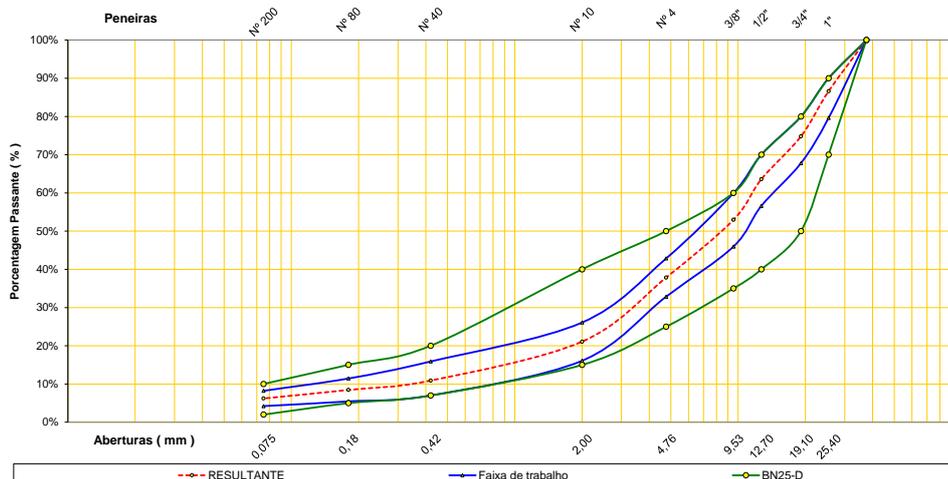
Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 20 - Composição das misturas da faixa BN25-D - Pedra B

PENEIRAS Pol	ABERTURA (mm)	MISTURA %	FAIXA DE TRABALHO		FAIXA ESPECIFICADA		
			Mín	Máx	Mín	Máx	Tol.
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	7,00%
1"	25,4	86,61%	79,61%	90,00%	70,00%	90,00%	7,00%
3/4"	19,1	74,79%	67,79%	80,00%	50,00%	80,00%	7,00%
1/2"	12,7	63,60%	56,60%	70,00%	40,00%	70,00%	7,00%
3/8"	9,53	52,97%	45,97%	59,97%	35,00%	60,00%	7,00%
Nº 4	4,76	37,85%	32,85%	42,85%	25,00%	50,00%	5,00%
Nº 10	2	21,08%	16,08%	26,08%	15,00%	40,00%	5,00%
Nº 40	0,42	10,90%	7,00%	15,90%	7,00%	20,00%	5,00%
Nº 80	0,18	8,45%	5,45%	11,45%	5,00%	15,00%	3,00%
Nº 200	0,075	6,22%	4,22%	8,22%	2,00%	10,00%	2,00%

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Figura 40 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa BN25-D - Pedra B



Fonte: Projeto da empresa contratante dos ensaios.

Tabela 21 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa EGL-19 - Pedra A

PENEIRAS	ABERTURA (mm)	A			COMERCIAL	
		BRITA #3/4"	BRITA 3/8"	PÓ - VSI	PÓ - CONE	CAL CH - 1
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,1	93,87%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7	8,18%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	9,53	0,35%	86,04%	100,00%	100,00%	100,00%
Nº 4	4,76	0,23%	7,69%	96,63%	99,07%	100,00%
Nº 10	2	0,19%	0,32%	45,15%	66,66%	100,00%
Nº 40	0,42	0,18%	0,24%	19,82%	28,44%	100,00%
Nº 80	0,18	0,18%	0,24%	14,04%	18,14%	95,10%
Nº 200	0,075	0,17%	0,24%	9,72%	11,49%	77,20%
<b>PORCENTAGENS NA MISTURA</b>		<b>23,00%</b>	<b>30,00%</b>	<b>22,50%</b>	<b>23,00%</b>	<b>1,50%</b>

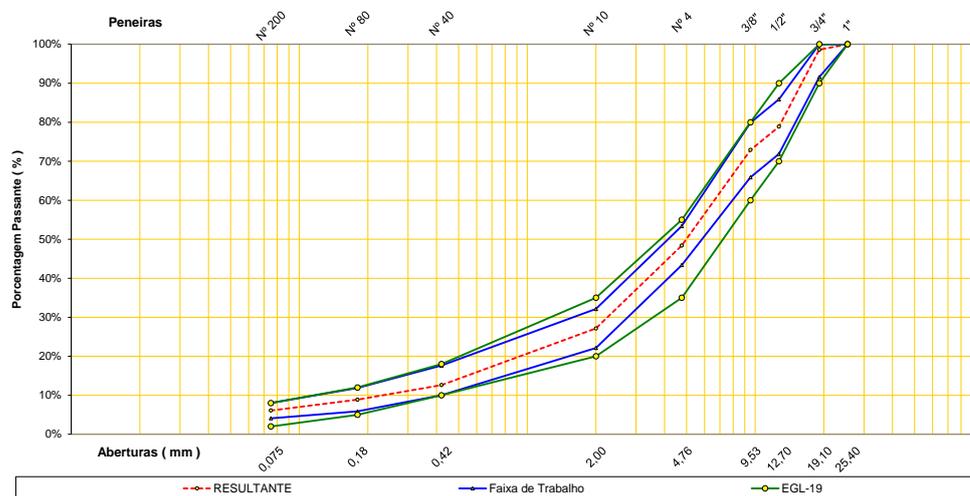
Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 22 - Composição das misturas da faixa EGL-19 - Pedra A

PENEIRAS	ABERTURA (mm)	MISTURA %	FAIXA DE TRABALHO		FAIXA ESPECIFICADA		
			Mín	Máx	Mín	Máx	Tol.
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	7,00%
3/4"	19,1	98,59%	91,59%	100,00%	90,00%	100,00%	7,00%
1/2"	12,7	78,88%	71,88%	85,88%	70,00%	90,00%	7,00%
3/8"	9,53	72,89%	65,89%	79,89%	60,00%	80,00%	7,00%
Nº 4	4,76	48,39%	43,39%	53,39%	35,00%	55,00%	5,00%
Nº 10	2	27,13%	22,13%	32,13%	20,00%	35,00%	5,00%
Nº 40	0,42	12,62%	10,00%	17,62%	10,00%	18,00%	5,00%
Nº 80	0,18	8,87%	5,87%	11,87%	5,00%	12,00%	3,00%
Nº 200	0,075	6,10%	4,10%	8,00%	2,00%	8,00%	2,00%

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Figura 41 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa EGL-19 - Pedra A



Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 23 - Granulometria dos agregados individuais para compor as misturas da faixa EGL-19 - Pedra B

PENEIRAS	ABERTURA (mm)	B				COMERCIAL
		Brita 1"	BRITA #3/4"	PEDRISCO	PÓ	CAL CH - 1
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,1	79,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7	10,68%	53,26%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	9,53	4,21%	10,02%	88,84%	100,00%	100,00%
Nº 4	4,76	1,67%	2,01%	4,44%	87,76%	100,00%
Nº 10	2	1,43%	1,80%	0,78%	46,90%	100,00%
Nº 40	0,42	1,31%	1,79%	0,54%	21,53%	100,00%
Nº 80	0,18	1,23%	1,79%	0,50%	15,62%	95,10%
Nº 200	0,075	1,10%	1,78%	0,45%	10,79%	77,20%
<b>PORCENTAGENS NA MISTURA</b>		<b>0,00%</b>	<b>27,00%</b>	<b>25,00%</b>	<b>46,50%</b>	<b>1,50%</b>

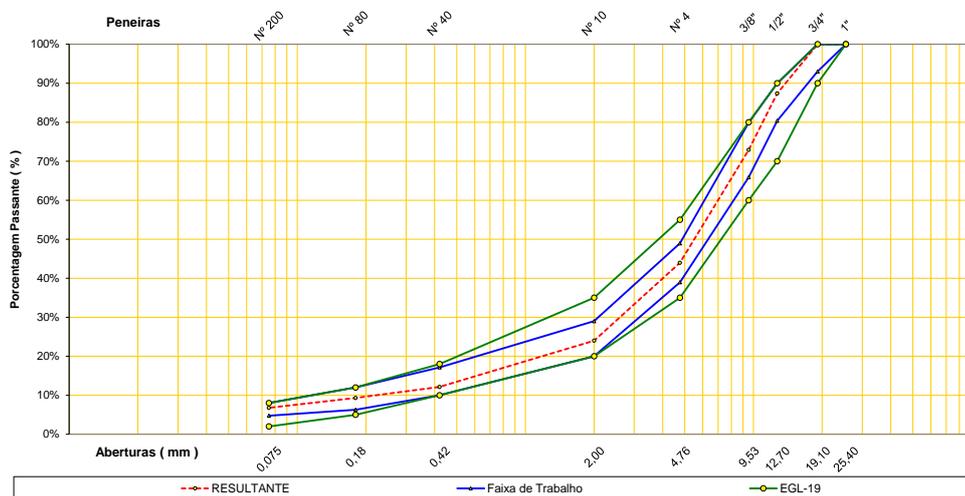
Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 24 - Composição das misturas da faixa EGL-19 - Pedra B

PENEIRAS Pol	ABERTURA (mm)	MISTURA %	FAIXA DE TRABALHO		FAIXA ESPECIFICADA		
			Mín	Máx	Mín	Máx	Tol.
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	7,00%
3/4"	19,1	100,00%	93,00%	100,00%	90,00%	100,00%	7,00%
1/2"	12,7	87,38%	80,38%	90,00%	70,00%	90,00%	7,00%
3/8"	9,53	72,92%	65,92%	79,92%	60,00%	80,00%	7,00%
Nº 4	4,76	43,96%	38,96%	48,96%	35,00%	55,00%	5,00%
Nº 10	2	23,99%	20,00%	28,99%	20,00%	35,00%	5,00%
Nº 40	0,42	12,13%	10,00%	17,13%	10,00%	18,00%	5,00%
Nº 80	0,18	9,30%	6,30%	12,00%	5,00%	12,00%	3,00%
Nº 200	0,075	6,77%	4,77%	8,00%	2,00%	8,00%	2,00%

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Figura 42 - Enquadramento granulométrico das misturas da faixa EGL-19 - Pedra B



Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Além da caracterização mostrada acima, dos agregados e granulometrias, a Tabela 25 e a Tabela 26 apresentam, respectivamente, os dados da caracterização convencional dos ligantes e características de dosagem e resistência das 8 misturas.

Tabela 25 - Propriedades dos ligantes utilizados no segundo conjunto de misturas de laboratório

PROPRIEDADE	MÉTODO	CAP 10/20	CAP TLA
Penetração (0,1 mm)	NBR-6576	15	21,3
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR-6560	71	56
Viscosidade Brookfield, 135°C, 20 RPM (cP)	NBR-15184	2410	870
Viscosidade Brookfield, 150°C, 50 RPM (cP)	NBR-15184	1022	471
Viscosidade Brookfield, 177°C, 100 RPM (cP)	NBR-15184	213	150
Ponto de Fulgor (°C)	NBR-11341	>235	>235

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

Tabela 26 - Características de dosagem e resistência do segundo conjunto de misturas de laboratório

<b>PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS</b>						
<b>Mistura</b>	<b>Teor de Projeto (%)</b>	<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>Relação Fíller Ligante</b>	<b>Densidade Rice - ABNT NBR 15619 - (g/cm<sup>3</sup>)</b>
BN25-D - A - 10/20	4,2	4,46	69,8	14,8	0,77	2,593
BN25-D - A - TLA	4,3	4,56	68,7	14,5	0,75	2,606
BN25-D - B - 10/20	4,4	4,42	68,9	14,2	1,41	2,557
BN25-D - B - TLA	4,5	4,50	67,8	14,0	1,38	2,569
EGL-19 - A - 10/20	5,3	4,72	71,6	16,6	1,15	2,540
EGL-19 - A - TLA	5,4	4,71	72,2	16,9	1,13	2,533
EGL-19 - B - 10/20	5,0	4,66	72,1	16,7	1,35	2,522
EGL-19 - B - TLA	5,4	4,50	72,8	16,6	1,25	2,534
<b>PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA</b>						
<b>Mistura</b>	<b>Estabilidade (kgf)</b>	<b>Fluência (mm)</b>		<b>RT (MPa)</b>		
BN25-D - A - 10/20	1758,06	2,29		1,88		
BN25-D - A - TLA	1713,93	2,00		2,01		
BN25-D - B - 10/20	1368,86	2,39		1,53		
BN25-D - B - TLA	1295,65	2,44		1,44		
EGL-19 - A - 10/20	1479,08	2,27		1,58		
EGL-19 - A - TLA	1465,07	3,20		1,9		
EGL-19 - B - 10/20	1255,99	2,56		1,62		
EGL-19 - B - TLA	1287,31	2,41		1,65		

Fonte: Adaptado do projeto das misturas (2022).

### 3.3.2 Caracterização da rigidez

A caracterização da rigidez de materiais asfálticos destina-se a obter as propriedades em um domínio sem danificação de materiais viscoelásticos. Nas seções que seguem serão descritos os ensaios e resultados encontrados para os ligantes e misturas que serão adicionados ao banco de dados deste trabalho.

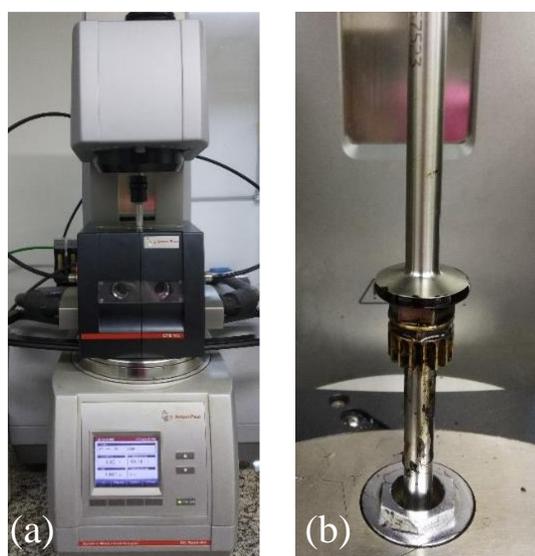
#### 3.3.2.1 Ligantes asfálticos

Os 5 ligantes do primeiro conjunto de misturas, somados aos 2 ligantes do segundo conjunto foram envelhecidos à curto prazo em RTFOT. A norma preconiza que uma fina película de CAP seja submetida ao efeito do calor e do ar, sendo mantido a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos (AASHTO T 240:2022; ABNT NBR 15235:2009). Posteriormente, após as amostras serem submetidas ao protocolo do RTFOT,

foram envelhecidas à longo prazo utilizando o PAV (AASHTO R 28-22; ASTM D6521-22). Os ligantes são submetidos a 20 horas com 2,1 MPa de pressão de ar.

Para classificação PG dos ligantes em alta temperatura ( $PG_H$ ) e PG contínuo, os ligantes foram ensaiados no DSR (Figura 43) a 10 rad/s, com temperaturas sofrendo incrementos de 6°C (AASHTO 29-15, 2019). A temperatura final foi atingida ao encontrar valores mínimos de  $|G^*|/\sin\phi$  de 1,0 kPa para a condição virgem e 2,2 kPa para a condição após RTFOT. A Figura 44 apresenta os resultados de  $PG_H$  e  $|G^*|/\sin\phi$ .

Figura 43 - (a) Reômetro de cisalhamento dinâmico e (b) amostra entre as placas



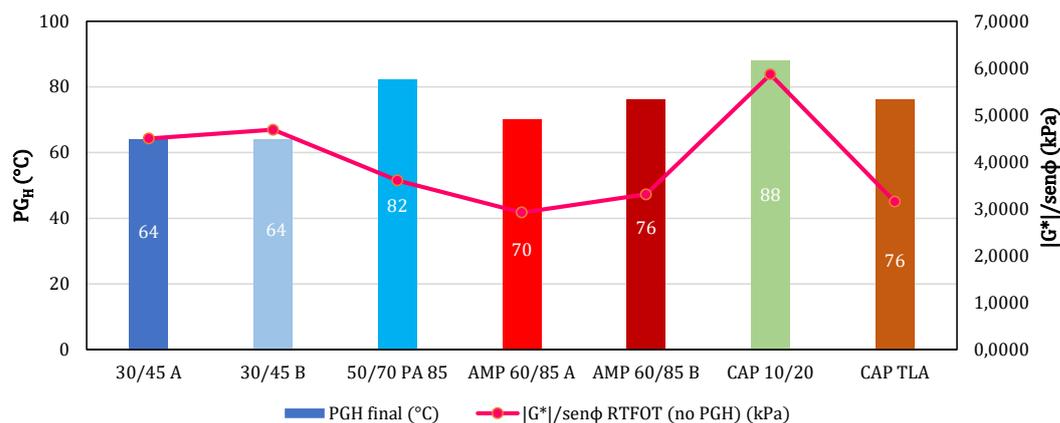
Fonte: Autora.

Além disso, foi realizado um ensaio de varredura de frequências e temperaturas seguindo a normativa AASHTO T 315-22. Em condições de maior rigidez (temperaturas baixas a intermediárias), as amostras foram ensaiadas na geometria de 8 mm com *gap* de 2 mm, e em condições de menor rigidez (temperaturas intermediárias a altas) foi utilizada a geometria de 25 mm e *gap* de 1 mm.

Os ensaios de módulo de cisalhamento dinâmico foram realizados para as condições virgem, após RTFOT e após PAV. Os dados completos do ensaio encontram-se nos Apêndices A, B e C. As curvas mestras foram modeladas utilizando o 2s2p1d e os *shift factors* foram descritos pela equação de WLF. A Tabela 27 mostra os coeficientes do 2s2p1d e da equação de WLF, para as 3 condições. A Figura 45, Figura 46 e Figura 47 trazem as

curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase para os ligantes, nas condições virgem, RTFOT e PAV, respectivamente.

Figura 44 -  $PG_H$  e  $|G^*|/\sin\phi$  para os ligantes desta pesquisa

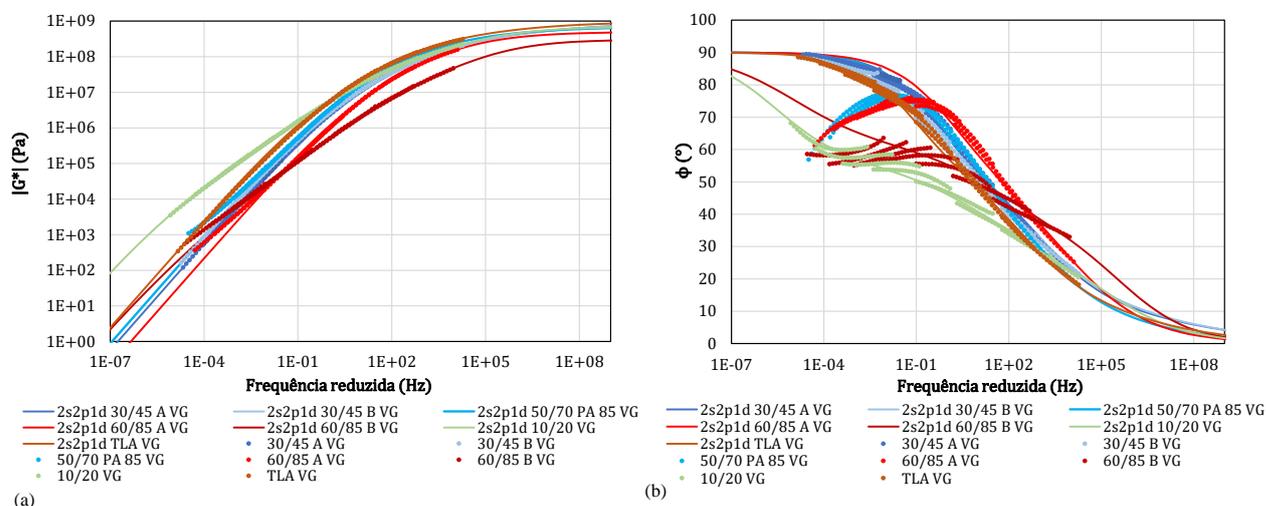


Fonte: Autora.

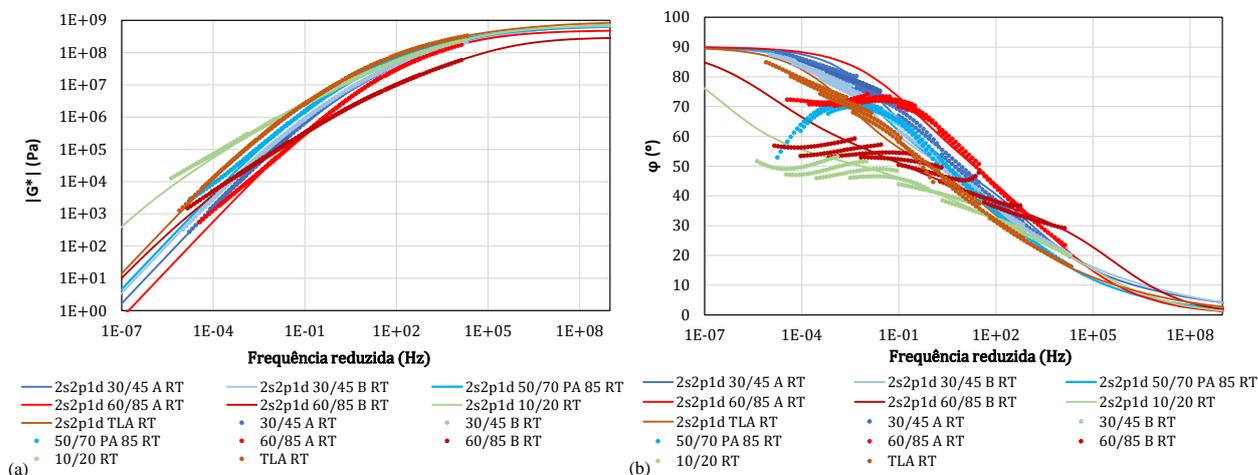
Tabela 27 - Coeficientes 2s2p1d e de WLF para os ligantes desta pesquisa

VIRGEM	2s2p1d						aT (WLF)		
	G00 (Pa)	G0 (Pa)	k	h	$\delta$	tE (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)
<b>VIRGEM</b>									
30/45 A VG	0,0	9,5E+08	0,19	0,56	2,5	8,00E-06	120	15,03	123,83
30/45 B VG	0,0	9,4E+08	0,20	0,56	2,6	7,50E-06	200	18,42	150,62
50/70 PA 85 VG	0,0	7E+08	0,23	0,58	1,9	4,00E-05	50	15,20	133,41
AMP 60/85 A VG	0,0	5E+08	0,30	0,60	1,8	2,00E-05	35	13,42	121,95
AMP 60/85 B VG	0,0	3E+08	0,37	0,68	5,0	2,00E-05	700	18,07	162,96
CAP 10/20 VG	0,0	7E+08	0,32	0,62	4,8	1,20E-04	2000	23,71	188,24
CAP TLA VG	0,0	9,8E+08	0,22	0,58	2,4	4,00E-05	100	19,32	156,37
<b>RTFOT</b>									
30/45 A RT	0,0	9,50E+08	0,19	0,56	2,6	1,00E-05	280	19,11	156,47
30/45 B RT	0,0	9,40E+08	0,22	0,58	3,4	1,70E-05	350	21,66	169,29
50/70 PA 85 RT	0,0	7,00E+08	0,23	0,58	2,1	7,00E-05	150	18,24	151,24
AMP 60/85 A RT	0,0	5,00E+08	0,30	0,61	2,0	3,80E-05	50	14,92	132,17
AMP 60/85 B RT	0,0	3,00E+08	0,37	0,65	8,0	8,00E-05	800	21,24	180,32
CAP 10/20 RT	0,0	7,00E+08	0,32	0,60	5,3	2,80E-04	5000	33,76	261,02
CAP TLA RT	0,0	9,80E+08	0,22	0,58	2,9	7,80E-05	300	25,11	196,21
<b>PAV</b>									
30/45 A PAV	0,0	9,50E+08	0,19	0,56	3,4	2,50E-05	500	21,40	168,72
30/45 B PAV	0,0	9,40E+08	0,21	0,56	4,0	2,50E-05	1000	28,42	222,96
50/70 PA 85 PAV	0,0	7,00E+08	0,24	0,58	2,5	1,80E-04	170	23,39	191,35
AMP 60/85 A PAV	0,0	5,00E+08	0,33	0,65	3,0	1,50E-04	80	19,47	164,73
AMP 60/85 B PAV	0,0	3,00E+08	0,35	0,64	10,0	7,50E-04	3000	38,16	308,01
CAP 10/20 PAV	0,0	7,00E+08	0,29	0,58	11,0	1,50E-03	10000	46,72	356,10
CAP TLA PAV	0,0	9,80E+08	0,23	0,57	4,3	3,00E-04	750	35,98	272,49

Fonte: Autora.

Figura 45 - Modelagem 2s2p1d de (a)  $|G^*|$  e (b)  $\phi$ : condição virgem

Fonte: Autora.

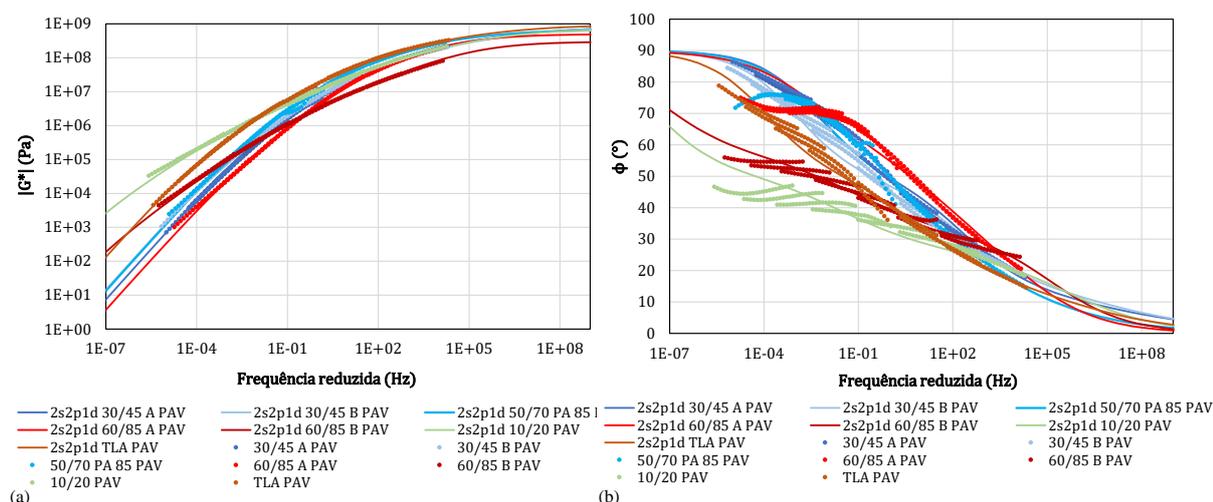
Figura 46 - Modelagem 2s2p1d de (a)  $|G^*|$  e (b)  $\phi$ : condição RTFOT

Fonte: Autora.

Oriundo dos dados de viscoelasticidade dos ligantes, foi calculado o parâmetro G-R (RUAN; DAVISON; GLOVER, 2003; GLOVER et al., 2005; ROWE, 2011), pela equação  $|G^*|(\cos\phi)^2/\sin\phi$ . O módulo de cisalhamento dinâmico e o ângulo de fase para o cálculo foram obtidos a 15°C e 0,005 rad/s. Esse parâmetro é utilizado para avaliar o desempenho frente ao trincamento e ao fenômeno do envelhecimento (FARROKHZADE; SABOURI; TABATABAEE, 2022; YANG et al., 2022a), e possui boa correlação com a suscetibilidade ao trincamento em campo (menores valores de G-R são desejados) (ROWE; KING;

ANDERSON, 2014). A Tabela 28 mostra os resultados encontrados para os ligantes, nas três condições de envelhecimento.

Figura 47 - Modelagem 2s2p1d de (a)  $|G^*|$  e (b)  $\phi$ : condição PAV



Fonte: Autora.

Tabela 28 - Parâmetro G-R para os novos ligantes

CAP	$ G^* $ (kPa)	$\phi$ (°)	G-R (kPa)
<b>VG</b>			
30/45 A VG	79,33	82,11	1,51
30/45 B VG	107,74	78,54	4,34
50/70 PA 85 VG	98,86	82,38	1,76
AMP 60/85 A VG	24,34	84,80	0,20
AMP 60/85 B VG	28,67	61,84	7,24
CAP 10/20 VG	552,82	53,13	248,78
CAP TLA VG	277,42	76,23	16,17
<b>RTFOT</b>			
30/45 A RT	173,14	74,31	13,15
30/45 B RT	279,28	67,04	46,17
50/70 PA 85 RT	374,28	70,13	45,98
AMP 60/85 A RT	60,28	80,43	1,69
AMP 60/85 B RT	101,41	54,96	40,82
CAP 10/20 RT	1081,71	48,72	626,34
CAP TLA RT	809,40	62,31	197,31
<b>PAV</b>			
30/45 A PAV	494,88	63,44	110,58
30/45 B PAV	567,20	57,45	194,84
50/70 PA 85 PAV	790,54	64,33	164,56
AMP 60/85 A PAV	210,60	68,65	29,96
AMP 60/85 B PAV	418,72	47,77	255,52
CAP 10/20 PAV	2460,20	39,92	2255,34
CAP TLA PAV	2370,24	51,25	1190,63

Fonte: Autora.

Também a partir de dados de viscoelasticidade linear, foi encontrada a frequência de *crossover* ( $\omega_c$ , em rad/s), onde o ângulo de fase é igual a 45°. Conforme  $\omega_c$  aumenta, a rigidez

do material diminui (PETERSEN et al., 1994). A partir dessa frequência, foi encontrado o *Reological Index* (R-value), que é definido como a diferença entre o logaritmo do módulo vítreo e o módulo encontrado para a frequência de *crossover*. O módulo vítreo (Gg) é o valor limite do módulo de cisalhamento dinâmico nas altas frequências e/ou baixas temperaturas, e para a maioria dos ligantes resulta em 1 GPa ( $10^9$  Pa). Maiores valores de R-value indicam curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico mais planas, de materiais menos envelhecidos (BOOSHEHRIAN; MOGAWER; BONAQUIST, 2013). A Tabela 29 mostra os resultados de  $\omega_c$  e R-value para os novos ligantes.

Tabela 29 -  $\omega_c$  e R-value para os novos ligantes

CAP	$\omega_c$ (Hz)	$\omega_c$ (rad/s)	G*  na $\omega_c$ (Pa)	R-value
<b>VG</b>				
30/45 A VG	63,60	399,61	2,80E+07	1,55
30/45 B VG	42,80	268,92	2,20E+07	1,66
50/70 PA 85 VG	46,00	289,03	3,51E+07	1,45
AMP 60/85 A VG	176,00	1105,84	2,99E+07	1,52
AMP 60/85 B VG	87,30	548,52	6,32E+06	2,20
CAP 10/20 VG	1,67	10,49	6,88E+06	2,16
CAP TLA VG	21,20	133,20	3,31E+07	1,48
<b>RTFOT</b>				
30/45 A RT	27,50	172,79	2,11E+07	1,67
30/45 B RT	14,20	89,22	1,63E+07	1,79
50/70 PA 85 RT	11,50	72,26	2,38E+07	1,62
AMP 60/85 A RT	76,00	477,52	2,61E+07	1,58
AMP 60/85 B RT	2,01	12,63	1,59E+06	2,80
CAP 10/20 RT	0,18	1,12	3,62E+06	2,44
CAP TLA RT	4,45	27,96	2,10E+07	1,68
<b>PAV</b>				
30/45 A PAV	5,09	31,98	1,39E+07	1,86
30/45 B PAV	2,26	14,20	8,80E+06	2,06
50/70 PA 85 PAV	3,03	19,04	1,86E+07	1,73
AMP 60/85 A PAV	18,90	118,75	1,96E+07	1,71
AMP 60/85 B PAV	0,06	0,38	8,52E+05	3,07
CAP 10/20 PAV	0,00	0,01	6,98E+05	3,16
CAP TLA PAV	0,23	1,45	9,07E+06	2,04

Fonte: Autora.

### 3.3.2.2 Misturas asfálticas

A rigidez das misturas novas inseridas no banco de dados foi caracterizada pelos ensaios de Módulo de Resiliência (ABNT NBR 16018:2011, ASTM D7369/20 e DNIT 135/2018 - ME) e Módulo Complexo, segundo as normas AASHTO T 342 (2022) e DNIT 416 (2019). Apenas o primeiro conjunto de misturas foi ensaiado (pelo Laboratório de Pavimentação – LAPAV da UFRGS no caso do módulo de resiliência e pela autora no caso

do módulo complexo), uma vez que o segundo conjunto foi caracterizado apenas à deformação permanente pelo GEPPASV.

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado pela aplicação de cargas repetidas diametralmente sobre os corpos de prova cilíndricos. Os CPs possuem 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura. O carregamento é cíclico foi realizado a 1 Hz (1 ciclo por segundo), contendo 0,1 segundo de carga e 0,9 segundos de repouso. A temperatura do ensaio é de 25°C. Além disso, a carga utilizada no ensaio varia entre 5% e 25% da resistência à tração por compressão diametral média obtida para 3 corpos de prova. Os valores de MR, desvio padrão, coeficiente de variação e resultados de RT fornecidos pelo LAPAV estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de MR, DP, CV% e resultados de RT para o primeiro conjunto de misturas

Mistura	MR (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	RT (MPa)
DERSA - FX III - 30/45 A	8978	308	3,4	1,65
DERSA - FX III - 30/45 B	8290	425	5,1	1,59
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	10491	399	3,8	2,00
DERSA - FX III - 60/85E A	6163	218	3,5	1,94
DERSA - FX III - 60/85E B	2015	71	3,5	0,96

Fonte: Adaptado do relatório do LAPAV/UFRGS (2022).

Para o ensaio de módulo complexo, os corpos de prova foram preparados de acordo com a norma DNIT 178/2018 - PRO utilizando o compactador giratório pela empresa contratante dos ensaios. Os CPs buscaram um grau de compactação alvo de  $98,5 \pm 0,5\%$  da densidade aparente de projeto da mistura compactada, resultando em  $5,5\% \pm 0,5\%$  de vazios para as misturas dosadas para 4% de volume de vazios. Os CPs possuem altura de  $150 \pm 2,5$  mm e diâmetro de  $100 \pm 2,0$  mm.

As temperaturas variam de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $54^{\circ}\text{C}$  e as frequências de 25 Hz a 0,01 Hz. A instrumentação do corpo de prova consiste na colocação de 3 transdutores para medida do deslocamento, chamados de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). As deformações foram mantidas entre 50 e 75 microstrains. Os resultados completos do ensaio estão apresentados no Apêndice D.

Seguindo a mesma metodologia dos ligantes, a Tabela 31 mostra os coeficientes de ajuste do modelo 2s2p1d para as misturas, e os coeficientes da equação de WLF para os *shift*

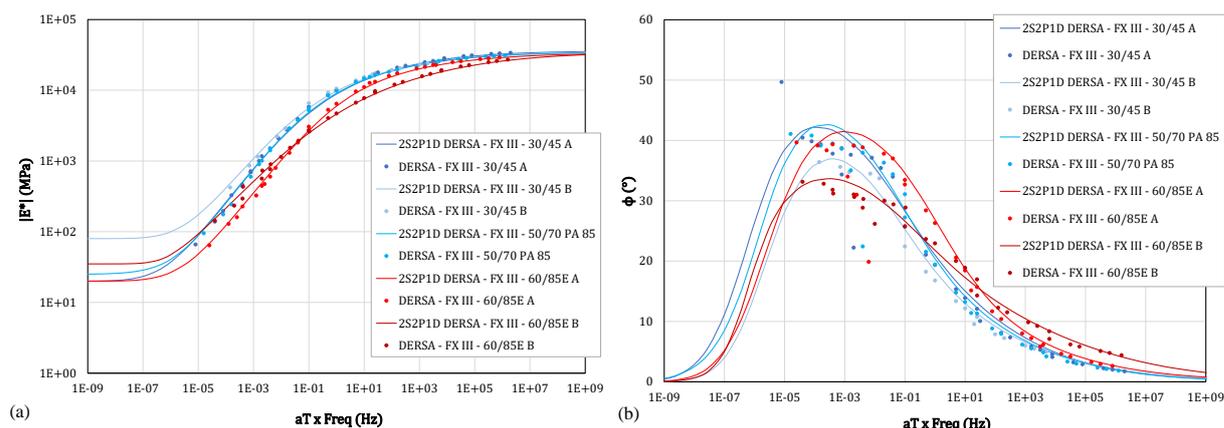
factors. A Figura 48a e b traz as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase das mesmas misturas.

Tabela 31 - Coeficientes do modelo 2s2p1d e da equação de WLF para o primeiro conjunto de misturas de laboratório

Mistura	2s2p1d							WLF	
	$E_{00}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	k	h	$\delta$	$t_E$ (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)
DERSA - FX III - 30/45 A	20	36000	0,22	0,54	2,5	0,2	5000	48,89	329,35
DERSA - FX III - 30/45 B	80	35500	0,19	0,51	2,2	0,25	2000	51,25	339,63
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	25	34500	0,21	0,55	2,3	0,22	12000	19,21	152,64
DERSA - FX III - 60/85E A	20	34000	0,19	0,515	1,7	0,025	10000	23,05	183,69
DERSA - FX III - 60/85E B	35	35000	0,18	0,45	3	0,02	10000	17,07	136,66

Fonte: Autora.

Figura 48 - Curvas mestras de (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase, com a modelagem 2s2p1d, para o primeiro conjunto de misturas de laboratório



Fonte: Autora.

### 3.3.3 Caracterização da resistência à deformação permanente

A caracterização da deformação permanente pode ser realizada também nas escalas de ligantes e misturas asfálticas. As normas preconizam a aplicação de dano nas amostras em temperaturas mais elevadas. A seguir estão apresentados os ensaios realizados e os resultados obtidos para os novos materiais inseridos no banco de dados desta pesquisa.

### 3.3.3.1 Ligantes asfálticos

Os 9 ligantes asfálticos foram submetidos ao *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) *Test*, normatizado pela AASHTO T 350-19 e ASTM D7405-20. O ensaio utilizou a geometria de 25 mm após envelhecimento em RTFOT. As amostras foram submetidas a ciclos de carregamento durante 1 segundo e repouso durante 9 segundos, repetindo esse processo em 20 ciclos a 0,1 kPa e 10 ciclos a 3,2 kPa. O ensaio foi realizado no PG de alta temperatura de cada ligante, bem como na temperatura de 64°C (tendo em vista ser o PG necessário para a região sul do país de acordo com Faccin et al., 2021).

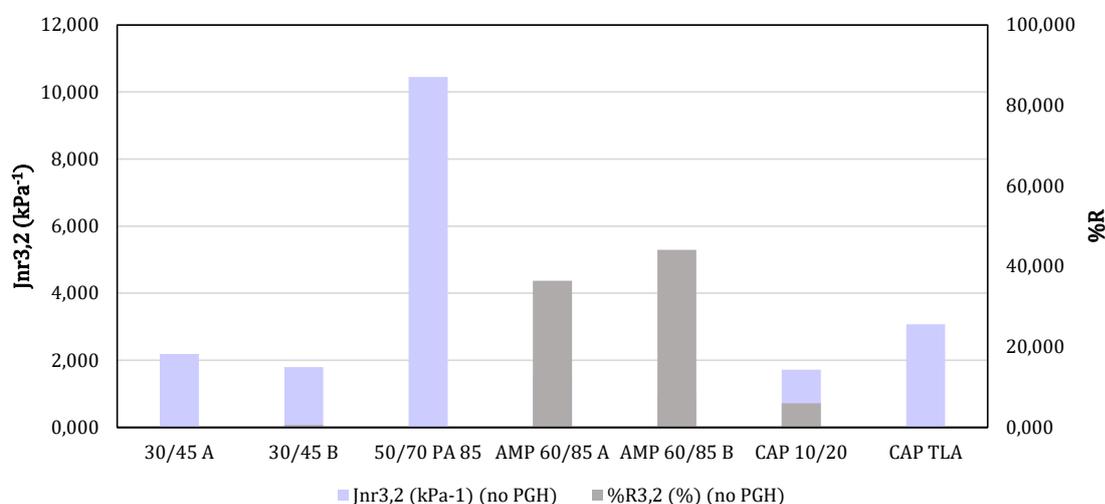
A Tabela 32 mostra os valores de compliância não recuperável (Jnr) e percentual de recuperação (%R) nos dois níveis de tensão, Jnr diferencial entre os níveis de tensão (Jnr<sub>diff</sub>) e classe de tráfego. O Jnr<sub>3,2</sub> e %R<sub>3,2</sub> estão apresentados graficamente na Figura 49.

Tabela 32 - Resultados de MSCR para os ligantes desta pesquisa

Ligante	PG <sub>H</sub> (°C)	Jnr <sub>0,1</sub> (kPa <sup>-1</sup> ) (no PG <sub>H</sub> )	Jnr <sub>3,2</sub> (kPa <sup>-1</sup> ) (no PG <sub>H</sub> )	Jnr, diff (%) (no PGH)	%R <sub>0,1</sub> (%) (no PG <sub>H</sub> )	%R <sub>3,2</sub> (%) (no PG <sub>H</sub> )	R diff (%)	TRÁFEGO
30/45 A	64	1,949	2,190	12,34	3,519	0,000	100,00	S
30/45 B	64	1,553	1,793	15,47	6,763	0,585	91,35	H
50/70 PA 85	82	0,025	10,447	41488,34	97,187	0,000	100,00	S
AMP 60/85 A	70	0,882	1,575	78,69	61,839	36,435	41,10	H
AMP 60/85 B	76	0,554	0,946	70,61	66,006	44,129	33,14	V
CAP 10/20	88	0,752	1,714	127,98	38,330	5,957	84,46	H
CAP TLA	76	2,624	3,074	17,14	4,190	0,000	100,00	S

Fonte: Autora.

Figura 49 - Valores de Jnr<sub>3,2</sub> e %R<sub>3,2</sub> para os ligantes desta pesquisa



Fonte: Autora.

### 3.3.3.2 Misturas asfálticas

As misturas de laboratório foram caracterizadas à deformação permanente por meio do ensaio de *Flow Number* (FN). O primeiro conjunto de misturas foi recebido já moldado em corpos de prova adequados ao ensaio, e o segundo conjunto foi moldado pelo GEPPASV.

As amostras foram produzidas para a situação mais crítica de campo, ou seja, no mínimo valor de compactação permitido pelos órgãos rodoviários. Assim, a norma brasileira ABNT NBR 16505:2016 estipula que os corpos de prova devem ter grau de compactação de  $97\% \pm 0,5\%$ . A norma americana AASHTO T 378:2022 estabelece corpos de prova com um índice de vazios de  $7\% \pm 0,5\%$ , visando simular a mesma condição.

Os ensaios foram realizados a  $60^{\circ}\text{C}$ , com carga cíclica de 0,1 s de carregamento e 0,9 s de repouso (Figura 50). A carga aplicada foi de 204 kPa. Os corpos de prova possuem  $150\text{ mm} \pm 2,5\text{ mm}$  de altura e 100 mm de diâmetro. A Tabela 33 traz os valores encontrados para FN, desvio padrão, coeficiente de variação e parâmetros do modelo de Francken para as amostras. A Figura 51 mostra graficamente os valores de FN.

Figura 50 - Amostra no ensaio de Flow Number



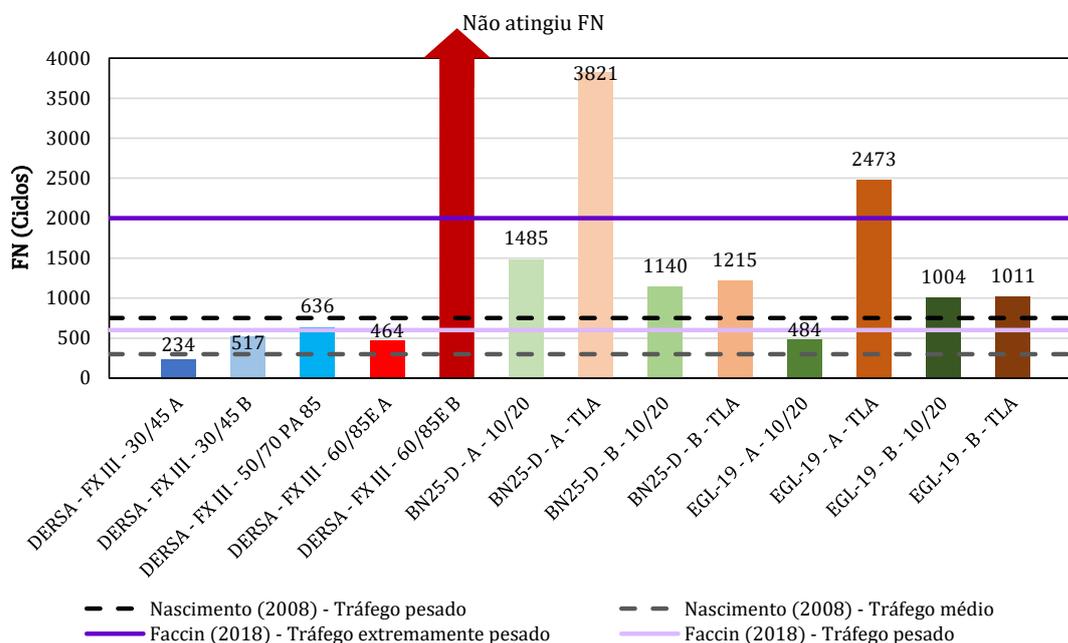
Fonte: Autora.

Tabela 33 - Valores de FN, DP, CV% e parâmetros do modelo de Francken para os dois conjuntos de misturas de laboratório

Mistura	FN (Ciclos)	DP (Ciclos)	CV (%)	PARÂMETROS MODELO FRANCKEN			
				A	B	C	D
DERSA - FX III - 30/45 A	234	34	14,69	1792,738	0,45577	1061,411	0,005203520
DERSA - FX III - 30/45 B	517	79	15,25	1104,198	0,43338	1085,797	0,002167043
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	636	147	23,10	1380,874	0,41679	790,896	0,002130978
DERSA - FX III - 60/85E A	464	86	18,57	1502,639	0,43840	386,654	0,003661749
DERSA - FX III - 60/85E B	Não atingiu Flow Number			-	-	-	-
BN25-D - A - 10/20	1485	132	8,91	1163,100	0,28763	2656,521	0,000421273
BN25-D - A - TLA	3821	403	10,55	1157,359	0,31372	6433,164	0,000143814
BN25-D - B - 10/20	1140	351	30,84	925,390	0,33935	3284,315	0,000562972
BN25-D - B - TLA	1215	25	2,10	1173,899	0,37439	2541,548	0,000686780
EGL-19 - A - 10/20	484	13	2,78	1420,809	0,40956	3624,750	0,001551746
EGL-19 - A - TLA	2473	387	15,67	1306,150	0,32431	2788,792	0,000316721
EGL-19 - B - 10/20	1004	139	13,88	1061,466	0,33925	3081,822	0,000654193
EGL-19 - B - TLA	1011	121	11,97	1753,826	0,35340	2808,080	0,000838701

Fonte: Autora.

Figura 51 - Valores de FN para os dois conjuntos de misturas de laboratório e limites de Nascimento (2008) e Faccin (2018)



### 3.3.4 Caracterização da resistência à fadiga

A caracterização da resistência à fadiga é realizada em temperaturas intermediárias, tanto em ligantes quanto em misturas asfálticas, por meio de protocolos padronizados. As

seções que seguem mostram os ensaios e resultados encontrados para os novos materiais do banco de dados, caracterizados nesta pesquisa.

### 3.3.4.1 Ligantes asfálticos

Todos os ligantes foram caracterizados à fadiga utilizando o ensaio de LAS, e analisados pela a mecânica do dano contínuo. Segundo a norma AASHTO T 391 (2020), inicialmente foi realizado um ensaio de varredura de frequências a 19°C (*frequency sweep*), sem dano, para obter as propriedades reológicas com 0,1% de deformação e frequências de 0,2 a 30 Hz. Em seguida, foi realizada a varredura de amplitudes (*amplitude sweep*) para avaliar o dano. Essa etapa foi executada a uma frequência de 10 Hz e carregamento em rampa linear de zero a 30% ao longo de 3000 ciclos, em 300 segundos.

Todas as etapas foram realizadas no DSR com a geometria de 8 mm e *gap* de 2 mm. As amostras, para garantir a representatividade do campo, foram testadas nas duas condições de envelhecimento (RTFOT e PAV). Para avaliação da ruptura, foi considerado o critério da norma AASHTO T 391 (2020), com a redução de 35% do parâmetro  $|G^*|_{sen\phi}$  (que representa a integridade do material), e o critério da máxima energia de pseudodeformação acumulada (Máx PSE) de Wang et al. (2015). Os resultados pelos dois critérios estão nas Tabela 34 (RTFOT) e Tabela 35 (PAV). A Figura 52 (RTFOT) e Figura 53 (PAV) mostram as curvas de fadiga pelos dois critérios, curvas de energia de pseudodeformação liberada e curvas C vs S com os pontos experimentais.

Tabela 34 - Número de ciclos até a falha pelos critérios 35% $|G^*|_{sen\phi}$  e Máx PSE, coeficientes da C vs. S, coeficientes A e B para construção das curvas de fadiga, e FFL19°C para ligantes após RTFOT

Ligantes (após RTFOT)	Máx PSE						35% $ G^* _{sen\phi}$					
	Nf	C vs. S		Nf vs. $\epsilon$		FFL <sub>19°C</sub> Máx PSE	Nf	C vs. S		Nf vs. $\epsilon$		FFL <sub>19°C</sub> 35% $ G^* _{sen\phi}$
		C1	C2	A	B			C1	C2	A	B	
30/45 A	1120	0,08305	0,50278	7,43E+05	-3,55726	1,528	630	0,06179	0,61114	7,90E+04	-3,55726	1,209
30/45 B	1160	0,09384	0,47486	2,01E+06	-3,97139	1,602	640	0,07246	0,57020	1,66E+05	-3,97139	1,276
50/70 PA 85	420	0,06448	0,67923	2,44E+04	-3,75095	1,041	430	0,06374	0,68616	2,71E+04	-3,75095	1,055
AMP 60/85 A	1260	0,07041	0,51076	3,15E+05	-2,87816	1,441	680	0,04962	0,63220	3,73E+04	-2,87816	1,162
AMP 60/85 B	2550	0,13347	0,34099	1,01E+08	-4,18765	2,098	750	0,07506	0,52163	4,69E+05	-4,18765	1,395
CAP 10/20	1220	0,10610	0,44865	1,63E+07	-4,86914	1,808	630	0,08148	0,54699	6,32E+05	-4,86914	1,384
CAP TLA	660	0,10811	0,50346	3,59E+05	-4,38785	1,346	540	0,10362	0,52461	1,36E+05	-4,38785	1,219

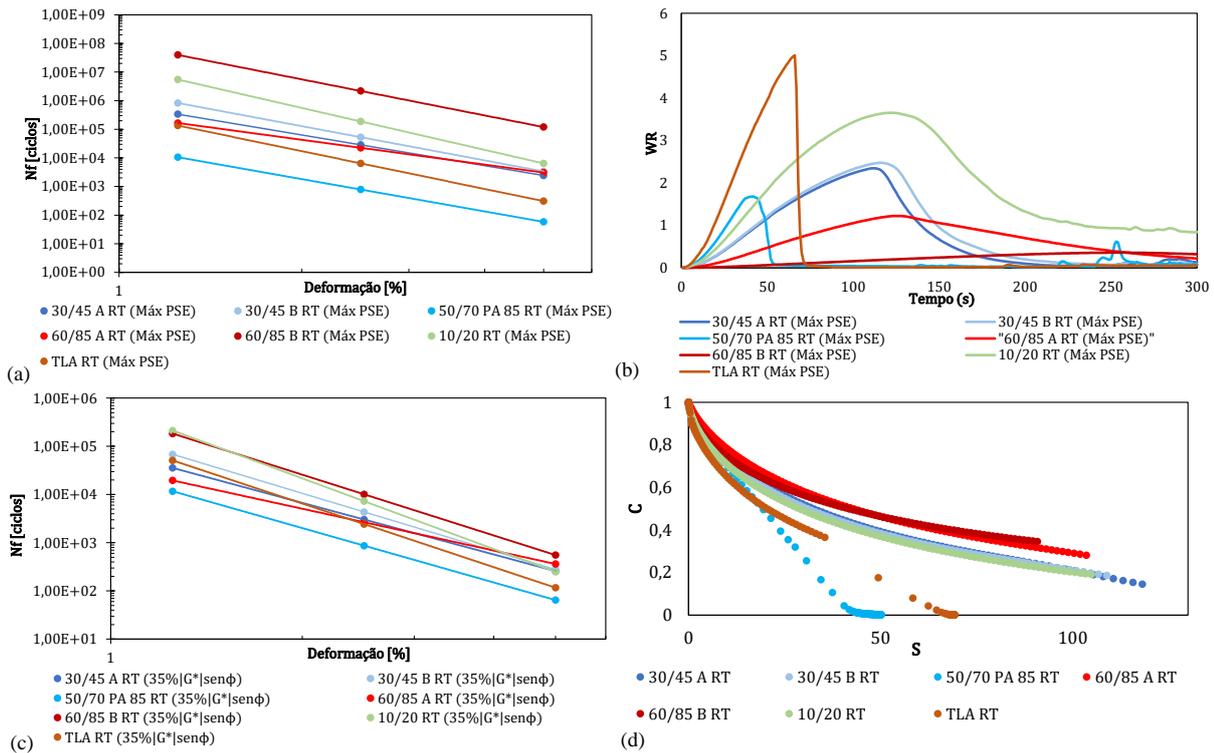
Fonte: Autora.

Tabela 35 - Número de ciclos até a falha pelos critérios 35%|G\*|senφ e Máx PSE, coeficientes da C vs. S, coeficientes A e B para construção das curvas de fadiga, e FFL19°C para ligantes após PAV

Ligante (após PAV)	Nf	Máx PSE				FFL <sub>19°C</sub> Máx PSE	35% G* senφ					
		C vs. S		Nf vs. ε			Nf	C vs. S		Nf vs. ε		FFL <sub>19°C</sub> 35% G* senφ
		C1	C2	A	B			C1	C2	A	B	
30/45 A	1110	0,09426	0,48304	3,65E+06	-4,38741	1,649	630	0,07235	0,58173	2,85E+05	-4,38741	1,315
30/45 B	1190	0,10317	0,45871	1,29E+07	-4,84376	1,780	660	0,08084	0,54831	7,79E+05	-4,84376	1,413
50/70 PA 85	260	0,09399	0,77119	4,71E+03	-4,27571	0,787	260	0,09399	0,77119	4,71E+03	-4,27571	0,787
AMP 60/85 A	1210	0,08368	0,49308	1,02E+06	-3,57005	1,543	650	0,05866	0,61976	8,92E+04	-3,57005	1,224
AMP 60/85 B	2870	0,17125	0,30611	1,38E+09	-5,13816	2,369	710	0,09225	0,50162	1,69E+06	-5,13816	1,492
CAP 10/20	1270	0,11281	0,43342	1,56E+08	-5,81863	2,033	690	0,08942	0,51781	5,11E+06	-5,81863	1,586
CAP TLA	1000	0,12135	0,45719	1,21E+07	-5,37735	1,731	580	0,09706	0,54755	7,46E+05	-5,37735	1,367

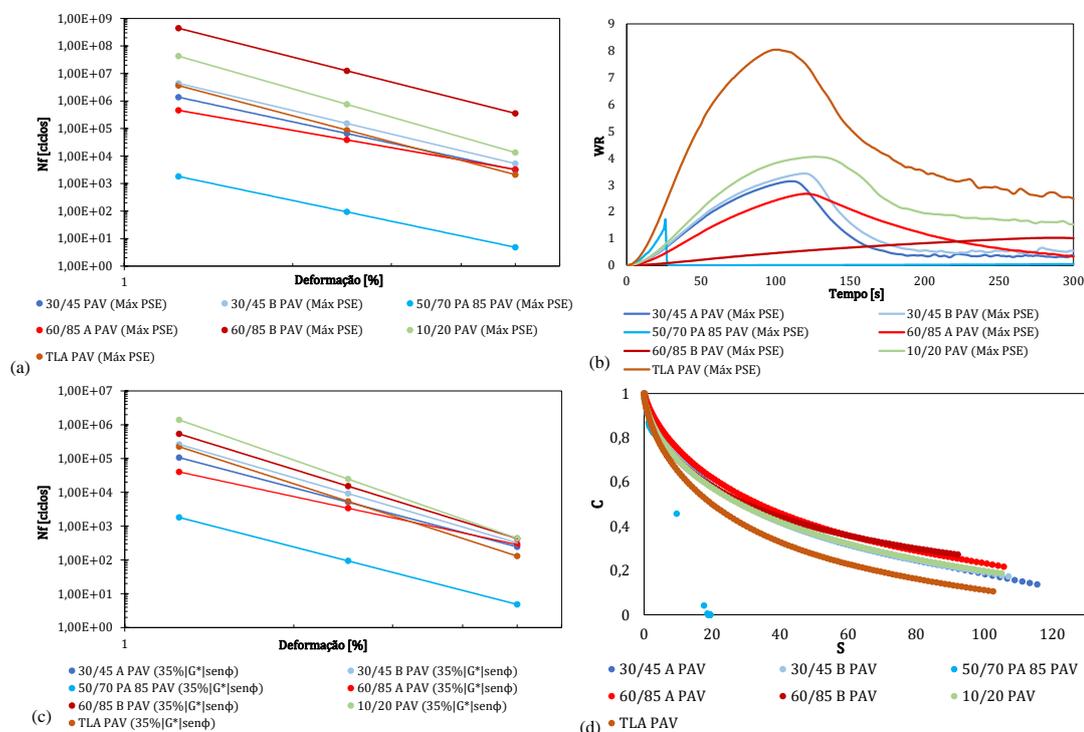
Fonte: Autora.

Figura 52 - LAS após RTFOT: (a) Curvas de fadiga pelo Máx PSE, (b) evolução de W<sup>R</sup>, (c) curvas de fadiga pelo 35%|G\*|senφ e (d) C vs S



Fonte: Autora.

Figura 53 - LAS após PAV: (a) Curvas de fadiga pelo Máx PSE, (b) evolução de WR, (c) curvas de fadiga pelo  $35\%|G^*|_{sen\phi}$  e (d) C vs S



Fonte: Autora.

### 3.3.4.2 Misturas asfálticas

A caracterização à fadiga das misturas asfálticas foi realizada por dois ensaios distintos: o ensaio de fadiga por compressão diametral e o ensaio uniaxial de fadiga por tração direta. O segundo conjunto de misturas não possui caracterização da fadiga, uma vez que o material foi destinado exclusivamente ao ensaio uniaxial cíclico de cargas repetidas (Flow Number).

O primeiro conjunto de misturas passou pelos dois ensaios. O ensaio de fadiga por compressão diametral foi realizado pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com a obtenção dos coeficientes do MeDiNa sendo realizada pela autora. Por outro lado, o ensaio uniaxial de fadiga por tração direta foi realizado pela autora no GEPPASV.

O ensaio de fadiga por compressão diametral gera um estado biaxial de tensões nas amostras, as quais sofreram aplicação de um carregamento com frequência de 60 ciclos por

minuto, sendo que, a cada segundo, 0,1 s são de carregamento e 0,9 s são de repouso. Segundo a norma DNIT 183/2018 - ME, os corpos de prova devem ter altura entre 40 mm e 70 mm e diâmetro de 100 mm, para agregados de tamanho nominal máximo de 25 mm (as amostras atenderam aos critérios, com altura em torno de 62 mm). O ensaio foi realizado à tensão controlada, no qual a deformação ao longo dos ciclos vai aumentando até a falha da amostra, e a 25°C.

Como o ensaio provoca um estado de tensões não homogêneo no material, é necessária uma maior quantidade de amostras para construir uma curva de fadiga confiável (pelo menos 12 amostras). Primeiramente foi obtida a resistência à tração por compressão diametral (RT), conforme descrito na seção de revisão da literatura. Posteriormente foi realizado o ensaio de fadiga, com diferentes grupos de tensão de tração aplicada (que é uma porcentagem do RT da mistura).

A Tabela 36 mostra os resultados de MR, RT, coeficientes k1 e k2 da Equação 7 do MeDiNa, bem como o FFM e a classe de fadiga segundo a metodologia do novo método de dimensionamento de pavimentos. A Figura 54 ainda mostra o resultado de número de ciclos para a falha (Nf) em função da tensão de tração aplicada.

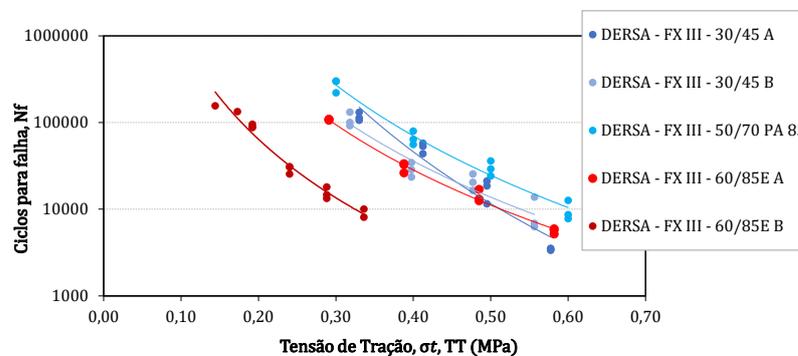
Tabela 36 - MR, RT, coeficientes k1 e k2 da Equação 7 do MeDiNa, FFM e classe de fadiga

Mistura	MR (MPa)	RT (MPa)	MeDiNa		FFM <sub>MeDiNa</sub>	Classe de fadiga
			k1	k2		
DERSA - FX III - 30/45 A	8978	1,65	1,76E-10	-3,355	1,193	4
DERSA - FX III - 30/45 B	8290	1,59	1,25E-19	-5,496	0,790	2
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	10491	2,00	2,90E-10	-3,244	1,112	4
DERSA - FX III - 60/85E A	6163	1,94	1,18E-14	-4,389	1,097	3
DERSA - FX III - 60/85E B	2015	0,96	3,26E-09	-3,325	1,652	4

Fonte: Adaptado do relatório do LAPAV/UFRGS (2022) e autora.

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga foi realizado à tração direta, tracionando a amostra e retornando-a até o valor zero, a 19°C e 10 Hz, segundo a AASHTO T 400 (2022) (Figura 55). Os corpos de prova possuem diâmetro de 100 mm e altura de 130 mm, com um volume de vazios de 5,5% ± 0,5%. As deformações variaram de 150 a 350 µm/m, a depender do tipo de ligante contido na mistura. Alguns corpos de prova com rigidez elevada foram ensaiados a 25°C para minimizar dificuldades na execução e leituras do ensaio.

Figura 54 - Ciclos de falha (Nf) em função da tensão de tração aplicada do ensaio de fadiga por compressão diametral para o primeiro conjunto de misturas de laboratório



Fonte: Autora.

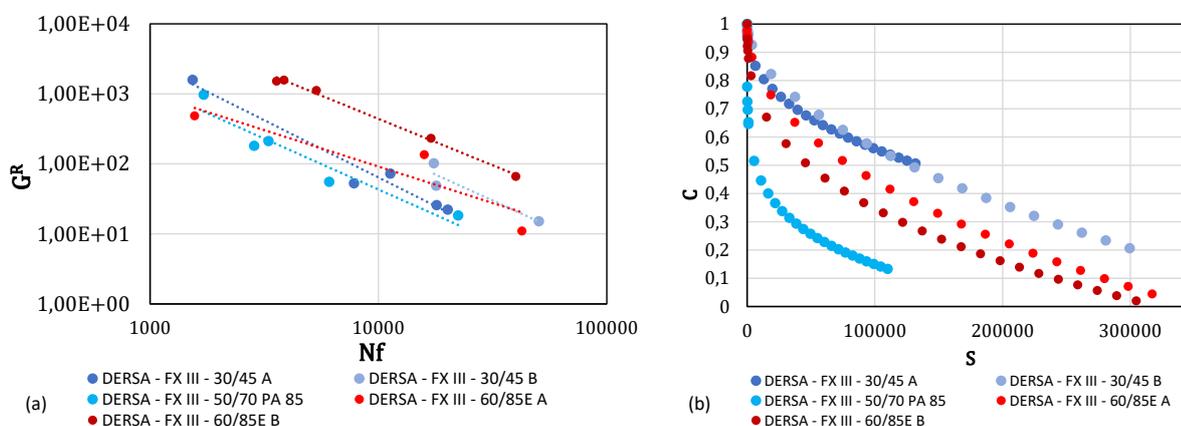
Após a aplicação do protocolo S-VECD, foram geradas as envoltórias de ruptura baseadas no  $G^R$  e as curvas características de dano dos materiais (Figura 56a e b). A Tabela 37 mostra os coeficientes da equação de Arrhenius da modelagem dos *shift factors* e coeficientes do modelo sigmoidal (ajuste matemático das curvas mestras de módulo dinâmico). Por fim, a Tabela 38 reúne os coeficientes das curvas C vs. S (por modelo de potência e exponencial), parâmetro de evolução do dano ( $\alpha$ ), e coeficientes das curvas  $G^R$  vs Nf, também para inserção no software FlexPAVE<sup>TM</sup> versão 1.1 Beta, conforme será mostrado na seção posterior.

Figura 55 - Amostra no ensaio de fadiga uniaxial à tração direta



Fonte: Autora.

Figura 56 – (a) Envoltórias de ruptura baseadas no critério de falha  $G^R$  e (b) curvas características de dano (C vs. S) para o primeiro conjunto de misturas de laboratório



Fonte: Autora.

Tabela 37 - Coeficientes da equação de Arrhenius e do modelo sigmoidal: inputs das propriedades LVE do software FlexPAVE™

Mistura	at Arrhenius			Sigmoidal			
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a	b	d	g
DERSA - FX III - 30/45 A	0,00071	-0,17357	3,13275	3,03209	4,50892	1,98999	0,47818
DERSA - FX III - 30/45 B	0,00003	-0,14458	2,87778	4,28308	3,16690	1,84645	0,56035
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	0,00073	-0,16376	2,94238	3,52999	3,95431	1,94037	0,52983
DERSA - FX III - 60/85E A	0,00072	-0,15875	2,84023	3,99218	3,48242	1,42254	0,56420
DERSA - FX III - 60/85E B	0,00096	-0,17133	3,02246	2,98002	4,55765	1,45579	0,35642

Fonte: Autora.

Tabela 38 - Coeficientes C11 e C12 do fitting das curvas Cvs.S e coeficientes  $\gamma$ ,  $\Delta$  e  $\alpha$

Mistura	Fitting curvas CxS (potência e exponencial)				Curva $G^R$ x Nf		$\alpha$
	C11	C12	a	b	$\gamma$	$\Delta$	
DERSA - FX III - 30/45 A	0,00429819	0,40241790	-0,0022	0,4840	222886128	-1,63538	2,87
DERSA - FX III - 30/45 B	0,00086978	0,54058864	0,0000	1,2042	137264014	-1,48011	3,28
DERSA - FX III - 50/70 PA 85	0,09090233	0,19429703	-0,0494	0,3091	27970371	-1,45299	2,92
DERSA - FX III - 60/85E A	0,00243293	0,47162915	-0,0001	0,7948	1338551	-1,04121	3,05
DERSA - FX III - 60/85E B	0,00991415	0,36384793	-0,0009	0,6278	87042453	-1,32436	3,48

Fonte: Autora.

### 3.4 ANÁLISE MECÂNICA DE PAVIMENTOS

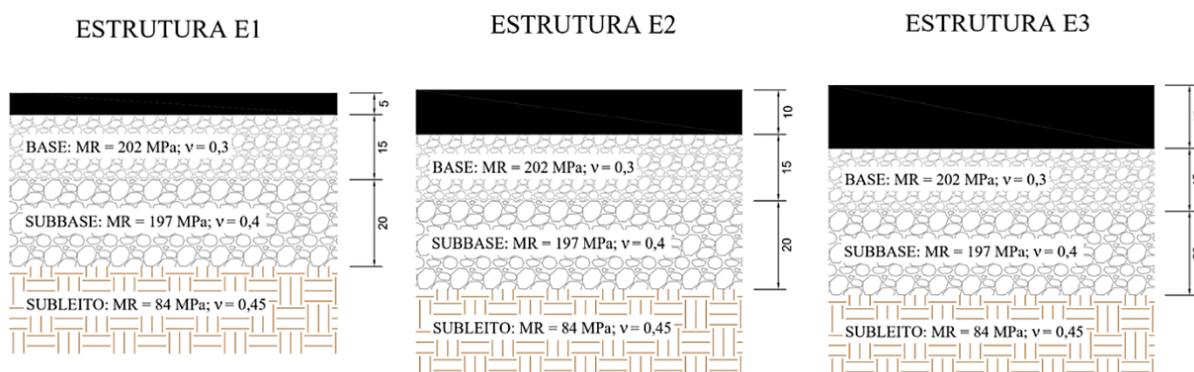
Visando avaliar o comportamento previsto das misturas asfálticas quando simuladas em um pavimento, foram realizadas simulações nos softwares MeDiNa (versão 1.1.5.0 de

dezembro/2020) e FlexPAVE™ (versão 1.1 Beta), para todo o primeiro conjunto de misturas. Uma vez que o foco deste trabalho é avaliar apenas o desempenho de diferentes misturas asfálticas, os materiais com dados de ensaios de fadiga (por compressão diametral e uniaxial de à tração-compressão) foram simulados para as 3 estruturas, com 3 níveis de tráfego distintos.

Para simulação de um pavimento típico nos programas MeDiNa e FlexPAVE™, foram utilizadas as mesmas estruturas propostas por Schuster (2018), e podem ser observadas na Figura 57. A composição das camadas e suas rigidezes foram adotadas com base no estudo e retroanálise de pavimentos reais feitas por Santos (2015), Scherer (2018), Bueno (2019) e Bordin (2020). A análise do dano por fadiga considerou estruturas novas em um período de projeto de 10 anos. Foi considerada uma base de brita graduada simples de 15 cm, módulo de 202 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3; sub-base granular de 20 cm, módulo de 197 MPa e coeficiente de Poisson de 0,4; e subleito com módulo de 84 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45. As espessuras de concreto asfáltico foram de 5 cm (E1), 10 cm (E2) e 15 cm (E3).

Cabe ressaltar que, uma vez que o objetivo é realizar a análise do desempenho à fadiga pelos dois programas, este trabalho não se atentou aos valores adicionais de caracterização de solos e materiais granulares no MeDiNa, os quais são utilizados na estimativa da deformação permanente.

Figura 57 - Estruturas consideradas na simulação de pavimentos



Fonte: Schuster (2018).

Nesta pesquisa optou-se por adequar o tráfego simulado às espessuras de concreto asfáltico, seguindo as recomendações do método de dimensionamento do DNER (atual DNIT)

(DNER, 1981). Essa adequação é uma prática consolidada nas obras rodoviárias e, portanto, foi adotada como ponto de partida na seleção das espessuras de revestimento e de níveis de tráfego, para a realização posterior da comparação entre os materiais. As espessuras mínimas para o revestimento betuminoso são apresentadas na Tabela 39. Para todas as estruturas foi considerada a sollicitação do eixo simples de rodas duplas de 80 kN, com pressão de inflação dos pneus de 0,80 MPa, dispostos em uma área de contato retangular com relação comprimento/largura de 1,5714 e velocidade de 60 km/h. A taxa de crescimento do tráfego foi considerada linear e fixada em 3%.

Tabela 39 - Espessuras mínimas de revestimento betuminoso segundo o método de dimensionamento do DNER (1981)

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: DNER (1981).

Para o revestimento de 5 cm foi considerado um número de sollicitações N acumulado de  $2,51 \times 10^6$  repetições (ou seja, um volume médio diário – VDM – de 600 veículos por dia). Já para a estrutura de 10 cm, considerou-se um N de  $1,5 \times 10^7$  repetições (VDM de 3500) e para 15 cm um N de  $5,0 \times 10^7$  (VDM de 11950). A Figura 58 esquematiza o tráfego utilizado nas simulações. Assim, foram contemplados volumes de tráfego moderado, alto e muito alto (muito pesado), segundo a classificação de Ceratti, Bernucci e Soares (2015).

Para as simulações no MeDiNa, as camadas asfálticas foram inseridas com seu módulo de resiliência, e k1 e k2 das curvas de fadiga pelo ensaio por compressão diametral. As simulações foram realizadas para um Sistema Arterial Primário, com nível de confiabilidade de 85% nas análises. A Figura 59a, b e c mostra a evolução da área trincada prevista pelo MeDiNa em função do tráfego acumulado (função de transferência adaptada de Fritzen, 2016), para as 3 estruturas simuladas, e a Figura 59d o mesmo parâmetro ao longo do período de projeto. A evolução numérica de AT% prevista está apresentada no Apêndice F.

Como mencionado, foi utilizada a versão 1.1 Beta do software FlexPAVE<sup>TM</sup>, originalmente conhecida como LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses*). Assim, os dados de clima foram obtidos pelo banco de dados do próprio

software (*Enhanced Integrated Climate Model - EICM*), para a cidade de San Diego (Califórnia), uma vez que, ao longo de um ano, a temperatura de San Diego pode variar entre 9°C e 25°C, enquanto na região Sul do Brasil a temperatura varia normalmente de 9°C a 31°C (NASCIMENTO, 2015), sendo similares nesse aspecto. A área trincada foi calculada por duas funções de transferência de Nascimento, nas versões de 2015 e de 2021.

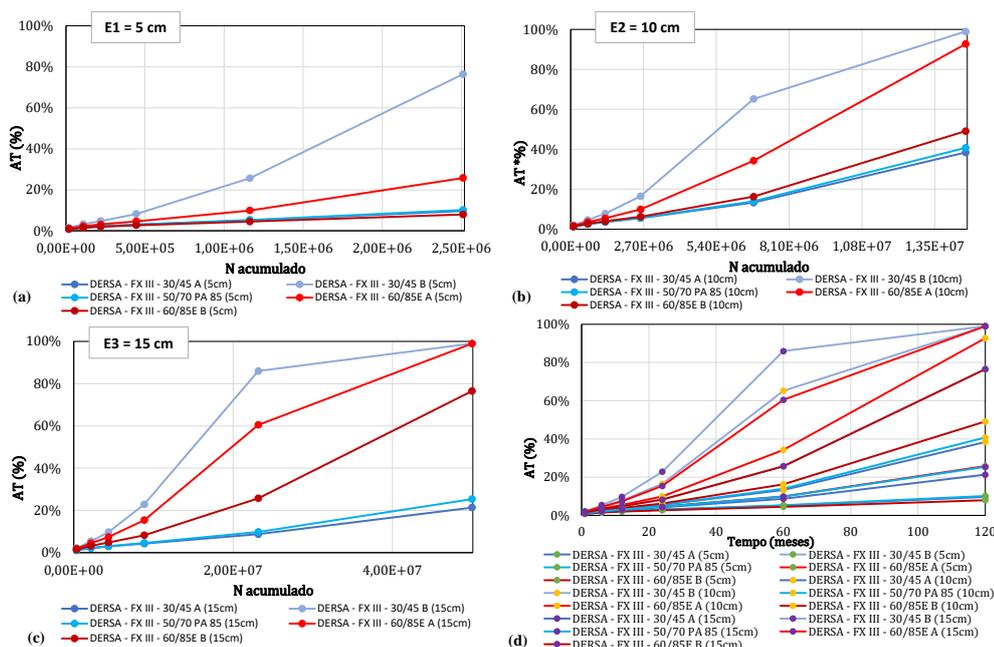
Figura 58 - Esquema de consideração do tráfego para as simulações de pavimentos

EIXO PADRÃO	ESTRUTURA 1	ESTRUTURA 2	ESTRUTURA 3
ESRD 80 kN Pressão pneu 0,8 MPa	CA = 5 cm	CA = 10 cm	CA = 15 cm
VDM	600	3500	11950
Taxa de crescimento (linear - %)	3	3	3
N acumulado (T = 10 anos)	2,51.10 <sup>6</sup>	1,5.10 <sup>7</sup>	5,0.10 <sup>7</sup>
Classificação Ceratti, Bernucci e Soares (2015)	Tráfego moderado	Tráfego pesado	Tráfego muito pesado

Nota: as demais camadas estruturais não variam entre as 3 estruturas

Fonte: Autora.

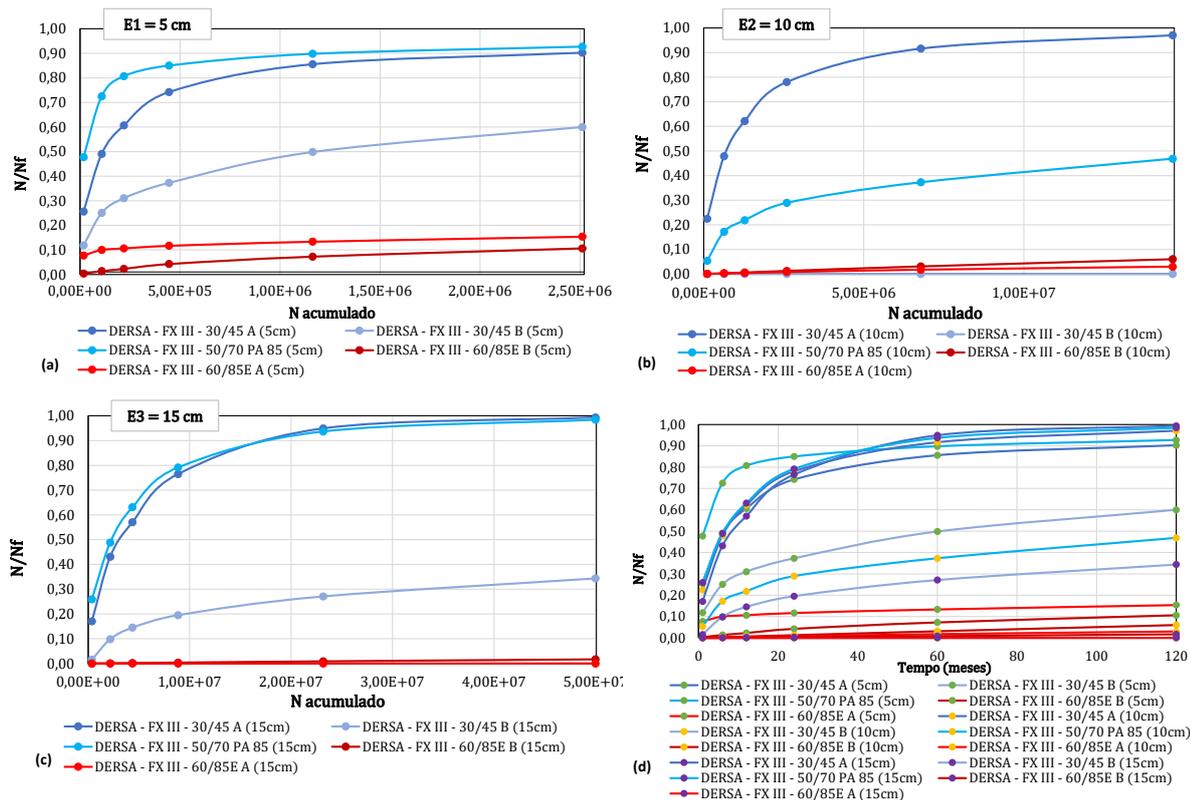
Figura 59 - Evolução da área trincada prevista pelo MeDiNa: (a) E1 = 5 cm pelo tráfego acumulado, (b) E2 = 10 cm pelo tráfego acumulado, (c) E3 = 15 cm pelo tráfego acumulado e (d) todas as estruturas ao longo do período de 10 anos, para o primeiro conjunto de misturas



Fonte: Autora.

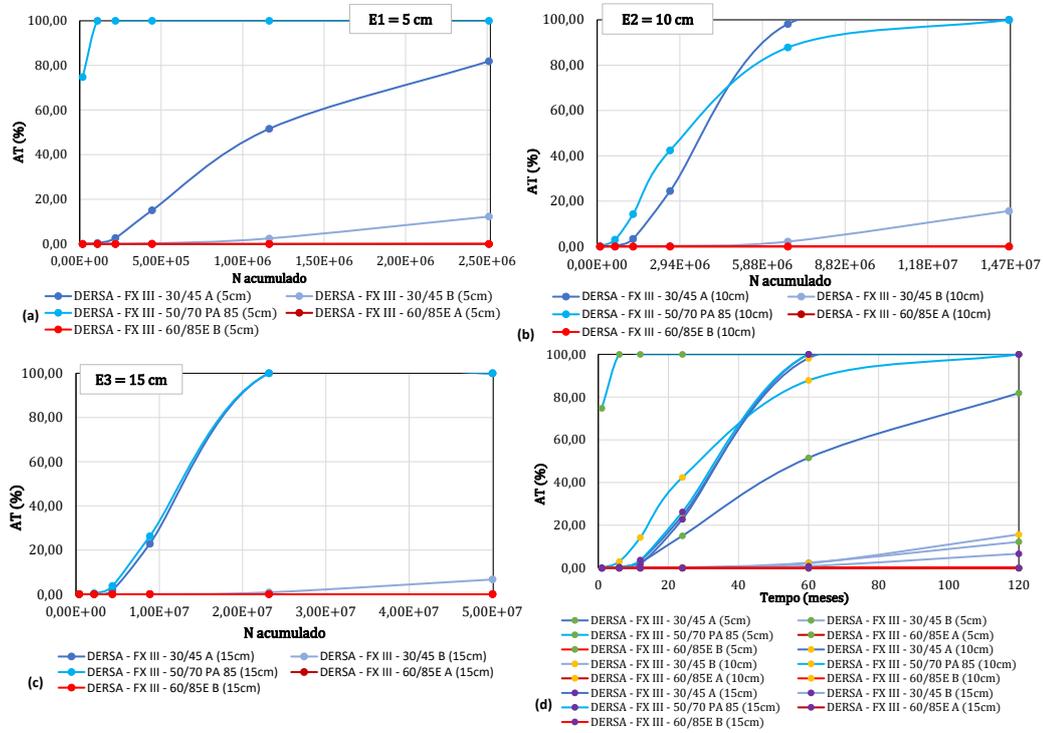
A Figura 60a, b e c mostram a evolução do dano médio acumulado em função do tráfego acumulado, para as 3 estruturas simuladas, e a Figura 60d o mesmo parâmetro ao longo do período de projeto. No Apêndice E estão apresentados os contornos de dano para os meses 1, 6, 12, 24, 60 e 120. A Figura 61a, b, c e d trazem a evolução da área trincada simulada pela função de transferência de Nascimento (2015) e a Figura 62a, b e c pela função de transferência de Nascimento (2021), como forma de permitir a comparação entre os resultados. O Apêndice F traz os valores numéricos de evolução do dano médio acumulado, e de área trincada pelas duas funções de transferência, para o primeiro conjunto de misturas.

Figura 60 - Evolução do dano pelo FlexPAVE™: pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e ao longo de 10 anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas



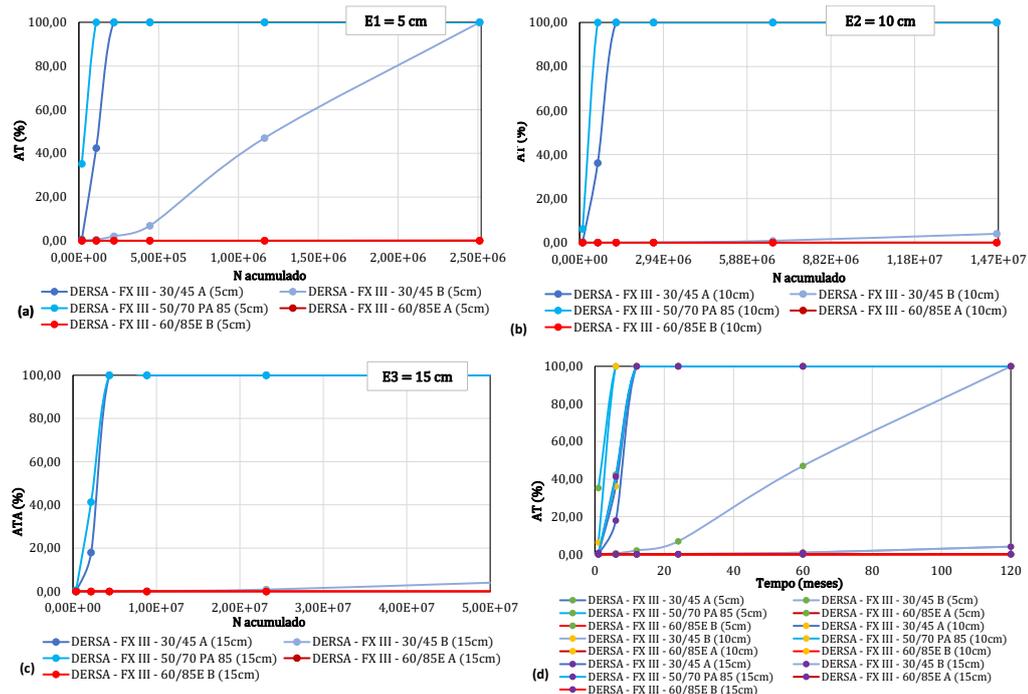
Fonte: Autora.

Figura 61 - AT prevista pela função de transferência de Nascimento (2015): pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e pelos 10s anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas



Fonte: Autora.

Figura 62 - AT prevista pela função de transferência de Nascimento (2021): pelo tráfego acumulado (a) E1 = 5 cm, (b) E2 = 10 cm, (c) E3 = 15 cm e pelos 10s anos (d) todas as estruturas, para o primeiro conjunto de misturas



Fonte: Autora.

#### 4 ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados foi estruturado com base em uma leitura geral de todos os trabalhos do GEPPASV, como forma de identificar as propostas dos estudos, ensaios e análises realizadas. Dessa forma, buscou-se elencar as características que pudessem descrever de forma completa as misturas de cada pesquisa.

Além disso, foram inseridas novas informações que não constam no corpo dos trabalhos compilados, como índices de rigidez, sendo necessária a busca desses dados em apêndices ou diretamente com os autores. A Figura 63 discretiza os dados inclusos nas seções de “características gerais” e “ligantes asfálticos”. Para descrever o comportamento na escala dos ligantes, foram inclusos dados de ensaios convencionais, em geral fornecidos pelos laudos das empresas fornecedoras, dados de rigidez (nos quais foram inseridos novos índices com potencial correlação com dados de danificação de ligantes e misturas), e parâmetros de ensaios de danificação em ligantes (MSCR e LAS), em diferentes condições de envelhecimento.

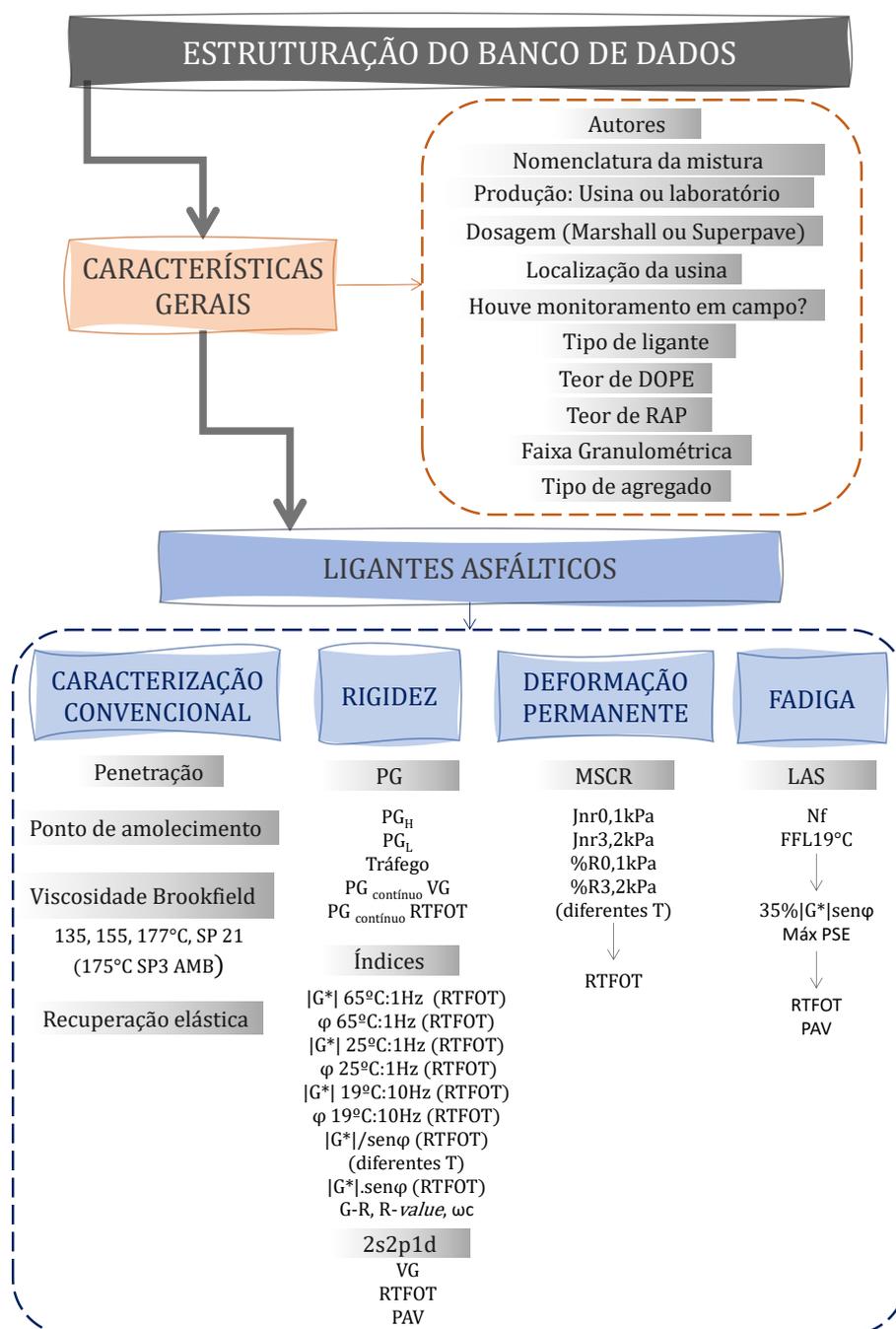
A Figura 64 traz os parâmetros inclusos nas seções de “características dos agregados”, “propriedades volumétricas e de dosagem das misturas” e “rigidez das misturas”. A respeito dos agregados, foram inclusos dados como abrasão Los Angeles, absorção, equivalente de areia e sanidade. O restante das características elencadas foi dividido entre diferentes frações de agregados, bem como para a mistura dos mesmos.

Quanto às propriedades volumétricas e de dosagem das misturas, foram elencadas as propriedades que se julgou mais influentes no comportamento da mistura asfáltica final, como teor de ligante, densidade máxima medida (DMM), teor de cal e porcentagem passante em 3 peneiras de controle. Cabe ressaltar que, para as misturas de campo, optou-se por incluir o teor de projeto a título de informação. No entanto, foi adicionado um novo item para o teor realmente utilizado na mistura, sendo esse o mesmo item do teor de ligante adicionado nas misturas de laboratório. Ainda a respeito desse parâmetro, para misturas com RAP, o teor de ligante considerado foi o ligante total (ligante do RAP + ligante novo adicionado).

Quanto à rigidez das misturas, o banco de dados conta com dados de módulo de resiliência, seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação. Da mesma forma que para os ligantes, foram inclusos novos índices de rigidez a serem testados, com base no que foi observado nos trabalhos atuais em andamento do GEPPASV, bem como na literatura. A

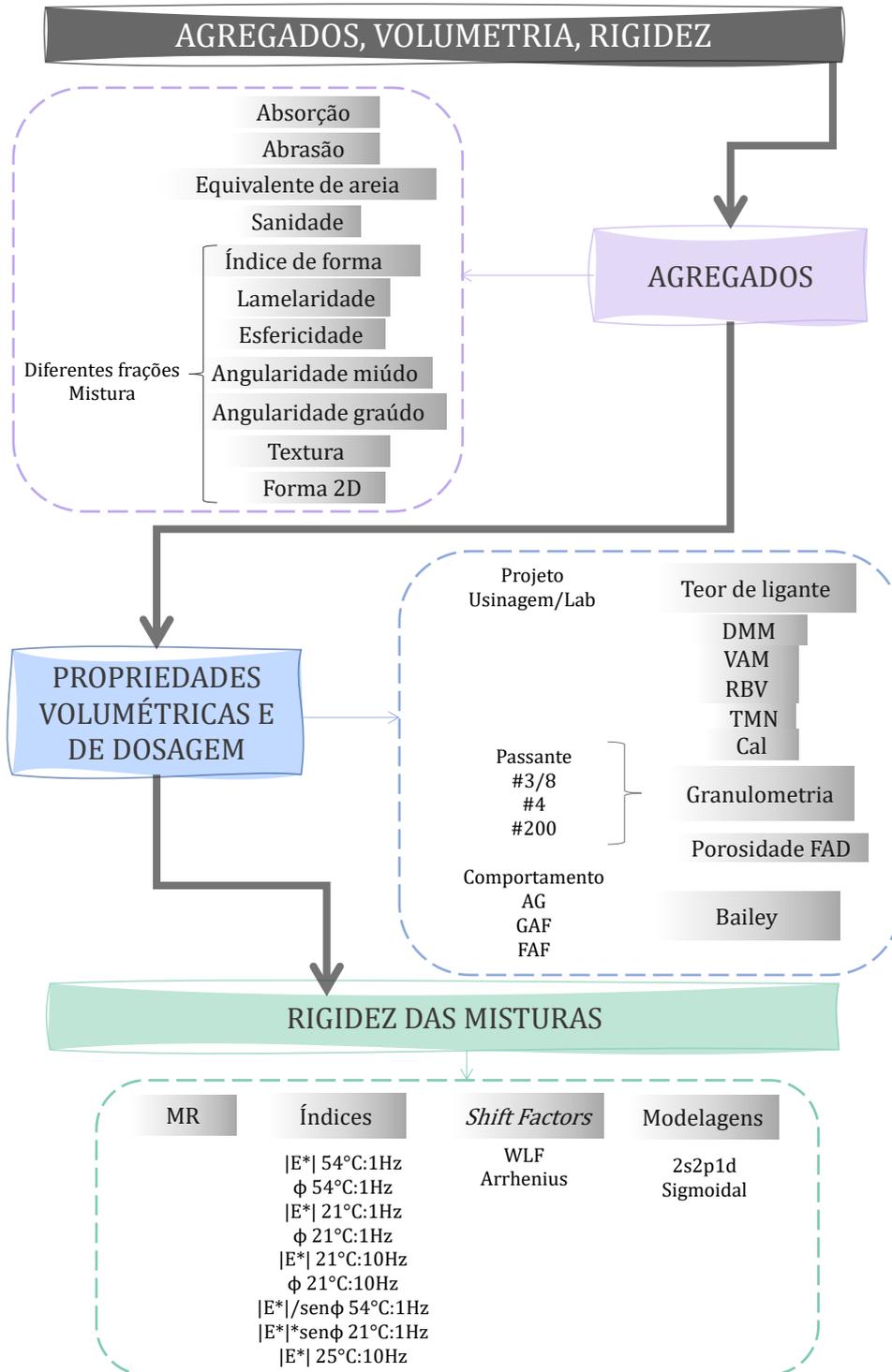
consideração da dependência da temperatura se deu pela inclusão dos coeficientes da modelagem dos *shift factors*, por duas equações distintas, e da viscoelasticidade pelos coeficientes da modelagem dos dados experimentais (pelo modelo sigmoidal e pelo análogo mecânico 2s2p1d).

Figura 63 - Estruturação do banco de dados: características gerais e ligantes asfálticos



Fonte: Autora.

Figura 64 - Estruturação do banco de dados: agregados, volumetria, dosagem e rigidez das misturas



Fonte: Autora.

A Figura 65 mostra os dados incluídos no banco de dados referentes à danificação das misturas asfálticas. O primeiro conjunto se refere aos dados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, como o próprio valor de RT (incluindo desvio padrão e coeficiente de variação) e a tenacidade. Em seguida, foram inseridos os itens referentes ao efeito deletério da água: a resistência retida a tração e a adesividade visual.

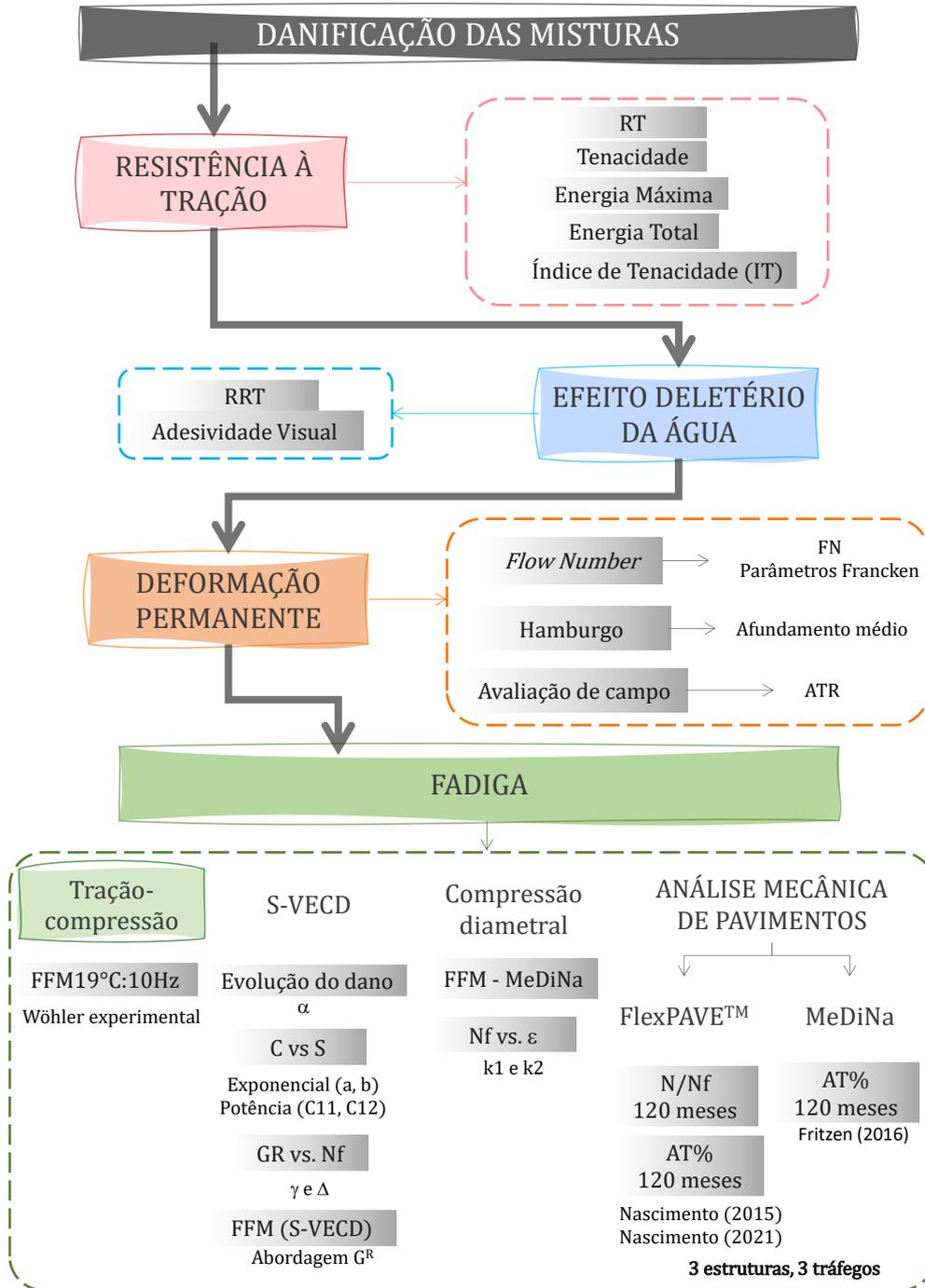
O terceiro conjunto dessa figura mostra os dados de deformação permanente em misturas. Foram inseridos o valor do *Flow Number*, e os parâmetros do modelo de Francken. Quanto ao ensaio de Hamburgo, foi considerado o valor de afundamento médio em milímetros, e dos trabalhos com monitoramento de campo foi obtido o ATR medido nos pavimentos.

A última seção da Figura 65 se refere à caracterização do dano por fadiga das misturas asfálticas. A partir dos dados do ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão foram retirados os Fatores de Fadiga da Mistura (FFM) pelas curvas de Wöhler experimentais. Cabe ressaltar que nem todas as novas misturas inseridas no banco de dados por esta pesquisa contam com o valor de FFM pelos dados experimentais, uma vez que, quando eram observadas rigidezes muito elevadas, os corpos de prova eram ensaiados a 25°C e não a 19°C.

A partir da modelagem S-VECD, foram obtidos o parâmetro de evolução do dano, constantes de regressão da curva C vs. S e das envoltórias de ruptura, bem como um novo FFM a partir das curvas de Wöhler simuladas com base na abordagem do  $G^R$ , conforme a equação de Nascimento (2016). Ainda, a partir do ensaio de fadiga por compressão diametral, foi incluso um terceiro FFM, chamado de FFM MeDiNa, e os parâmetros de regressão das curvas de fadiga Nf vs.  $\epsilon$  ( $k_1$  e  $k_2$ ).

Por fim, como forma de permitir a avaliação das diferenças entre misturas asfálticas, serão inclusos parâmetros das simulações descritas na seção anterior. Quanto ao software FlexPAVE<sup>TM</sup>, foram obtidos os dados de dano em 120 meses, e área trincada no mesmo período, calculada pelas funções de transferência de Nascimento (2015) e Nascimento (2021). Para o MeDiNa, foi inclusa a área trincada em 120 meses já calculada pelo programa, pela adaptação da equação de Fritzen (2016). Mesmo que a equação não seja idêntica à desenvolvida pelo autor, o parâmetro foi referenciado por seu trabalho. Como mencionado, todas as misturas do banco de dados que contarem com esses ensaios de fadiga foram simuladas em 3 estruturas diferentes e com 3 níveis de tráfego adequados à cada espessura de revestimento.

Figura 65 - Estruturação do banco de dados: parâmetros de danificação das misturas



Fonte: Autora.

A construção do banco de dados do GEPPASV contou com a inserção de misturas asfálticas estudadas por diferentes autores desde o ano de 2014. Dentre essas misturas, foram selecionadas apenas aquelas misturadas a quente, com ou sem material reciclado oriundo da fresagem de camadas asfálticas antigas (*Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*), e não foram inseridos trabalhos que estudaram misturas mornas ou frias. A maioria das pesquisas do GEPPASV dedicaram-se ao estudo de misturas asfálticas a quente, e esse é o tipo de material mais comum na prática de engenharia.

Diversas informações foram inseridas na planilha eletrônica que não servirão necessariamente para análise estatística dos dados, como é o caso das informações gerais de cada mistura. No entanto, a estruturação desse banco de dados não objetiva apenas fornecer dados para as análises desta pesquisa, que contribuirá para uma visão mais geral acerca das misturas e ligantes asfálticos, mas também visa a organização da produção científica do grupo em um único lugar. Dentro dessas informações gerais constam a produção da mistura (usina ou em laboratório), a localização da usina (no caso de misturas de campo), a dosagem utilizada (Marshall ou Superpave), se houve algum tipo de monitoramento em campo, o tipo de ligante asfáltico utilizado, a faixa granulométrica e o tipo de agregado.

Juntamente com as novas misturas asfálticas inseridas pela autora, o banco de dados conta atualmente com 178 misturas asfálticas. No entanto, os objetivos da pesquisa de cada autor são diversos, os quais acompanharam a evolução do conhecimento do grupo, com aquisição de equipamentos mais robustos e implantação de ensaios cada vez mais atuais. Dessa forma, as misturas asfálticas não possuem todas as informações dentro dos tópicos da estrutura proposta para o banco de dados, estando limitadas ao escopo de cada pesquisa de origem. Além disso, o GEPPASV ainda conta com estudos dedicados exclusivamente ao entendimento dos ligantes asfálticos, os quais não foram inseridos nesta pesquisa visto que cada linha do banco de dados foi indexada pelo nome da mistura asfáltica final. Assim, todos os dados de ligantes asfálticos estão vinculados a uma mistura. O grupo também vem desenvolvendo novas pesquisas com a modificação de ligantes em laboratório, utilizando polímero SBS (DIAS, 2023) ou materiais alternativos como a borracha (WEGENER, 2023) e o plástico (NUNES-RAMOS, 2022). Esses dados também não foram inseridos, pois esse tipo de estudo ainda é muito recente no GEPPASV e não há dados suficientes sobre tais materiais.

A Tabela 40 mostra a quantidade de dados obtidos para cada parâmetro do banco de dados. É possível observar que há menos dados de caracterização de ligantes asfálticos, uma

vez que os primeiros estudos do grupo ainda não contavam com equipamentos necessários a esse tipo de investigação. No entanto, estudos mais recentes do GEPPASV demonstraram a importante contribuição do ligante asfáltico no comportamento da mistura final (ALMEIDA JR., 2022; NASCIMENTO, 2023; PIRES et al., 2022; POSSEBON, 2018, 2021; SCHUSTER, 2023), fazendo com que as novas pesquisas desenvolvidas contassem também com a caracterização mais completa dos ligantes. A maior parte das informações sobre ligantes asfálticos dizem respeito à caracterização convencional, requerida pelas especificações brasileiras e, portanto, o acesso fica facilitado uma vez obtidos os laudos dos materiais.

Com o avanço do conhecimento pelos pesquisadores, passaram a ser desenvolvidos ensaios de varredura de frequência e modelagens matemáticas em ligantes. Vale ressaltar que dados de ensaios de danificação ainda não existem em grande quantidade no grupo, visto que o ensaio de MSCR para deformação permanente é recente na especificação Superpave e o ensaio de LAS para a fadiga está limitado às pesquisas, e não há um consenso sobre a melhor metodologia para avaliação desse defeito em ligantes asfálticos.

Além disso, alguns índices como o G-R, *R-value* e a frequência de *crossover* ( $\omega_c$ ) também são parâmetros recentemente testados como potenciais indicadores do comportamento dos ligantes (ALMEIDA JR., 2022; SCHUSTER, 2023), fazendo com que ainda não haja uma quantidade significativa desses dados. Somando-se aos trabalhos citados, tais parâmetros foram calculados para os novos ligantes dessa pesquisa. Quanto aos agregados, são pouco ou inexistentes os dados de angularidade, lamelaridade, esfericidade, textura e forma 2D para algumas frações. Para propriedades apresentadas pelos autores de forma separada nas diferentes frações, foi obtida a média ponderada pela quantidade de cada fração na mistura final. Os parâmetros do método Bailey de composição de agregados também se limitaram a poucas pesquisas.

No que se refere às correlações entre escalas, foi observado que há poucas medidas de afundamento em trilha de roda em campo, sendo esta uma investigação que será realizada em pesquisas futuras com a avaliação de novos trechos monitorados. Quanto ao ensaio de Hamburgo para deformação permanente, também há uma quantidade limitada de dados no grupo, e as análises das misturas avaliadas por esse ensaio já estão bem estabelecidas nos trabalhos dos respectivos autores. Pesquisas futuras, no entanto, contarão também com os dados desse ensaio.

Tabela 40 - Quantidade de dados por propriedade

Propriedade	Qtd. de dados	Propriedade	Qtd. de dados	Propriedade	Qtd. de dados
Teor DOPE	178	Jnr 0.1 RT 76°C	16	MR	116
Teor RAP	178	Jnr 0.1 RT PG	40	E* 54°C:1Hz	134
Penetração	170	Jnr 3.2 RT 58°C	20	φ54°C:1Hz	133
Ponto de Amolecimento	162	Jnr 3.2 RT 64°C	73	E* 21°C:1Hz	136
Brookfield 135°C VG	154	Jnr 3.2 RT 70°C	26	φ21°C:1Hz	136
Brookfield 150°C VG	154	Jnr 3.2 RT 76°C	16	E* 21°C:10Hz	136
Brookfield 177°C ou 175°C VG	160	Jnr 3.2 RT PG°C	64	φ21°C:10Hz	136
Recuperação elástica	75	R% 0.1 RT 58°C	18	E* senφ54°C:1Hz	134
PG alta temperatura	105	R% 0.1 RT 64°C	52	E* senφ21°C:1Hz	136
Tráfego PG	86	R% 0.1 RT 70°C	26	E* 19°C:10Hz	130
PG baixa temperatura	53	R% 0.1 RT 76°C	16	φ19°C:10Hz	125
PG contínuo RT	72	R% 0.1 RT PG	40	E00	125
PG contínuo VG	43	R% 3.2 RT 58°C	18	E0	125
G* 65°C:1Hz RT	72	R% 3.2 RT 64°C	72	k mix	125
φ65°C:1Hz RT	72	R% 3.2 RT 70°C	26	h mix	125
G* 25°C:1Hz RT	52	R% 3.2 RT 76°C	16	δ mix	125
φ25°C:1Hz RT	52	R% 3.2 RT PG	40	τ mix	125
G* 19°C:10Hz RT	74	Absorção	143	β mix	125
φ19°C:10Hz RT	72	Abrasão Los Angeles	148	C1 (WLF) mix	137
G-R VG	9	Equivalente de areia	136	C2 (WLF) mix	137
G-R RT	9	Sanidade	151	a sigmoidal mix	88
G-R PAV	9	Índice de forma #1/2	6	b sigmoidal mix	88
R-value VG	9	Índice de forma #3/4	83	d sigmoidal mix	88
R-value RT	9	Índice de forma #3/8	60	g sigmoidal mix	88
R-value PAV	9	Índice de forma Mistura	77	a1 Arrhenius mix	83
Freq. Crossover ω <sub>c</sub> VG	7	Lamelaridade #1/2	6	a2 Arrhenius mix	83
Freq. Crossover ω <sub>c</sub> RT	7	Lamelaridade #3/4	87	a3 Arrhenius mix	83
Freq. Crossover ω <sub>c</sub> PAV	7	Lamelaridade #3/8	64	RT	159
G* senφ 58°C RT	26	Lamelaridade Mistura	63	Tenacidade	62
G* senφ 64°C RT	38	Esfericidade #1	3	Energia máxima	56
G* senφ 70°C RT	51	Esfericidade #3/4	30	Energia total	56
G* senφ 76°C RT	34	Esfericidade #3/8	34	Índice de Tenacidade	62
G* senφ 82°C RT	13	Esfericidade pó	26	RRT	73
G* senφ 19°C RT	24	Esfericidade Mistura	46	Adesividade visual	59
G* senφ 22°C RT	24	Esfericidade Classif.	0	Flow Number	146
G* senφ 25°C RT	24	Angularidade miúdo # 1	0	A Francken	105
G00 VG	29	Angularidade miúdo #3/4	0	B Francken	105
G0 VG	29	Angularidade miúdo # 3/8	28	C Francken	105
k CAP VG	29	Angularidade miúdo pó grosso	24	D Francken	105
h CAP VG	29	Angularidade miúdo pó fino	7	Afundamento Hamburgo	11
δ CAP VG	29	Angularidade miúdo Mistura	28	ATR/N <sub>USACE</sub>	28
τ CAP VG	29	Angularidade miúdo Classif.	30	FFM Wöhler Experimental	66
β CAP VG	29	Angularidade graúdo #1	3	α S-VECD	125
C1 (WLF) CAP VG	29	Angularidade graúdo #3/4	33	a (C vs. S exponencial)	119
C2 (WLF) CAP VG	29	Angularidade graúdo #3/8	33	b (C vs. S exponencial)	118
G00 RT	72	Angularidade graúdo pó	25	C11 (C vs. S potência)	102
G0 RT	72	Angularidade graúdo Mistura	46	C12 (C vs. S potência)	102
k CAP RT	72	Angularidade graúdo Classif.	48	γ S-VECD	126
h CAP RT	72	Textura #1	3	Δ S-VECD	126
δ CAP RT	72	Textura #3/4	33	FFM S-VECD	117
τ CAP RT	72	Textura # 3/8	34	N/N <sub>f120meses</sub> (5 cm)	125
β CAP RT	72	Textura pó	26	N/N <sub>f120meses</sub> /N <sub>FlexPAVE</sub> (5 cm)	125
C1 (WLF) CAP RT	66	Textura Mistura	46	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015 (5 cm)	125
C2 (WLF) CAP RT	66	Textura Classif.	46	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015/N <sub>FlexPAVE</sub> (5 cm)	125
G00 PAV	21	Forma 2D #3/8	28	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021 (5 cm)	125
G0 PAV	21	Forma 2D pó grosso	24	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021/N <sub>FlexPAVE</sub> (5 cm)	125
k CAP PAV	21	Forma 2D pó fino	7	N/N <sub>f120meses</sub> (10 cm)	125
h CAP PAV	21	Forma 2D Mistura	46	N/N <sub>f120meses</sub> /N <sub>FlexPAVE</sub> (10 cm)	125
δ CAP PAV	21	Forma 2D Classif.	48	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015 (10 cm)	125
τ CAP PAV	21	Teor CAP projeto	44	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015/N <sub>FlexPAVE</sub> (10 cm)	125
β CAP PAV	21	Teor CAP usinagem/laborat.	178	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021 (10 cm)	125
C1 (WLF) CAP PAV	21	DMM	130	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021/N <sub>FlexPAVE</sub> (10 cm)	125
C2 (WLF) CAP PAV	21	VAM	148	N/N <sub>f120meses</sub> (15 cm)	125
Nf (LAS) RT (35% G* senφ)	21	RBV	148	N/N <sub>f120meses</sub> /N <sub>FlexPAVE</sub> (15 cm)	125
Nf (LAS) RT (máxPSE)	30	TMN	146	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015 (15 cm)	125
FFL19°C RT (35% G* senφ)	41	Passante #3/8	169	AT <sub>120meses</sub> Nasc2015/N <sub>FlexPAVE</sub> (15 cm)	125
FFL19°C RT (máxPSE)	62	Passante #4	169	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021 (15 cm)	125
Nf (LAS) PAV (35% G* senφ)	23	Passante #200	169	AT <sub>120meses</sub> Nasc2021/N <sub>FlexPAVE</sub> (15 cm)	125
Nf (LAS) PAV (máxPSE)	23	Teor de Cal	152	AT MeDiNa <sub>120meses</sub> (5 cm)	23
FFL19°C PAV (35% G* senφ)	13	Porosidade FAD	78	AT MeDiNa <sub>120meses</sub> (10 cm)	23
FFL19°C PAV (máxPSE)	13	Comportamento Bailey	58	AT MeDiNa <sub>120meses</sub> (15 cm)	23
Jnr 0.1 RT 58°C	20	AG Bailey	84	FFM MeDiNa	21
Jnr 0.1 RT 64°C	53	GAF Bailey	84	k1 MeDiNa	23
Jnr 0.1 RT 70°C	26	FAF Bailey	84	k2 MeDiNa	23

Fonte: Autora.

Cabe ressaltar que as nomenclaturas das misturas foram mantidas inalteradas, ou seja, permaneceram com o nome escolhido por cada autor. Essa escolha foi tomada com o objetivo de evitar a perda de informações relevantes sobre as misturas ao observá-las nas análises finais, que geralmente estão contidas no nome das mesmas. Essas informações variam com o objetivo das pesquisas de origem, e podem conter o tipo de dosagem, o tipo de ligante asfáltico, a faixa granulométrica, o método de composição dos agregados, o tamanho máximo nominal do agregado, o teor de RAP, o tipo e/ou teor de cal e o PG de alta temperatura do ligante. Essas informações podem dar indícios acerca das características das misturas que influenciaram nos resultados encontrados.

A grande maioria dos dados foram obtidos diretamente dos textos de cada pesquisa, disponíveis no repositório digital da UFSM. No entanto, partindo dos itens propostos na estruturação dos dados, especialmente no que se refere a índices de viscoelasticidade linear, foi necessário solicitar planilhas eletrônicas com informações adicionais diretamente aos autores.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção traz as análises realizadas a partir do banco de dados estruturado. A seção 5.1 trata dos materiais asfálticos em escalas separadas (ligantes e misturas), e tratando os defeitos separadamente (deformação permanente e fadiga). A seção 5.2 traz as correlações entre escalas, divididas em deformação permanente e fadiga, e, por fim, a seção 5.3 reúne a classificação geral dos ligantes e misturas asfálticas considerando conjuntamente os dois defeitos.

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS SEGUNDO DIFERENTES CRITÉRIOS

A primeira investigação foi realizada considerando separadamente as escalas de ligantes e misturas asfálticas, assim como os danos por deformação permanente e fadiga. Inicialmente, foram escolhidos dois indicadores das misturas asfálticas para descrever o comportamento frente a esses defeitos, e para serem utilizados na identificação das características individuais dos ligantes e das misturas com potencial de se correlacionarem com esses índices.

Não foram utilizados dados de campo, uma vez que, em relação à deformação permanente, existem poucas medidas de afundamento em trilha de roda no banco de dados do GEPPASV. Quanto à fadiga, não é possível isolar o efeito da mistura asfáltica para atingir os objetivos desta pesquisa, pois é um defeito associado também à condição estrutural do pavimento, fazendo com que as medidas de área trincada em campo não fiquem associadas somente à mistura. Embora as simulações de pavimentos tenham sido realizadas para a obtenção do dano por fadiga e da área trincada simulada, nesse momento a fadiga será tratada de forma semelhante à deformação permanente, ou seja, utilizando um indicador de danificação da mistura.

Para a seleção inicial das características a serem utilizadas na classificação dos ligantes e misturas asfálticas, observou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, que mede a força da correlação linear entre as duas variáveis. Uma vez que se trata de uma análise exploratória, para identificação inicial dos parâmetros com potencial associação aos índices das misturas, o coeficiente de correlação linear pode fornecer um indicativo para esse fim.

Assim, não foi verificada a normalidade dos dados nesse momento, uma vez que não está sendo realizada nenhuma inferência estatística.

No entanto, é necessário considerar que muitos parâmetros possuem um número pequeno de amostras, ou ainda podem apresentar uma variabilidade maior, sinalizada pelo desvio padrão dos dados. Nesse sentido, foi considerado um nível de significância de 5% na determinação das informações que melhor se correlacionam linearmente com as medidas de deformação permanente e fadiga das misturas. Assim, foi possível determinar, com 95% de confiança, as correlações com coeficiente de Pearson estatisticamente diferente de zero.

As figuras trazidas no Apêndice G mostram as matrizes de correlação encontradas, e estão sinalizadas com um “X” aquelas com P-valor maior que 0,05 (considerando como hipótese nula a de que os coeficientes de Pearson são iguais a zero e não há correlação linear entre as variáveis). Para classificação desses coeficientes de correlação, foi utilizada a Tabela 41 como referência, com faixas bastante comuns na literatura científica (ARSHAM, 2020; SOONG-DER CHEN, 2012).

Vale destacar que há dados faltantes em cada uma das variáveis. Para não haver o descarte completo da mistura com dados faltantes, uma vez que isso inviabilizaria muitas análises, as informações incompletas foram descartadas nas correlações par a par. Assim, a correlação de cada variável com o parâmetro de interesse da mistura possui um tamanho de amostra distinto. Além disso, os dados dos ligantes caracterizados por Nascimento (2023) não foram considerados nos coeficientes de correlação apresentados nesta seção, uma vez que não eram ligantes virgens, mas sim extraídos das misturas no equipamento rotaevaporador, pelo procedimento calibrado por Almeida Jr. (2022). Esses ligantes foram extraídos das misturas estudadas por Faccin (2018), Schuster (2018) e Brondani (2019). As correlações encontradas dessa forma foram um pouco superiores do que as correlações considerando os ligantes extraídos.

Tabela 41 - Classificação do coeficiente de correlação linear de Pearson

<b>Valor da correlação</b>	<b>Classificação</b>
0,00 – 0,40	Fraca
0,41 – 0,75	Moderada
0,76 – 0,85	Boa
0,86 – 1,00	Excelente

Fonte: Arsham, (2020).

### 5.1.1 Deformação permanente em ligantes asfálticos

No que se refere à deformação permanente das misturas, optou-se por utilizar o parâmetro *Flow Number*, uma vez que existe uma quantidade significativa desse indicador no GEPPASV (146 dados). Faccin (2018) e Pires (2020), que possuem dados de FN e ATR em campo, consideraram o parâmetro como adequado para previsão desse defeito nas rodovias, especialmente no que se refere a ligantes convencionais 50/70 e modificados por polímero. Considerando as matrizes de correlação encontradas, com coeficientes de correlação de Pearson estatisticamente significativos (95% de confiança), os melhores indicadores de ligantes asfálticos estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Melhores correlações lineares ligante-mistura para deformação permanente

CARACTERIZAÇÃO TRADICIONAL			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1º	Brookfield 135°C	0,66	Moderada
1º	Ponto de amolecimento	0,66	Moderada
2º	Brookfield 150°C	0,61	Moderada
3º	Recuperação elástica	0,37	Fraca
4º	Penetração	-0,30	Fraca
REOLOGIA SOB CISALHAMENTO DINÂMICO			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1º	$ G^* /\text{sen}\phi$ 58°C RT	0,75	Moderada
2º	Jnr 3,2 RT 70°C	-0,69	Moderada
3º	G0 2s2p1d VG	-0,68	Moderada
4º	Jnr 0,1 RT 70°C	-0,66	Moderada
4º	$\delta$ 2s2p1d VG	0,66	Moderada
5º	h 2s2p1d VG	0,61	Moderada
5º	$\delta$ 2s2p1d RT	0,61	Moderada
6º	k 2s2p1d VG	0,56	Moderada
7º	R% 0,1 RT 70°C	0,55	Moderada
8º	R% 3,2 RT 70°C	0,53	Moderada
9º	Jnr 3,2 RT no PG	-0,50	Moderada
10º	PG alta temperatura	0,49	Moderada
11º	$ G^* /\text{sen}\phi$ 64°C RT	0,48	Moderada
12º	k 2s2p1d RT	0,45	Moderada

Fonte: Autora.

Observando a Tabela 42 é possível observar que, da caracterização tradicional, as medidas de viscosidade Brookfield e ponto de amolecimento podem ser um indicativo do comportamento das misturas no ensaio de *Flow Number*. A correlação positiva foi de encontro ao esperado, uma vez que ligantes mais viscosos e com ponto de amolecimento maior indicam menor possibilidade de fluir em altas temperaturas, o que aumenta o número

de ciclos até a fase terciária de deformação acumulada do ensaio uniaxial de cargas repetidas (parâmetro FN).

O ensaio de viscosidade Brookfield é uma metodologia de fácil e rápida execução, que requer pouca quantidade de amostra, e já está inserido na especificação brasileira de ligantes asfálticos. Sua correlação com o parâmetro FN (nas temperaturas de 135°C e 150°C) contou com 101 amostras, e há indícios de que esse valor deva ser usado no controle de qualidade dos ligantes no que se refere à deformação permanente. A viscosidade a 177°C não apresentou uma boa correlação com o FN, e acredita-se que seja pela inclusão nesta variável de dados de CAP modificado com borracha (avaliado a 175°C), que apresenta um comportamento singular e que difere dos demais tipos de ligantes. O ensaio de viscosidade Brookfield pode ser uma informação adicional ao já conhecido e empírico ponto de amolecimento, que é tido tradicionalmente como uma medida indireta de deformação permanente. Os resultados de recuperação elástica e penetração apresentaram fracas correlações com o FN, e também são considerados ensaios de grande empirismo.

No que diz respeito aos ensaios realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico, observou-se que o parâmetro  $|G^*|/\text{sen}\phi$  a 58°C parece ser um bom indicador da deformação permanente em misturas, com um coeficiente de correlação de 0,75. O parâmetro  $|G^*|/\text{sen}\phi$  alia a rigidez em temperatura mais elevada, que deve ser alta para enfrentar a deformação permanente, e uma medida de viscoelasticidade por meio do ângulo de fase, que deve ser mais baixo para garantir um comportamento elástico em altas temperaturas e responder adequadamente ao mesmo defeito. Esse era o indicador utilizado na especificação Superpave para a deformação permanente, e maiores valores sinalizam melhor comportamento nesse caso.

A análise par a par contou com 26 dados, mas alguns autores utilizam essa medida a 64°C para comparação entre ligantes (PIRES et al., 2022; POSSEBON, 2021; SCHUSTER, 2023). A correlação do parâmetro  $|G^*|/\text{sen}\phi$  a 64°C com o FN contou com 36 pares de dados, e ainda assim forneceu um coeficiente de correlação moderado. A temperatura de 64°C geralmente é escolhida por se tratar do PGH necessário para a maior parte do país.

O PGH também forneceu uma correlação moderada, próxima da correlação de  $|G^*|/\text{sen}\phi$  a 64°C, contando com 77 pares de dados na análise. Isso ocorre porque a sua definição de classes é baseada no parâmetro  $|G^*|/\text{sen}\phi$  e, portanto, ambos descrevem o mesmo fenômeno. Em uma análise preliminar, acreditava-se que o valor de PGH contínuo fosse um

indicador mais adequado, visto que as classes de PGH variam de 6 em 6°C. No entanto, a análise estatística para um nível de significância de 5% não considerou a correlação significativa. A análise par a par com o PG contínuo após RTFOT contou com 52 pares de dados.

O novo parâmetro para avaliação e classificação de ligantes quanto à deformação permanente do Superpave é a compliância não recuperável (Jnr), obtido do ensaio de MSCR. A análise de correlação linear também forneceu uma associação moderada desse parâmetro com o FN. A respeito dos indicadores da Tabela 42, as correlações do FN com o  $Jnr_{3,2}$  70°C e  $Jnr_{0,1}$  70°C contaram com 26 pares de dados, e com o  $Jnr_{3,2}$  no PGH com 64 pares. Pelo MSCR ser um ensaio que reproduz melhor a ocorrência da deformação permanente em materiais asfálticos (alta temperatura, maiores tensões – domínio da danificação -, ciclos de carga e repouso), considera-se que esse é um indicador melhor desse defeito em ligantes. O sinal negativo confirma a tendência esperada, com maiores valores de Jnr provocando uma tendência de redução no FN.

A variabilidade dos dados poderia explicar o fato de que esse não foi o parâmetro com maior correlação linear com o FN, especialmente por conter dados de CAP borracha. Não há dados de  $|G^*|/\sin\phi$  para CAP borracha, e há dois desses ligantes com dados do ensaio de MSCR. No entanto, a retirada desses ligantes não causou melhora nos coeficientes de correlação, apenas para o  $Jnr_{3,2}$  no PGH que passou a ter uma correlação de -0,53. Além do Jnr, o percentual de recuperação (R%) do ensaio de MSCR também apresentou correlação moderada com o FN na temperatura de 70°C, e quanto maior esse valor, mais elástico é o ligante, promovendo uma tendência de aumento no FN.

Os demais dados que aparecem na tabela são referentes à modelagem dos dados, utilizando o análogo mecânico 2s2p1d. Destaca-se que os parâmetros da condição virgem promoveram correlações mais fortes com o FN, mas contam com 29 pares de dados na análise. Na condição RTFOT, 52 pares estavam disponíveis para o cálculo. Diversos autores dedicam-se a estudar os parâmetros dessa modelagem reológica em ligantes asfálticos (CAI et al., 2019; KATBEH et al., 2023; OLARD; DI BENEDETTO, 2003; XU et al., 2021; YUSOFF; SHAW; AIREY, 2011). O parâmetro  $h$  muda  $|G^*|$  e  $\phi$  nas temperaturas intermediárias a altas. Maiores valores de  $h$  indicam menores valores de  $|G^*|$  nas médias temperaturas, mas o efeito mais significativo desse parâmetro é no ângulo de fase em altas

temperaturas. Maiores valores de  $h$  reduzem  $\phi$  nessa faixa, comportamento desejável para deformação permanente, o que pode justificar o sinal positivo da correlação.

Já o parâmetro  $\delta$  está associado à curva mestra nas temperaturas intermediárias, e é mais utilizado no estudo da fadiga (SCHUSTER, 2023). No entanto, observando o banco de dados desse estudo, o parâmetro forneceu uma correlação moderada com o FN. Maiores valores de  $\delta$  indicam menores rigidezes, mas também menores valores de ângulo de fase, nas temperaturas intermediárias, e sua correlação com o FN parece não fazer sentido uma vez que a deformação permanente ocorre em temperaturas mais elevadas. O mesmo autor sugere que o parâmetro  $\beta$  do 2s2p1d é um bom indicador para prever o comportamento das misturas em altas temperaturas, especialmente quanto ao fenômeno de envelhecimento, mas nesse momento não se mostrou um bom indicador para os ligantes.

Essa mesma discussão se aplica ao parâmetro  $k$ . O aumento desse indicador reduz as rigidezes em temperaturas mais baixas. No entanto, apesar de sinalizar maiores ângulos de fase em temperaturas baixas, também mostra menores valores de  $\phi$  nas temperaturas intermediárias, podendo ter provocado o sinal positivo da correlação. O parâmetro  $G_0$ , embora com boa colocação na tabela dentre os indicadores mostrados, apresentou resultado contrário do esperado. O  $G_0$  representa a máxima rigidez atingida pelo ligante em baixas temperaturas ou altas frequências, e seu valor negativo de correlação indica que maiores valores de rigidez nessa faixa de temperatura e frequência tenderiam a reduzir o FN.

No entanto, é importante destacar que essas são apenas análises preliminares, e a utilização dos parâmetros de modelagem em temperaturas baixas para obter indicativos da deformação permanente em misturas devem ser feitas com cautela. A modelagem 2s2p1d no grupo é feita manualmente, ajustando os coeficientes até se obter uma curva ajustada aos dados, e diferentes combinações desses parâmetros podem gerar curvas bastante parecidas, fazendo com que as correlações com parâmetros de misturas fiquem prejudicadas. Ao longo da evolução das pesquisas, o GEPPASV foi aprimorando as modelagens, dando a devida atenção a um ajuste que traga sentido físico aos coeficientes, além de um ajuste puramente matemático. Assim, não se considerou que esses sejam bons indicadores de deformação permanente em ligantes.

Para o ranqueamento dos ligantes asfálticos quanto à deformação permanente foi selecionado o parâmetro  $J_{nr}$  do ensaio de MSCR, visto que é o indicador da nova especificação Superpave para ligantes, trata-se de um ensaio no domínio da danificação e foi

apontado na Tabela 42 como potencial indicador da deformação permanente em misturas. No entanto, foi escolhido esse índice na temperatura de 64°C, como forma de permitir a comparação dos ligantes em um mesmo patamar de temperatura. Além disso, conforme discutido anteriormente, essa é a temperatura de PGH necessária para a maior parte do país (FACCIN et al., 2021), e pesquisas recentes apontam o “ $J_{nr,3,2} 64^\circ\text{C}$ ” como um bom indicador de deformação permanente em ligantes (PIRES, 2020; SCHUSTER, 2023).

A Tabela 43 traz a classificação dos ligantes utilizando o parâmetro  $J_{nr,3,2} 64^\circ\text{C}$ , juntamente com dados de viscoelasticidade linear (PGH,  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ,  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e PG contínuo RTFOT), visto que são outros índices com potencial correlação com o Jnr. As divisões horizontais da tabela referem-se aos limites para classificação de tráfego da norma AASHTO M 332 (2022), embora essa medida não esteja efetivamente no PGH de cada ligante. Os limites dividem os ligantes com Jnr de até  $0,5 \text{ kPa}^{-1}$ , até  $1,0 \text{ kPa}^{-1}$ , até  $2,0 \text{ kPa}^{-1}$  e até  $4,5 \text{ kPa}^{-1}$ . Com exceção dos CAPs AR e 50/70-G de Possebon (2021) que possuem PGH de 70 e 64, respectivamente, os demais ligantes superam o limite superior para o Jnr apenas porque a medida foi realizada acima dos seus PGHs (possuem PGH de  $58^\circ\text{C}$ ). Destaca-se aqui que os ligantes estão indexados às suas respectivas misturas, e foram excluídos dados repetidos (misturas com o mesmo ligante) e os dados de ligantes extraídos no rotaevaporador, para não prejudicar as análises.

Pela Tabela 43 é possível observar a superioridade de ligantes modificados frente aos ligantes convencionais, especialmente nas modificações com polímero e com asfalto natural (TLA), com exceção do CAP borracha de Possebon (2021). Salienta-se também, nesta temperatura, o bom comportamento do CAP de baixa penetração (10/20) à deformação permanente, possivelmente devido a sua elevada rigidez e baixo ângulo de fase (maior elasticidade) em alta temperatura ( $65^\circ\text{C}$  e 1 Hz).

O ligante 50/70 com ponto de amolecimento mais elevado ( $85^\circ\text{C}$ ) também se destacou frente aos demais ligantes convencionais, e possui rigidez mais elevada que os demais em altas temperaturas. Além disso, os ligantes convencionais de penetração 30/45 também tiveram melhor comportamento que os demais sem modificação. Embora esses ligantes possuam um comportamento viscoso marcante a  $65^\circ\text{C}:1\text{Hz}$ , sua rigidez elevada pode explicar esse fenômeno.

A partir das tendências observadas na Tabela 43 para os indicadores de viscoelasticidade linear em alta temperatura, buscou-se investigar se esses parâmetros,

medidos em um domínio onde não se provoca dano na amostra, correlacionam-se de maneira adequada com o  $Jnr_{3,2}$  64°C. A Figura 66 mostra os melhores ajustes encontrados para o ângulo de fase em alta temperatura ( $\phi_{65^\circ C:1Hz}$ ). Inicialmente foram observados os dados sem ligantes extraídos, e abaixo estão as figuras com todos os ligantes do banco de dados, sem informações repetidas.

Desconsiderando os ligantes extraídos, a melhor tendência encontrada foi na forma de uma curva de potência, demonstrando uma correlação regular entre os parâmetros. De forma geral, quanto maior o comportamento viscoso em altas temperaturas (maior  $\phi$ ), maior é a parcela de deformação irreversível em um ensaio de dano por deformação permanente. Separando a análise por tipo de ligante, não foram encontradas boas correlações para os ligantes com polímero. A correlação linear para ligantes convencionais manteve-se regular ( $R^2 = 0,5157$ ), embora pior do que quando considerados os ligantes conjuntamente.

Tabela 43 - Ranqueamento dos ligantes pelo parâmetro  $Jnr_{3,2}$  64°C

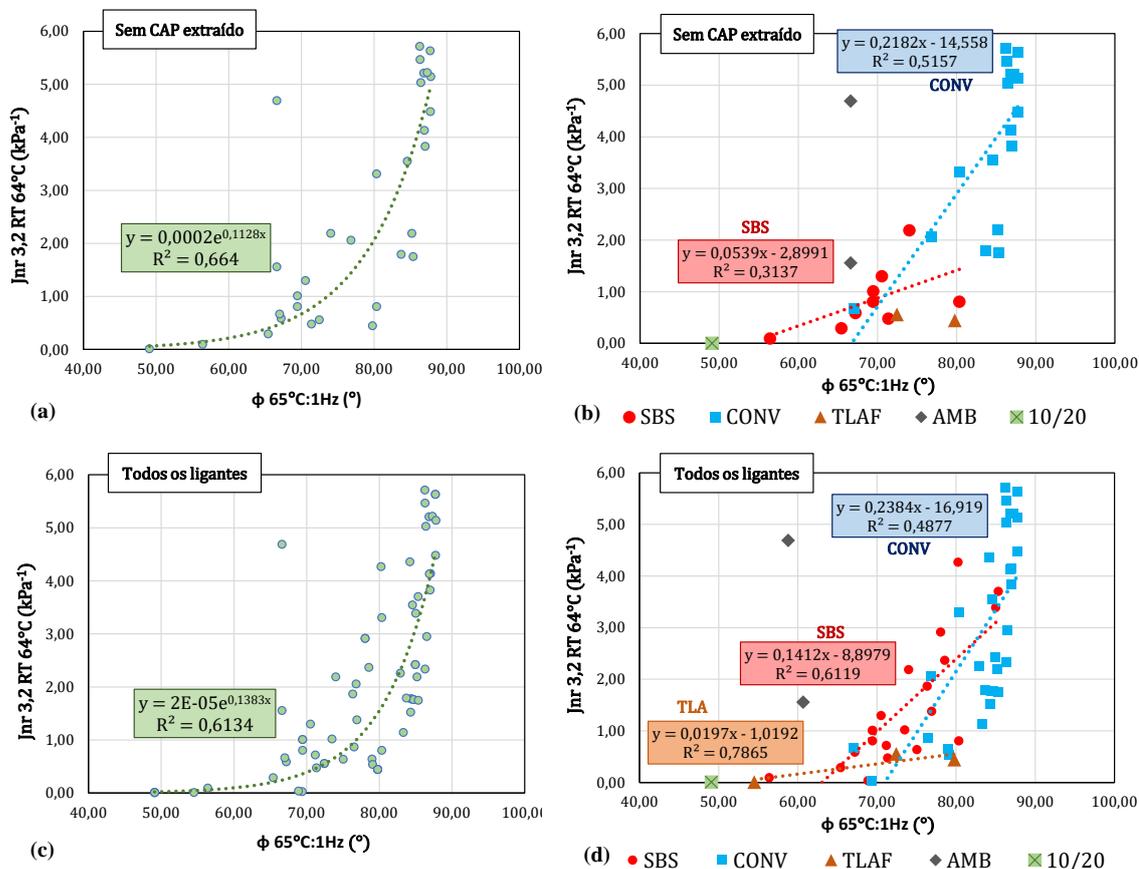
ORDEM	Nomenclatura	$Jnr_{3,2}$ RT 64°C	PGH	$ G^* _{65^\circ C:1Hz}$	$\phi_{65^\circ C:1Hz}$	PG contínuo RT
1º	EGL-19 - B - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	0,011	88	46112	49,08	97,80
2º	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	0,095	76	6559	56,40	80,90
3º	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	0,292	70	2855	65,41	70,00
4º	EGL-19 - B - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	0,446	76	11060	79,77	78,90
5º	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	0,479	70	3683	71,36	72,90
6º	TLAF lab (Ilha, 2022)	0,557	70	5846	72,44	77,86
7º	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	0,588	70	2597	67,20	70,00
8º	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	0,667	82	13383	66,99	85,40
9º	60/85E (Possebon, 2021)	0,808	64	2000	80,34	68,30
10º	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	0,808	64	2166	69,43	68,30
11º	SBS lab (Ilha, 2022)	1,010	64	2410	69,44	69,44
12º	SBS REF (Almeida Júnior, 2022)	1,300	64	2184	70,53	68,30
13º	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,557	70	2925	66,61	71,60
14º	30/45 (Possebon, 2021)	1,749	70	4000	85,36	70,00
15º	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,793	64	3223	83,71	70,30
16º	50/70 - F (Possebon, 2021)	2,060	64	3000	76,80	70,20
17º	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	2,190	64	2747	85,19	69,20
18º	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	2,190	64	1845	74,01	66,30
19º	50/70 - H (Possebon, 2021)	2,615	64			68,10
20º	50/70 - I (Possebon, 2021)	3,309	64	2000	80,34	67,60
21º	50/70 - E (Possebon, 2021)	3,549	64	4000	84,57	66,10
22º	UFMS 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)	3,800	64			
23º	50/70 - D (Possebon, 2021)	3,829	64	2000	87,00	65,50
24º	50/70 - B (Possebon, 2021)	4,132	64	2000	86,90	64,80
25º	50/70 - A (Possebon, 2021)	4,483	64	1000	87,74	64,00
26º	AR (Possebon, 2021)	4,692	70	3000	66,61	70,00
27º	50/70 - G (Possebon, 2021)	5,031	64	2000	86,41	65,60
28º	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	5,143	58	1124	87,79	63,20
29º	50/70 - C (Possebon, 2021)	5,209	58	1000	86,83	57,80
30º	Neat REF (Almeida Júnior, 2022)	5,220	58	1233	87,29	63,90
31º	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	5,467	58	1254	86,30	63,70
32º	CONV lab (Ilha, 2022)	5,632	58	1187	87,71	62,92
33º	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	5,713	58	1187	86,26	63,40

Fonte: Autora.

Para todos os ligantes do banco de dados, a correlação mostrou-se mais fraca, embora tenha se mantido em um patamar regular. Destaca-se a melhora da correlação linear para asfaltos-polímero ( $R^2 = 0,6119$ ), e a inclusão do CAP TLA, que obteve boa correlação com o  $Jnr_{3,2} 64^\circ\text{C}$ . No entanto, existem apenas 3 dados para esse ligante, e essa tendência pode não representar a realidade.

A Figura 67 mostra as correlações entre os valores de rigidez em temperatura elevada ( $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) e o  $Jnr_{3,2} 64^\circ\text{C}$ . Retirando-se os ligantes extraídos, é possível observar que, quanto maior a rigidez de um ligante em alta temperatura, menores são os valores de  $Jnr$ . As melhores correlações foram obtidas por modelo de potência, tanto para a correlação geral quanto na correlação separada por tipo de CAP. Nesse sentido, a separação por tipo de ligante promoveu maiores valores de  $R^2$  (0,7734 para ligantes sem modificação e 0,7063 para ligantes com SBS).

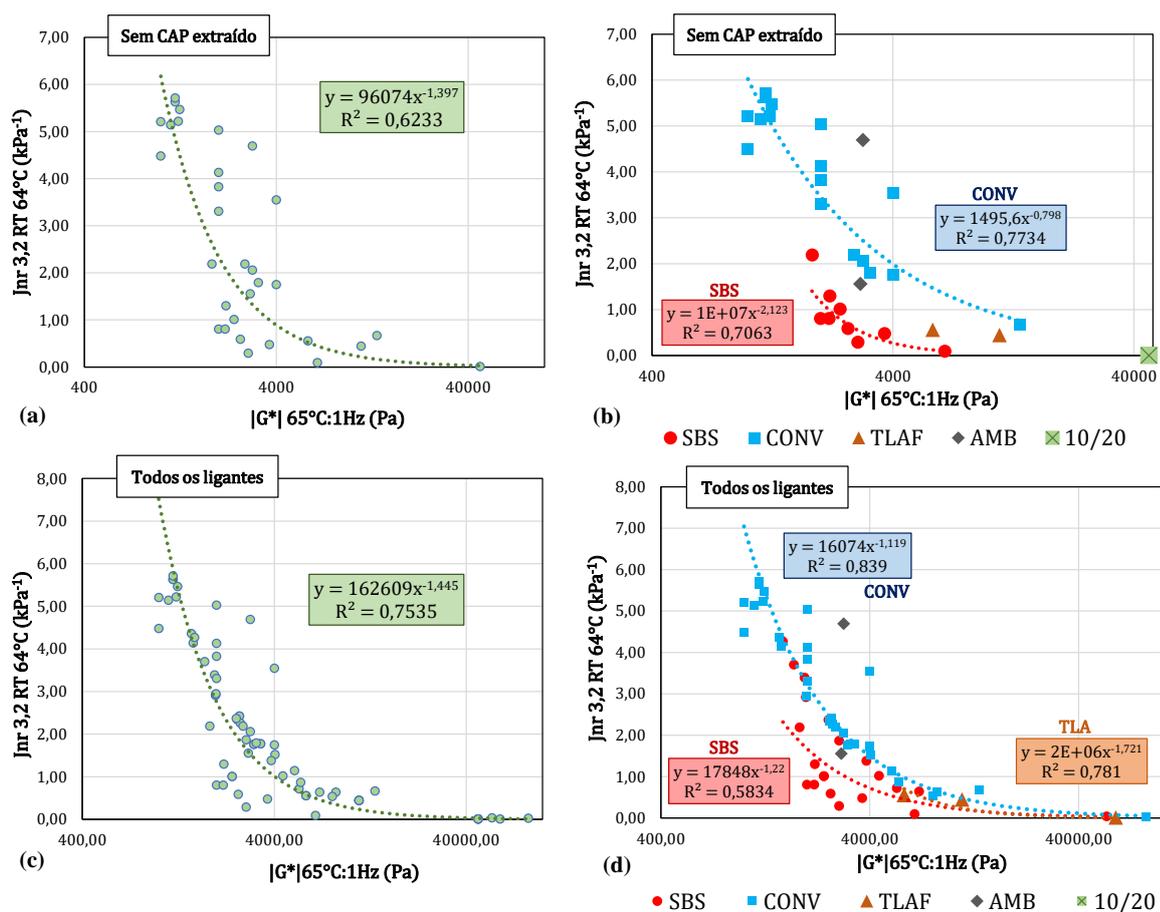
Figura 66 - Correlações entre  $Jnr_{3,2} 64^\circ\text{C}$  e  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ : sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Com exceção dos CAPs com polímero, a consideração de todos os pontos do banco de dados forneceu boas correlações. É interessante notar que não necessariamente ligantes modificados por SBS apresentam maior rigidez em alta temperatura, mas seu comportamento mais elástico (representado por menores valores de ângulo de fase anteriormente) pode explicar a queda do Jnr. Ligantes com TLA aliam alta rigidez e em geral menor ângulo de fase, contribuindo também para a melhoria no comportamento à deformação permanente. Por fim, os dados para CAP borracha ainda são limitados, o que não permite uma análise adequada.

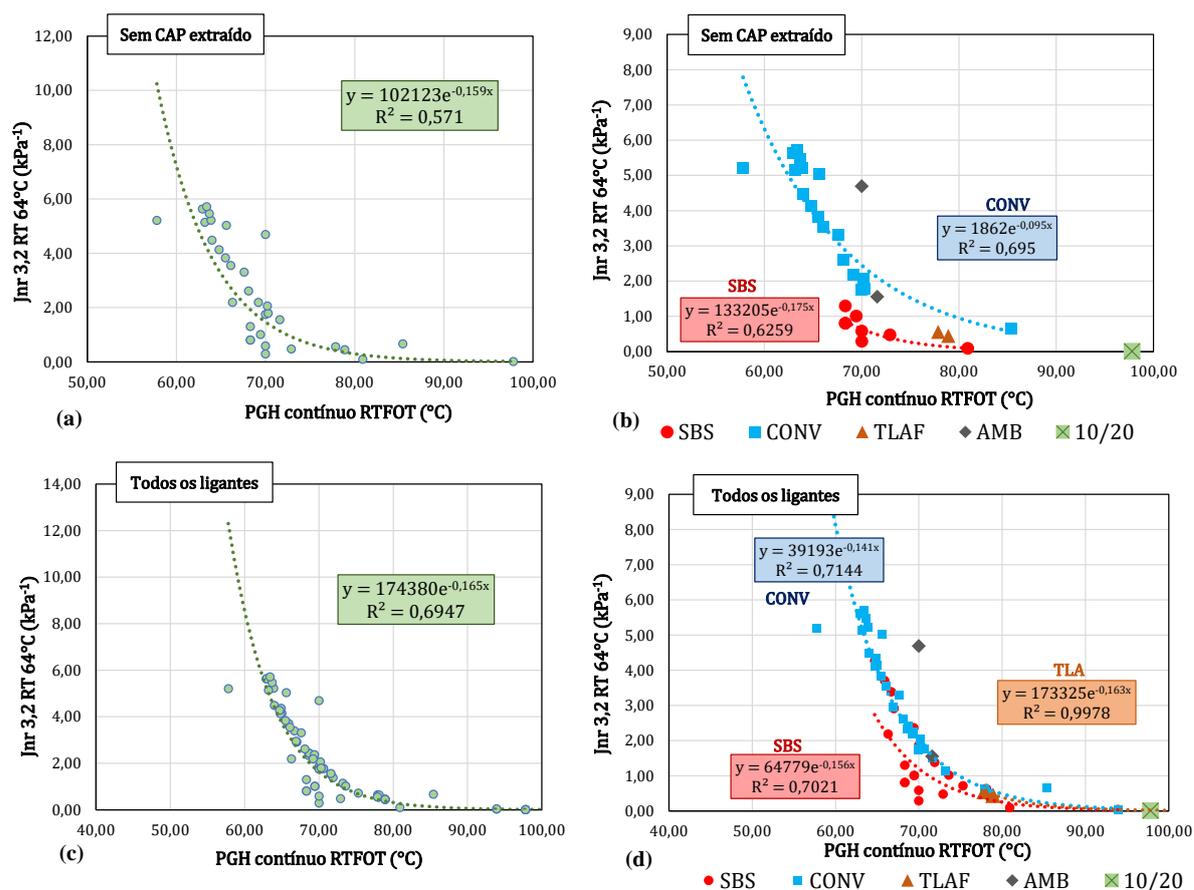
Figura 67 - Correlações entre  $Jnr_{3,2 RT 64^\circ C}$  e  $|G^*|_{65^\circ C:1Hz}$ : sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

A partir da Figura 68, pode ser observada uma queda exponencial do do  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$  com o aumento PG contínuo após RTFOT. Esse parâmetro é obtido observando a combinação da rigidez com o seno do ângulo de fase ( $|G^*|/\text{sen}\phi$ ), e maiores valores de  $|G^*|/\text{sen}\phi$  representam comportamento desejável no enfrentamento da deformação permanente (maior rigidez e menor ângulo de fase). As correlações exponenciais encontradas foram regulares a boas na maioria dos casos, com exceção dos CAPs TLA com uma correlação excelente. No entanto, ressalta-se novamente a falta de dados para fornecer uma relação mais precisa. A inclusão de mais dados nessa análise, com os ligantes extraídos, melhorou as correlações encontradas.

Figura 68 - Correlações entre  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$  e PG contínuo RTFOT: sem CAP extraído (a) correlação geral, (b) por tipo de CAP e com todos os ligantes (c) correlação geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Baseado nas análises anteriores, buscou-se obter os intervalos de confiança para cada parâmetro, separados pelas classes de Jnr, para observar de maneira mais precisa as

tendências observadas nos gráficos acima (ou seja, considerando a variabilidade e a quantidade de dados). Para isso, os parâmetros de viscoelasticidade linear foram divididos nos grupos identificados pelos limites de  $J_{nr}$ , e foi verificada a normalidade dos dados dentro de cada grupo pelo teste de Shapiro-Wilk. Assim, para esse teste de hipóteses, foi considerada como hipótese nula a de que os dados seguiam uma distribuição normal, e para P-valores maiores que 0,05 (significância de 5%) as distribuições eram consideradas como normais. Por se tratar de dados amostrais, os intervalos de confiança foram obtidos pela estatística da curva *T-student*, e a margem de erro foi calculada pela Equação 27. Assim, foi possível calcular os intervalos de confiança para os parâmetros  $\phi_{65^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$  e PG contínuo RTFOT.

$$ME = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (27)$$

Onde:

$t_{\alpha/2}$  = valor da estatística do teste para uma distribuição *T-student* para um nível de significância  $\alpha$ ;

s = desvio padrão amostral;

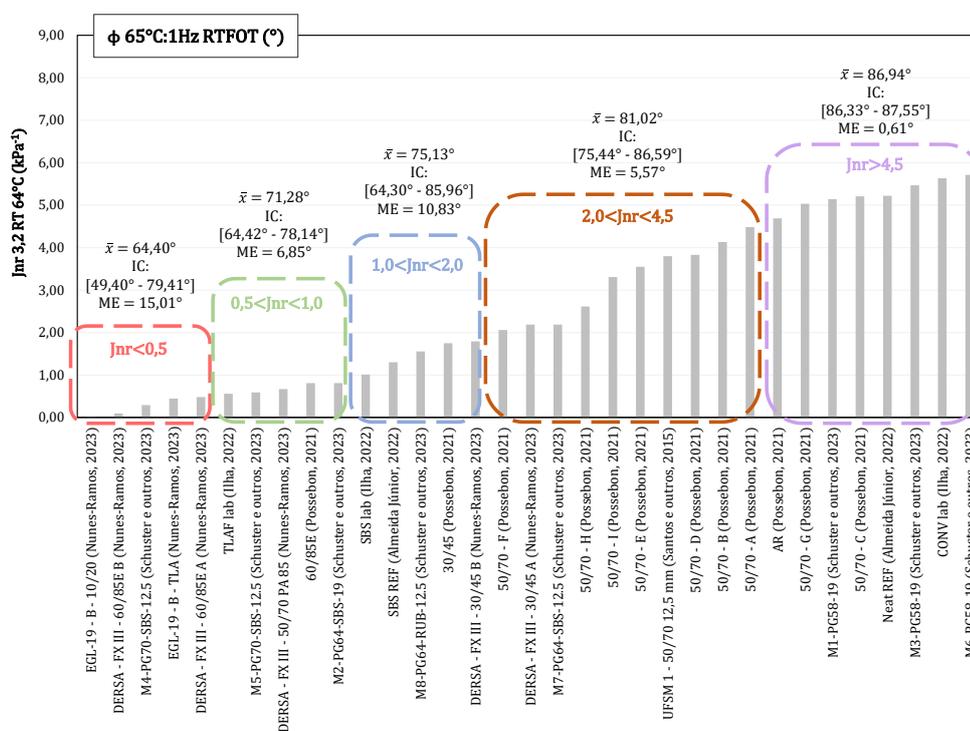
n = tamanho da amostra.

A Figura 69 mostra os grupos de ligantes pelo  $J_{nr}$ , e os intervalos de confiança calculados para  $\phi_{65^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$ , juntamente com as margens de erro. A figura indica que a média de ângulo de fase em altas temperaturas aumenta para ligantes com maior  $J_{nr}$ , e o comportamento mais viscoso nessa faixa prejudica o enfrentamento desse defeito. No entanto, há uma sobreposição dos intervalos de confiança, com margens de erro maiores nos grupos com menor quantidade de dados. Isso indicaria que estatisticamente as médias de ângulo de fase entre os grupos não seriam distintas, mas o baixo volume desses dados justifica intervalos de confiança mais amplos.

Assim, baseado também na observação de outros estudos do grupo e da literatura, o ângulo de fase a  $65^{\circ}\text{C}$  e 1 Hz parece ser um bom indicador do comportamento à deformação permanente em ligantes, mas ainda carece de maior quantidade de dados para uma análise estatística mais precisa. Por fim, é possível afirmar que ligantes com  $J_{nr}$  superior a  $4,5 \text{ kPa}^{-1}$  a  $64^{\circ}$  possuem ângulos de fase superiores a  $86^{\circ}$ , com 95% de confiança.

Da mesma forma, a Figura 70 mostra os intervalos de confiança para o parâmetro PGH contínuo após RTFOT. A média dos valores indica que menores valores de PGH contínuo provocam aumento no Jnr. Ainda como na análise anterior, os intervalos se sobrepõem, e não há intervalos ainda definidos para esse parâmetro com base nas classes de Jnr. No entanto, os intervalos indicam que os melhores ligantes para o parâmetro Jnr possivelmente teriam classes superiores de PGH, e vice-versa (representado pelos valores em negrito da figura, que correspondem à classificação PGH para cada extremo do intervalo de confiança).

Figura 69 - Intervalos de confiança para  $\phi 65^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}$  dentro dos grupos de Jnr3,2

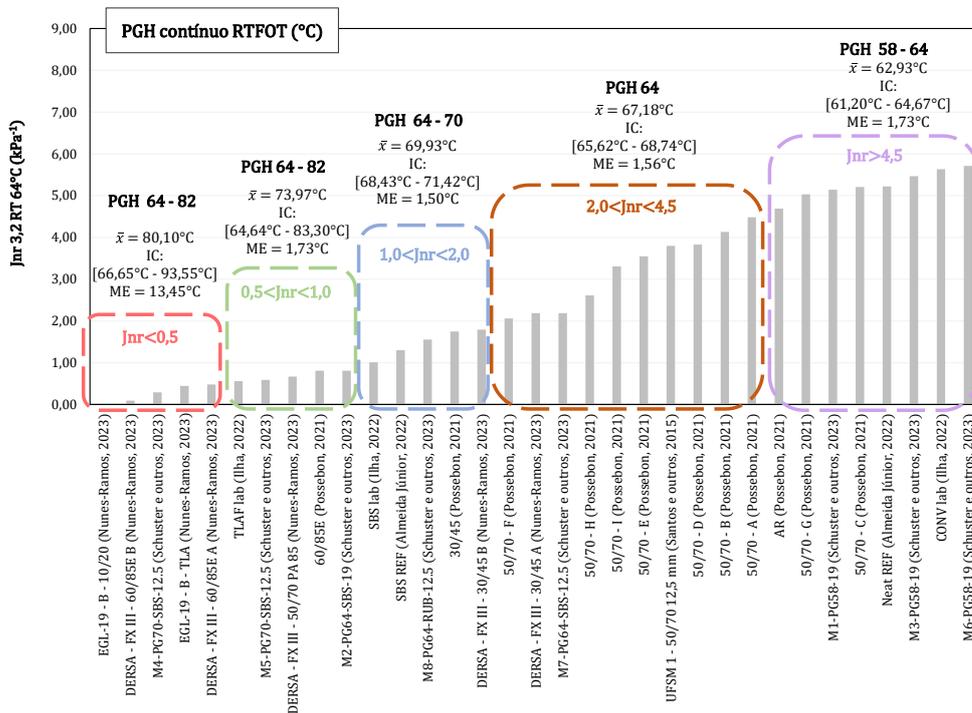


Fonte: Autora.

Ainda, foram observadas as correlações com ensaios de caracterização convencional, uma vez que ainda estão presentes na especificação brasileira de CAP. As melhores correlações foram encontradas para o ponto de amolecimento e para a viscosidade Brookfield a 135°C (que não conta com dados de CAP borracha), por curvas em formato de potência. A Figura 71 mostra que as correlações foram boas para os dois parâmetros ( $R^2$  de 0,7299 para PA e 0,7813 para a viscosidade). A viscosidade rotacional ainda se mostra mais adequada no

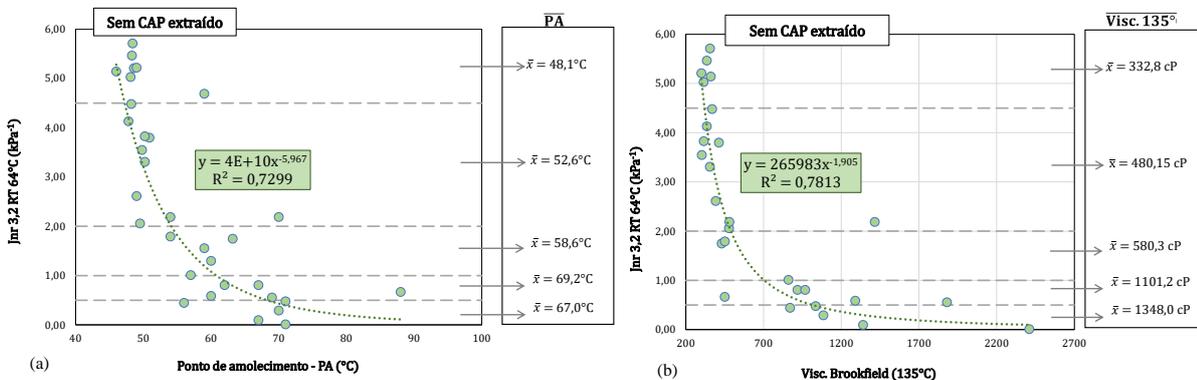
que diz respeito à caracterização convencional de ligantes, pois ainda alia a facilidade e rapidez de execução do ensaio. Dentro dos grupos de Jnr tais características não seguiram uma distribuição normal, mas as médias estão também reportadas na Figura 71. Em geral, melhores ligantes na deformação permanente parecem ter maiores pontos de amolecimento e viscosidades a 135°C.

Figura 70 - Intervalos de confiança para PGH contínuo RTFOT



Fonte: Autora.

Figura 71 - Correlações entre Jnr e (a) ponto de amolecimento e (b) viscosidade Brookfield a 135°C



Fonte: Autora.

Tendo em vista que, dentro dos grupos obtidos pelos limites de Jnr, as propriedades  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , ponto de amolecimento e viscosidade a  $135^\circ\text{C}$  não seguiram uma distribuição normal, foram obtidos os intervalos de confiança pelo método *Bootstrap* (EFRON, 1979; EFRON; TIBSHIRANI, 1993), utilizando amostragem com repetição e a técnica dos percentis. Essa é uma técnica válida para muitas distribuições e diferentes estatísticas, como média, mediana e proporções.

Para estimativa dos intervalos de confiança, são obtidas inúmeras reamostragens, a partir de uma amostra dos dados. Essa operação precisa ser feita com um número grande de reamostras, permitindo a reposição dos valores para que possam ser sorteados mais de uma vez dentro de cada nova amostra (chamadas de *bootstraps*). No caso desta pesquisa, foram realizadas 4000 reamostragens para cada estimativa intervalar.

A partir da média dos valores de cada *bootstrap*, foi possível calcular o erro associado a cada um, pela diferença entre essa média e a média da amostra de origem. Considerando a distribuição desses erros como não simétrica, e uma confiança de 95%, foram obtidos os percentis 2,5% e 97,5% na distribuição dos erros, que representam o erro inferior e o erro superior, respectivamente, os quais são somados à média da amostra original para obter o intervalo de confiança. Assim, a Tabela 44 mostra os intervalos obtidos para as três propriedades ( $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , ponto de amolecimento e viscosidade a  $135^\circ\text{C}$ ).

Tabela 44 - Intervalos de confiança para  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , ponto de amolecimento e viscosidade a  $135^\circ\text{C}$  dentro dos intervalos de  $Jnr_{3,264^\circ\text{C}}$

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
$ G^* _{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ (Pa)	1	14053,80	18205,97	-9961,20	16396,40	[ 4092,6 - 30450,2 ]
	2	5198,40	4837,34	-3012,60	4400,60	[ 2185,8 - 9599,0 ]
	3	2948,40	716,94	-525,80	578,20	[ 2422,6 - 3526,6 ]
	4	2399,11	876,67	-527,44	555,56	[ 1871,7 - 2954,7 ]
	5	1283,57	326,91	-168,32	258,43	[ 1115,3 - 1542,0 ]
Ponto de Amolecimento ( $^\circ\text{C}$ )	1	67,00	6,36	-5,80	3,80	[ 61,2 - 70,8 ]
	2	69,20	11,12	-7,00	9,80	[ 62,2 - 79,0 ]
	3	58,64	3,43	-2,84	2,64	[ 55,8 - 61,28 ]
	4	52,60	6,58	-3,04	4,10	[ 49,6 - 56,7 ]
	5	48,07	1,06	-0,87	0,60	[ 47,2 - 48,7 ]
Viscosidade Brookfield $135^\circ\text{C}$ (cP)	1	1348,00	617,16	-369,00	573,00	[ 979,0 - 1921,0 ]
	2	1101,20	528,57	-379,60	424,80	[ 721,6 - 1526,0 ]
	3	580,33	242,43	-150,33	279,67	[ 430,0 - 860,0 ]
	4	485,15	332,40	-131,40	215,50	[ 353,8 - 700,7 ]
	5	332,80	25,82	-20,20	20,20	[ 312,6 - 353,0 ]

Fonte: Autora.

A partir da tabela é possível observar que, para o parâmetro  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , a pouca quantidade de dados e sua alta variabilidade, especialmente nos primeiros grupos formados pelo Jnr, promoveram maiores valores de erro em torno da estimativa, e intervalos de confiança mais extensos. Assim, as médias amostrais indicam que menores valores de  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  promovem maiores valores de  $\text{Jnr}_{3,2}$  a  $64^\circ\text{C}$ , mas a intersecção dos intervalos não permite concluir intervalos definidos desse parâmetro para cada classe. No entanto, quando medido o Jnr a  $64^\circ\text{C}$ , é possível concluir que ligantes do grupo 5 ( $\text{Jnr}_{3,2}^{64^\circ\text{C}} > 4,5 \text{ kPa}^{-1}$ ) possuem um  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  abaixo de 1542 Pa, com 95% de confiança.

No caso do ponto de amolecimento, os intervalos para os dois primeiros grupos não permitiram conclusões precisas, pois são faixas com poucos ligantes. Para os grupos 3, 4 e 5, os intervalos de confiança obtiveram pouca ou nenhuma intersecção. Assim, com 95% de confiança é possível afirmar que ligantes com  $\text{Jnr}_{3,2}^{64^\circ\text{C}}$  entre 1,0 e 2,0  $\text{kPa}^{-1}$  possuem PA mínimo de  $55,8^\circ\text{C}$ , entre 2,0 e 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem PA mínimo de  $49,6^\circ\text{C}$  e os que ficam acima de 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem PA abaixo de  $48,7^\circ\text{C}$ .

No caso da viscosidade, houve intersecção em todos os intervalos de confiança, embora as médias amostrais sinalizem que menores valores de viscosidade rotacional a  $135^\circ\text{C}$  promovem piora na deformação permanente (maior  $\text{Jnr}_{3,2}^{64^\circ\text{C}}$ ). O grupo 5 ficou separado dos demais, permitindo observar que, com 95% de confiança, ligantes com  $\text{Jnr}_{3,2}^{64^\circ\text{C}} > 4,5 \text{ kPa}^{-1}$  possuem viscosidade rotacional a  $135^\circ\text{C}$  abaixo de 353,0 cP.

### 5.1.2 Fadiga em ligantes asfálticos

Para iniciar a investigação acerca dos melhores indicadores de fadiga em ligantes asfálticos, foi escolhido como parâmetro alvo o Fator de Fadiga da Mistura calculado a partir das curvas de Wöhler simuladas pelo S-VECD (equação de Nascimento, 2016). O FFM calculado dessa forma já foi apontado por outros autores como bom indicador da fadiga em misturas asfálticas (ALMEIDA JR., 2022; BOEIRA, 2018; NASCIMENTO, 2023; POSSEBON, 2021; SCHUSTER, 2018, 2023; VESTENA, 2021). Os melhores indicadores apontados pela correlação linear de Pearson e estatisticamente significantes a uma confiança de 95% estão mostrados na Tabela 45. As matrizes de correlação estão apresentadas no Apêndice G, com o marcador em “X” sinalizando correlações não significativas (P-valor maior que 5% para a hipótese nula de que os coeficientes são iguais a zero).

Tabela 45 - Melhores correlações lineares ligante-mistura para fadiga

CARACTERIZAÇÃO TRADICIONAL			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1º	Recuperação elástica	0,39	Fraca
2º	Penetração	0,37	Fraca
REOLOGIA SOB CISALHAMENTO DINÂMICO			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1º	Nf PAV (35% G* senφ)	0,81	Boa
1º	FFL 19°C RT (35% G* senφ)	0,81	Boa
2º	Nf RT (35% G* senφ)	0,79	Boa
3º	FFL 19°C RT (máxPSE)	0,67	Moderada
4º	δ 2s 2p 1d RT	0,47	Moderada
4º	φ 19°C: 10Hz RT	0,47	Moderada

Fonte: Autora.

A observação dessa tabela permite observar que, conforme esperado, não há correlação linear entre os ensaios empíricos de caracterização convencional de ligantes. A fadiga é um fenômeno mais complexo que a deformação permanente, e diversos autores dedicam-se ao estudo desse defeito em misturas e ligantes asfálticos, uma vez que ainda não há consenso sobre a melhor forma de definição de falha nesse caso.

Embora a definição de falha do ensaio de fadiga LAS para ligantes asfálticos ainda esteja em constante questionamento, os parâmetros do ensaio (número de ciclos até a falha e Fator de Fadiga do Ligante a 19°C) apresentaram fortes correlações lineares com o FFM, indicando que o ligante asfáltico pode ter um papel fundamental na fadiga das misturas. Pela correlação linear, o critério constante na norma AASHTO T 391 (2020) parece ser melhor que o critério do máximo PSE de Wang et al. (2015). O critério da norma considera a queda de 35% da integridade, sendo essa considerada pelo parâmetro  $|G^*|_{sen\phi}$  (indicador de fadiga da especificação Superpave de ligantes).

No entanto, vale destacar que a correlação entre o Nf e FFL na condição RTFOT para o critério de 35%|G\*|senφ contou com 13 pares de dados, e o FFL para o critério máxPSE com 25 pares. O valor de Nf 35%|G\*|senφ após PAV contou com 15 pares, e em geral a condição RTFOT vem sendo bastante utilizada em estudos de fadiga em ligantes, visto que o ensaio de PAV é dispendioso e o RTFOT é um protocolo mais simplificado. Além disso, a fadiga não ocorre somente no longo prazo (condição de envelhecimento simulada pelo PAV), mas sim com o acúmulo do dano que tem início desde a implantação da rodovia (condição de envelhecimento simulada pelo RTFOT).

O parâmetro  $\delta$  após RTFOT do 2s2p1d aparece aqui em uma correlação moderada com o FFM, e já foi apontado na literatura como um bom indicador de fadiga e de envelhecimento de misturas (SCHUSTER, 2023). O envelhecimento das misturas em decorrência da oxidação do ligante asfáltico está intimamente ligada ao fenômeno de fadiga, uma vez que o material adquire um comportamento mais frágil em decorrência de maiores rigidezes e menores ângulos de fase. Assim, parece razoável a correlação positiva entre  $\delta$  e FFM, visto que maiores valores desse parâmetro reduzem a rigidez e aumentam a parcela viscosa de comportamento dos ligantes em temperaturas intermediárias. Por consequência, a tendência indica maiores FFMs, o que é desejável para a fadiga. Essa correlação contou com 35 pares de dados.

Por fim, outro fator que aparece com uma correlação linear moderada com o FFM é o ângulo de fase a 19°C e 10 Hz, cuja correlação teve 37 pares de dados. Esse indicador também parece ser razoável, seguindo a discussão anterior, vem sendo investigado em outros estudos por ser uma medida na mesma temperatura e frequência do ensaio de fadiga uniaxial cíclico à tração-compressão em misturas (ALMEIDA JR., 2022; NASCIMENTO, 2023; SCHUSTER, 2023). Maiores ângulos de fase em temperaturas intermediárias (faixa onde ocorre a fadiga em misturas) indicam que o comportamento viscoso do material passa a ser mais atuante, melhorando o comportamento à fadiga.

Com base nas correlações encontradas e na observação da literatura sobre a fadiga em ligantes asfálticos, foi selecionado o parâmetro  $FFL_{19^{\circ}C}$  para ranqueamento desses materiais.

Maiores valores de FFL indicam melhor comportamento à fadiga, pois sinalizam maiores ciclos até a falha para o intervalo de deformação considerado. A

Tabela 46 mostra o resultado encontrado com base nos dois critérios de falha mencionados anteriormente.

A tabela mostra que, para ambos os critérios, há uma semelhança na ordem encontrada para os CAPs. A comparação precisa não é possível porque não há dados dos dois critérios para todos os ligantes. Além disso, o princípio que considera a máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE) indica que os ligantes suportam mais ciclos até a falha do que o critério de redução de 35% de  $|G^*| \sin \phi$  da norma AASHTO T 391 (2020), o qual acaba sendo mais rigoroso na determinação do ciclo de falha.

No geral, ligantes modificados por polímero e por borracha apresentam melhor comportamento à fadiga quando observado o  $FFL_{19^{\circ}C}$ , embora esse padrão não fique tão

evidente quanto na deformação permanente, visto que há mais exceções. Os CAPs AR de Possebon (2021) e TLA adicionado ao banco de dados nesta pesquisa não atingiram boas colocações.

Tabela 46 - Ranqueamento dos ligantes pelo parâmetro  $FFL_{19^{\circ}C}$

35% G* senφ			máxPSE		
ORDEM	Nomenclatura	$FFL_{19^{\circ}C}$ RT 35% G* senφ	ORDEM	Nomenclatura	$FFL_{19^{\circ}C}$ RT máxPSE
1º	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,417	1º	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	2,098
2º	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	1,395	2º	50/70 - F (Possebon, 2021)	1,850
3º	EGL-19 - A - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1,384	3º	50/70 - I (Possebon, 2021)	1,810
4º	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,344	4º	EGL-19 - A - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1,808
5º	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,319	5º	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,769
6º	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,306	6º	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,662
7º	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,305	7º	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,661
8º	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	1,303	8º	HIMA (Vestena, 2021)	1,637
9º	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,283	9º	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,602
10º	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,276	10º	TLAF (Vestena, 2021)	1,601
11º	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,237	11º	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	1,598
12º	EGL-19 - A - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	1,219	12º	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,575
13º	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	1,209	13º	SBS (Vestena, 2021)	1,572
14º	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	1,162	14º	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,563
15º	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	1,055	15º	CONV - cap extraído (Vestena, 2021)	1,557
			16º	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	1,528
			17º	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,524
			18º	60/85E (Possebon, 2021)	1,520
			19º	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,514
			20º	50/70 - C (Possebon, 2021)	1,480
			21º	50/70 - E (Possebon, 2021)	1,470
			22º	30/45 (Possebon, 2021)	1,460
			23º	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	1,441
			24º	50/70 - G (Possebon, 2021)	1,440
			25º	50/70 - H (Possebon, 2021)	1,440
			26º	AR (Possebon, 2021)	1,440
			27º	CONV (Vestena, 2021)	1,428
			28º	50/70 - D (Possebon, 2021)	1,390
			29º	50/70 - B (Possebon, 2021)	1,370
			30º	50/70 - A (Possebon, 2021)	1,360
			31º	EGL-19 - A - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	1,346
			32º	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	1,041

Fonte: Autora.

Comparando os ligantes TLA de Vestena 2021 e TLA desta pesquisa, foi possível constatar que a rigidez do TLA com pior comportamento foi aproximadamente 95% superior a 19°C e 10 Hz, embora seu ângulo de fase não seja significativamente menor (em torno de 7% menor). Contudo, essa tendência será melhor investigada nos passos seguintes. Para o CAP 10/20, embora seja bastante rígido nessa temperatura e frequência, permaneceu em boa colocação quanto à fadiga pelo FFL, mas não há dados para entender a tendência de comportamento para esse tipo de ligante. Ainda, ligantes convencionais com classe de penetração 30/45 não apresentaram tendência de melhor ou pior comportamento quando comparados com CAPs 50/70.

Cabe destacar que o critério máxPSE é mais fundamentalista na determinação da falha por fadiga. A redução de 35% da integridade (critério 35%|G\*|senφ) foi proposta por Johnson (2010), ao identificar que o critério clássico utilizado até então, o qual considerava uma

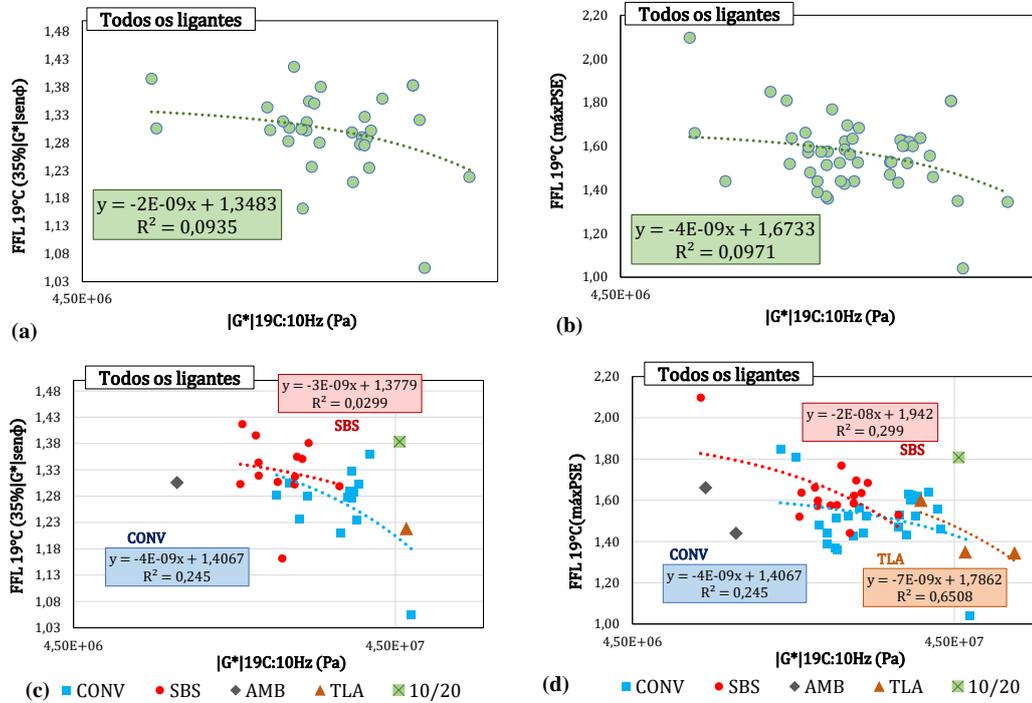
redução de 50% da integridade do material, era bastante arbitrário. Nesse sentido, o autor comenta que há uma correspondência razoável na falha por fadiga observada nos ensaios de LAS e *Time Sweep*, quando utilizado como critério a redução de 35% da integridade do ligante asfáltico, e a abordagem foi adotada pela norma AASHTO T 391 (2020).

No entanto, o estudo desenvolvido por Wang et al., (2015b), no qual foi proposto o critério máxPSE para a definição de falha por fadiga em ligantes asfálticos, mostrou que há uma relação única entre a taxa de energia de pseudodeformação liberada e a vida de fadiga, e que essa relação independe do histórico de carregamento. Além disso, os resultados estiveram alinhados com a fadiga observada em misturas asfálticas, tanto pelo ensaio uniaxial de fadiga à tração direta, quanto em pistas com simuladores de tráfego (FHWA-ALF - *Federal Highway Administration – Accelerated Loading Facility*). Por fim, é um critério altamente dependente do material, sendo capaz, portanto, de diferenciar com maior precisão os ligantes modificados dos não modificados. Considerando todos os benefícios expostos pelo estudo, o critério foi adotado pela norma brasileira DNIT 439/2022 - ME.

Tomando como base as matrizes de correlação lineares, foram confrontados dados de viscoelasticidade linear de todos os ligantes com o  $FFL_{19^{\circ}C}$  pelos dois critérios de falha, buscando visualizar possíveis tendências de comportamento fora do domínio do dano que explicassem os resultados da classificação acima. Em primeiro lugar, investigou-se se o aumento no  $FFL_{19^{\circ}C}$  poderia estar sendo provocado por menores valores de rigidez na mesma temperatura e frequência. No entanto, conforme pode ser visualizado na Figura 72, não foram encontradas boas correlações com  $|G^*|_{19^{\circ}C:10Hz}$ , com exceção dos CAPs TLA isoladamente, mas a falta de dados não permite concluir adequadamente a respeito desse resultado. Apesar disso, as linhas de tendência sinalizam uma leve redução do  $FFL_{19^{\circ}C}$  com o aumento das rigidezes.

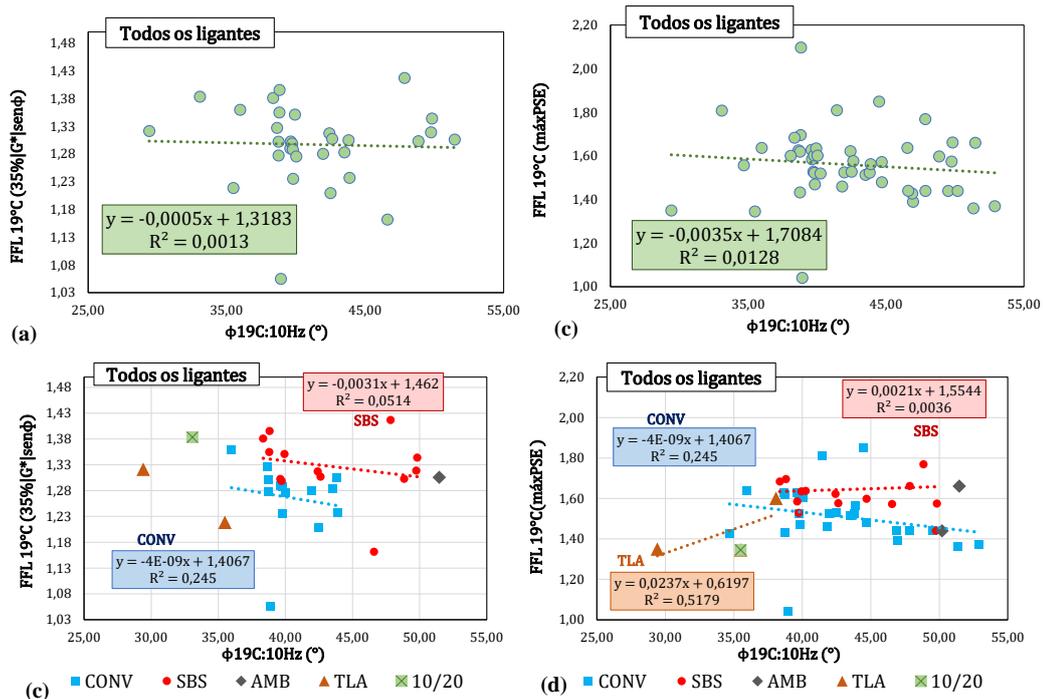
Da mesma forma, não foram obtidas correlações satisfatórias com o ângulo de fase a  $19^{\circ}C$  e 10 Hz (Figura 73). Como ocorreu na correlação anterior, apenas o CAP TLA seguiu uma tendência esperada, com maiores ângulos de fase gerando maiores valores de  $FFL_{19^{\circ}C}$ , mas a quantidade desses dados ainda não é suficiente.

Figura 72 - Correlações entre  $FFL_{19^{\circ}C}$  e  $|G^*|_{19^{\circ}C:10Hz}$ : geral (a) 35% $|G^*|_{sen\phi}$  e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35% $|G^*|_{sen\phi}$  e (d) máxPSE



Fonte: Autora.

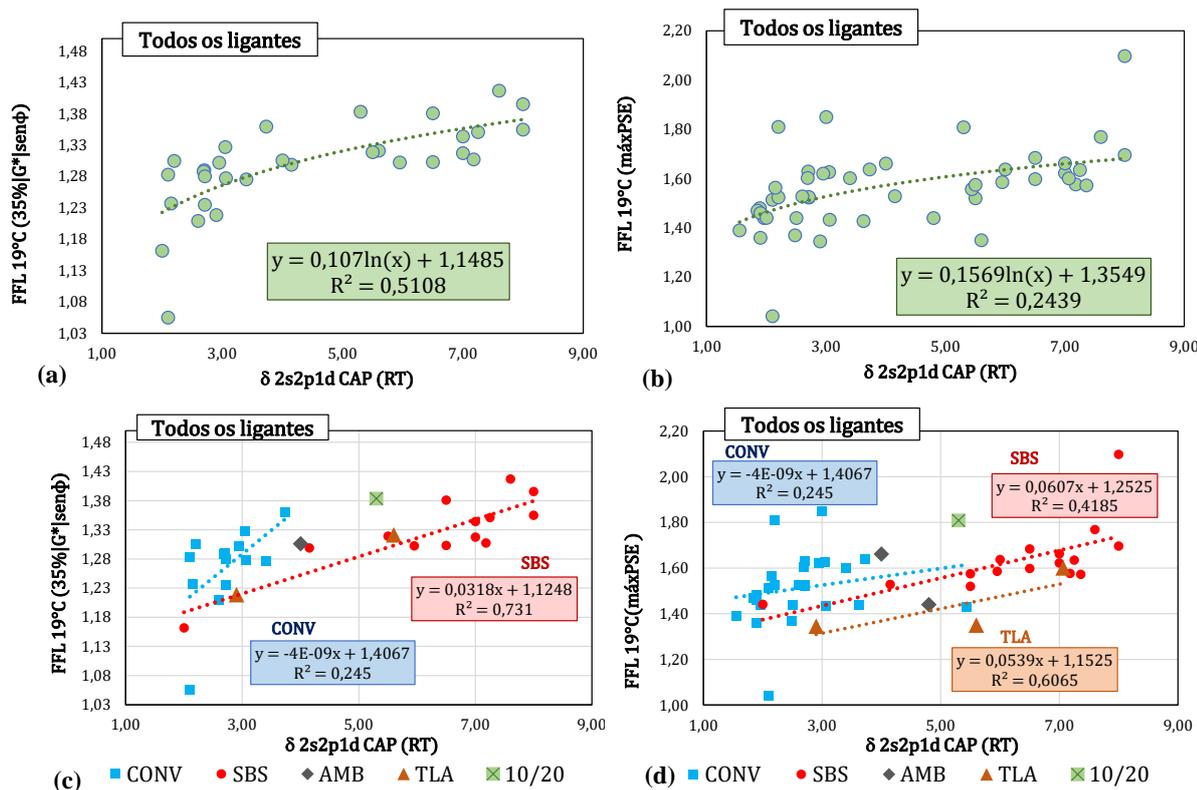
Figura 73 - Correlações entre  $FFL_{19^{\circ}C}$  e  $\phi_{19^{\circ}C:10Hz}$ : geral (a) 35% $|G^*|_{sen\phi}$  e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35% $|G^*|_{sen\phi}$  e (d) máxPSE



Fonte: Autora.

Por fim, foram realizadas as correlações com o parâmetro  $\delta$  da modelagem 2s2p1d dos ligantes, conforme mostrado na Figura 74, e embora os coeficientes de determinação encontrados não sejam elevados para estabelecer uma relação única entre os dois índices, é possível notar uma relação positiva entre eles. Assim, maiores valores de  $\delta$  tendem a promover maiores valores de  $FFL_{19^\circ C}$ . As melhores correlações encontradas foram para o critério 35%|G\*|sen $\phi$ , na forma logarítmica quando observados todos os tipos de ligantes, e de forma linear na separação entre eles. Além disso, ligantes modificados por polímero apresentam, de forma geral, maiores valores de  $\delta$ .

Figura 74 - Correlações entre  $FFL_{19^\circ C}$  e  $\delta$  2s2p1d CAP (RT): geral (a) 35%|G\*|sen $\phi$  e (b) máxPSE; por tipo de CAP (c) 35%|G\*|sen $\phi$  e (d) máxPSE



Fonte: Autora.

A Tabela 47 foi dividida de acordo com os limites propostos por Possebon (2021) para o  $FFL_{19^\circ C}$  (máxPSE), e contém dados de viscoelasticidade linear para esses ligantes (até 1,22, até 1,31, até 1,48, até 1,57 e superior a 1,57). Pela tabela, fica mais evidente a superioridade

dos ligantes modificados com polímero, visto que a maioria ficou na primeira classe de FFL<sub>19°C</sub> (máxPSE), considerado como excelente por Possebon.

A partir desses dados, foram obtidas as correlações para os ligantes novos, sem considerar ligantes extraídos de misturas após usinagem ou recicladas. Não foi possível observar melhora nas correlações entre  $\phi_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$  e  $\delta$  do 2s2p1d com o FFL<sub>19°C</sub> (Figura 75). Ainda, dentro dos grupos gerados pelos limites de FFL<sub>19°C</sub> (máxPSE), os dados não seguiram o pressuposto de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, e, portanto, os intervalos de confiança foram obtidos pelo método *Bootstrap* descrito anteriormente.

Tabela 47 - Divisão dos ligantes segundo limites para FFL<sub>19°C</sub> (máxPSE) de Possebon (2021)

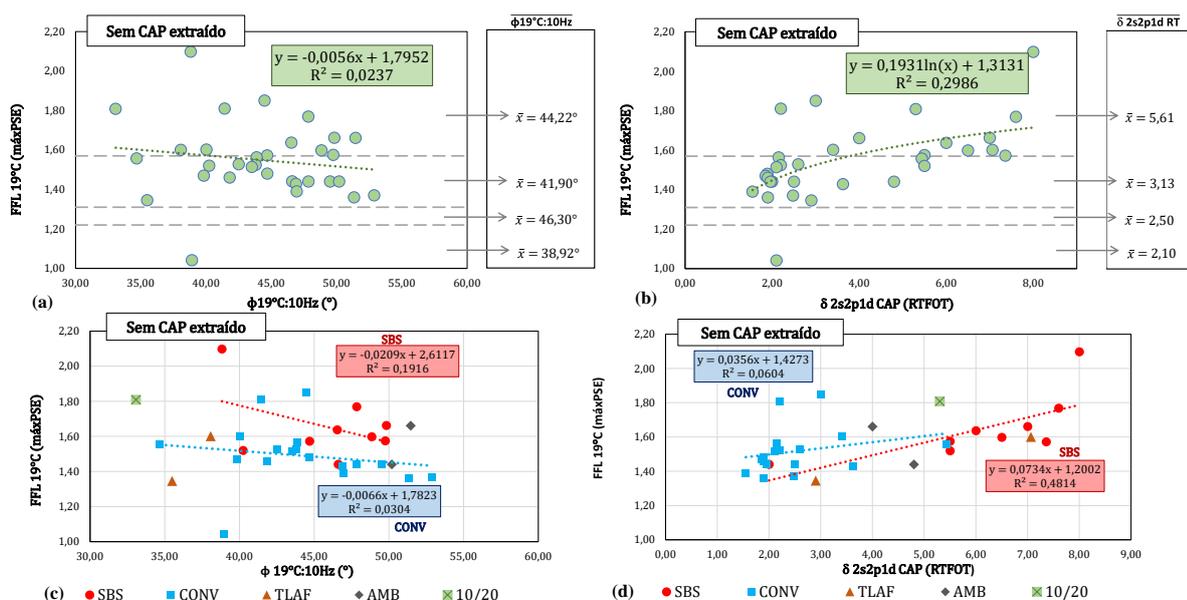
máxPSE				
ORDEM	Nomenclatura	FFL <sub>19°C</sub> RT máxPSE	$\phi_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	$\delta$ RT 2s2p1d
1º	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	2,098	38,82	8,00
2º	50/70 - F (Possebon, 2021)	1,850	44,48	3,00
3º	50/70 - I (Possebon, 2021)	1,810	41,42	2,20
4º	EGL-19 - A - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1,808	33,08	5,30
5º	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,769	47,84	7,60
6º	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,662	49,83	7,00
7º	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,661	51,46	4,00
8º	HIMA (Vestena, 2021)	1,637	46,54	6,00
9º	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,602	40,03	3,40
10º	TLAF (Vestena, 2021)	1,601	38,07	7,06
11º	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	1,598	48,84	6,50
12º	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,575	49,75	5,50
13º	SBS (Vestena, 2021)	1,572	44,68	7,36
14º	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,563	43,88	2,15
15º	CONV - cap extraído (Vestena, 2021)	1,557	34,68	5,44
16º	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	1,528	42,50	2,60
17º	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,524	43,80	2,20
18º	60/85E (Possebon, 2021)	1,520	40,24	5,50
19º	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,514	43,51	2,10
20º	50/70 - C (Possebon, 2021)	1,480	44,69	1,89
21º	50/70 - E (Possebon, 2021)	1,470	39,83	1,85
22º	30/45 (Possebon, 2021)	1,460	41,81	1,90
23º	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	1,441	46,60	2,00
24º	50/70 - G (Possebon, 2021)	1,440	49,51	2,50
25º	50/70 - H (Possebon, 2021)	1,440	47,85	1,96
26º	AR (Possebon, 2021)	1,440	50,19	4,80
27º	CONV (Vestena, 2021)	1,428	46,90	3,63
28º	50/70 - D (Possebon, 2021)	1,390	46,95	1,55
29º	50/70 - B (Possebon, 2021)	1,370	52,88	2,48
30º	50/70 - A (Possebon, 2021)	1,360	51,34	1,90
31º	EGL-19 - A - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	1,346	35,49	2,90
32º	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	1,041	38,92	2,10

Fonte: Autora.

A Tabela 48 mostra o resultado dos intervalos de confiança para os parâmetros  $\phi_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$  e  $\delta$  2s2p1d CAP (RT), para os 3 primeiros grupos de FFL<sub>19°C</sub>(máxPSE), uma

vez que o último grupo foi composto apenas pelo ligante da mistura DERSA-FX III-50/70 PA 85.

Figura 75 - Correlações com  $FFL_{19^{\circ}C}$  (máxPSE) sem ligantes extraídos: geral (a)  $\phi 19^{\circ}C:10Hz$  e (b)  $\delta 2s2p1d$  CAP RT; por tipo de CAP (c)  $\phi 19^{\circ}C:10Hz$  e (d)  $\delta 2s2p1d$  CAP RT



Fonte: Autora.

Tabela 48 - Intervalos de confiança para  $19^{\circ}C:10Hz$  e  $\delta 2s2p1d$  CAP RT dentro dos limites de  $FFL_{19^{\circ}C}$ (máxPSE)

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
$\phi 19^{\circ}C:10Hz$ ( $^{\circ}$ )	1	44,22	5,56	-2,95	2,63	[ 41,27 - 46,85 ]
	2	41,90	3,49	-2,62	1,94	[ 39,28 - 43,84 ]
	3	46,30	5,26	-3,04	2,81	[ 43,27 - 49,11 ]
$\delta RT 2s2p1d$	1	5,61	1,91	-1,02	0,97	[ 4,59 - 6,58 ]
	2	3,13	1,61	-1,00	1,33	[ 2,13 - 4,46 ]
	3	2,50	0,96	-0,47	0,60	[ 2,03 - 3,10 ]

Fonte: Autora.

No que se refere ao ângulo de fase, não foi possível estabelecer classes definidas, visto que todos os grupos tiveram intersecção dos intervalos entre si, para o nível de confiança estabelecido (95%). Para o valor de  $\delta$ , os 2 últimos grupos tiveram intersecção, mas as médias indicam que a queda desse parâmetro promove piora na fadiga em ligantes. No entanto, é possível afirmar, com 95% de confiança, que ligantes com  $FFL_{19^{\circ}C}$ (máxPSE) acima de 1,57 possuem valores de  $\delta$  maiores que 4,59. Assim, ao contrário da deformação permanente, não

foi possível observar tendências claras da fadiga em ligantes a partir de dados de viscoelasticidade linear.

Por fim, vale ressaltar que foram investigadas as correlações com os ensaios empíricos de penetração e recuperação elástica. Conforme os coeficientes de Pearson indicaram, não há relação entre esses valores e o  $FFL_{19^{\circ}C}$ .

### 5.1.3 Deformação permanente em misturas asfálticas

Considerando as matrizes de correlação do Apêndice G, as correlações mais fortes encontradas com o FN a partir de características dos agregados, dosagem, rigidez e danificação de misturas estão apresentadas na Tabela 49, com um nível de significância de 5%. No que diz respeito às propriedades individuais dos agregados, é possível perceber que somente o índice de forma da fração #3/4 apresentou correlação moderada com o parâmetro FN. Seu sinal positivo parece ser razoável, uma vez que agregados mais angulares (e, portanto, com índice de forma mais alto), promovem um intertravamento mais adequado para resistir às cargas do tráfego. Essa correlação foi realizada com 77 pares de dados, e parece ser um indicador promissor da deformação permanente em misturas.

Outras características dos agregados, embora apareçam na tabela por serem estatisticamente significantes, apresentaram tendências contrárias ao que era esperado. A correlação positiva dos passantes nas peneiras #3/8 e #4, e a correlação negativa do equivalente de areia, reforçam a tendência de que uma maior quantidade de agregados miúdos ou de finos plásticos, no caso do equivalente de areia mais baixo, promovem maior resistência à deformação permanente, e são tendências contrárias ao que se esperava. Além disso, foi observada uma fraca correlação positiva entre os vazios do agregado mineral (VAM) e o FN, o que também não era esperado.

Essas distorções podem ocorrer pela própria limitação da quantidade de dados disponíveis, presença de *outliers*, valores próximos aos limites ou ainda a correlação pode existir, mas não ser linear. As correlações nesses casos foram fracas, e contaram com 108 pares de dados para o equivalente de areia, 120 para o VAM e 141 pares para os passantes nas peneiras #3/8 e #4. As características dos agregados são mais facilmente acessíveis nos trabalhos consultados, mas aparentam não ser tão relevantes para a danificação das misturas.

Tabela 49 - Melhores correlações lineares para deformação permanente em misturas

PROPRIEDADES DAS MISTURAS			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1°	g sigmoidal	-0,72	Moderada
2°	$\phi_{21^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$	-0,56	Moderada
3°	$\phi_{19^{\circ}\text{C}:10\text{Hz}}$	-0,54	Moderada
3°	E00	0,54	Moderada
4°	$ E^* _{54^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$	0,50	Moderada
5°	Índice de forma #3/4	0,49	Moderada
6°	h 2s2p1d	-0,47	Moderada
7°	d sigmoidal	0,46	Moderada
7°	Energia máxima (ensaio RT)	0,46	Moderada
8°	$ E^* /\text{sen}\phi_{54^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$	0,43	Moderada
9°	Teor de RAP	0,41	Moderada
10°	b sigmoidal	0,39	Fraca
11°	Abrasão Los Angeles	0,37	Fraca
11°	Passante #3/8	0,37	Fraca
12°	k 2s2p1d	-0,35	Fraca
13°	Passante #4	0,33	Fraca
14°	Equivalente de areia	-0,31	Fraca
14°	a sigmoidal	-0,31	Fraca
15°	$ E^* _{19^{\circ}\text{C}:10\text{Hz}}$	0,30	Fraca
15°	VAM	0,30	Fraca
16°	$ E^* _{21^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$	0,27	Fraca
16°	$ E^* /\text{sen}\phi_{21^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$	-0,27	Fraca
17°	$\tau$ 2s2p1d	0,26	Fraca

Fonte: Autora.

Em seguida, foram encontradas algumas correlações moderadas com parâmetros reológicos das misturas. Índices com potencial para prever a tendência do FN são o  $|E^*|_{54^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$  e o  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$ , com 130 pares na análise. As correlações indicam que misturas que mantêm maiores valores de rigidez e menores ângulos de fase mesmo em temperaturas elevadas, tendem a ter melhor comportamento à deformação permanente, considerando o ensaio uniaxial de cargas repetidas. Outros parâmetros de viscoelasticidade linear não eram esperados como significativos, como é o caso do ângulo de fase em temperaturas intermediárias ( $\phi_{21^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $\phi_{19^{\circ}\text{C}:10\text{Hz}}$ ). Foram correlacionados 132 pares para  $\phi_{21^{\circ}\text{C}:1\text{Hz}}$  e 121 para  $\phi_{19^{\circ}\text{C}:10\text{Hz}}$ . Maiores investigações serão realizadas posteriormente, e novamente podem não refletir relações de causa e efeito.

Destacam-se ainda parâmetros das modelagens matemáticas das curvas mestras desses materiais, obtidas pelo ensaio de módulo dinâmico em diferentes frequências de aplicação de carga e temperaturas. O parâmetro h da modelagem obteve uma correlação negativa moderada a partir de 121 pares de dados. A mudança desse parâmetro altera a rigidez e o ângulo de fase nas temperaturas intermediárias a altas, e seu sinal negativo parece razoável. Maiores valores

de  $h$  diminuem a rigidez nessa faixa de temperatura, e eleva o pico do ângulo de fase (maior comportamento viscoso), o que acarreta em menores valores de FN.

Também com 121 pares de dados, a rigidez mínima atingida pela mistura E00 apresentou correlação moderada positiva com o FN. Esse resultado foi de acordo com o esperado, visto que nas temperaturas muito elevadas ou frequências baixíssimas de carregamento, manter um valor de rigidez mínimo satisfatório (em decorrência da presença do agregado), auxilia na deformação permanente.

Outros parâmetros de modelagem que forneceram correlações lineares moderadas foram “ $d$ ” e “ $g$ ” do modelo sigmoidal, com 84 pares de dados testados. Esse modelo é apenas um ajuste matemático de curva, por minimização do erro quadrático. O parâmetro “ $d$ ” forneceu uma correlação contrária ao esperado. Maiores valores de “ $d$ ” reduzem a rigidez de uma forma geral, deslocando a curva mestra de módulo dinâmico por inteiro. Esperava-se que essa redução provocasse uma tendência de redução no FN, o que não ocorreu por essa análise. No entanto, destacou-se o parâmetro “ $g$ ” como a melhor correlação linear, com tendência razoável. Aumentar o valor de “ $g$ ” significa reduzir a rigidez do material nas altas temperaturas e/ou baixas frequências de carregamento, prejudicando a mistura na deformação permanente, o que justifica o sinal negativo da correlação.

Não era esperada a correlação moderada entre a energia máxima do ensaio de RT, uma vez que a DP não é um problema de tração e ocorre em temperaturas mais elevadas (o ensaio de RT é realizado a 25°C). Essa análise foi obtida com 56 pares de dados, e pode muitas vezes não refletir relações de causa e efeito, mas sim aleatoriedade. Por fim, a correlação positiva encontrada pelo teor de RAP é razoável, visto que a utilização de misturas recicladas e com ligante já oxidado implica em maior rigidez e maior comportamento elástico (maior FN).

Considerando, portanto, como parâmetro de referência o FN, foi obtida a classificação das misturas asfálticas, e está apresentada na Tabela 50. As misturas ainda estão divididas de acordo com os limites propostos por Faccin (2018) para o FN, estabelecendo valores a partir de 300 ciclos para tráfego médio, a partir de 600 ciclos para tráfego pesado e superior a 2000 ciclos para tráfegos extremamente pesados. O autor propôs tais limites com base no estudo de concretos asfálticos em utilização no sul do país. Além disso, também foi apresentada a divisão de FN proposta no MeDiNa, para uma condição de tráfego normal. Para facilitar o entendimento e seguir a sequência das análises anteriores, o padrão de cores seguiu o mesmo das seções passadas, conforme o tipo de ligante.

Tabela 50 - Classificação das misturas pelo FN e limites de tráfego de Faccin (2018)

Ordem	Nomenclatura	FN	Tráfego Faccin (2018)	Tráfego MeDiNa	Ordem	Nomenclatura	FN	Tráfego Faccin (2018)	Tráfego MeDiNa
1º	U2-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	74º	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	517	Médio	Pesado
2º	U6-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	75º	BS 60/85 (Barboza Jr., 2018)	509	Médio	Pesado
3º	U7-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	76º	UFSM 3 - 50/70 12,5 mm(b) (Santos e outros, 2015)	501	Médio	Pesado
4º	U14-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	77º	Neat REF (Almeida Júnior, 2022)	497	Médio	Pesado
5º	M BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	78º	UFSM 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)	497	Médio	Pesado
6º	M CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	79º	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	497	Médio	Pesado
7º	M BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	80º	S BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	492	Médio	Pesado
8º	M CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	81º	U10-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	485	Médio	Pesado
9º	S BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	82º	EGL-19 - A - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	484	Médio	Pesado
10º	S CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	83º	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	464	Médio	Pesado
11º	S BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	84º	M20 (Luzzi, 2019)	455	Médio	Pesado
12º	S CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	7200	Ext. Pesado	-	85º	M BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	449	Médio	Pesado
13º	TLAF (Vestena, 2021)	7200	Ext. Pesado	-	86º	S CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	444	Médio	Pesado
14º	SBS (Vestena, 2021)	7200	Ext. Pesado	-	87º	GC 60/85 (Barboza Jr., 2018)	431	Médio	Pesado
15º	Neat RAP (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	88º	M0 (Luzzi, 2019)	424	Médio	Pesado
16º	Neat RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	89º	M BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	370	Médio	Pesado
17º	Neat RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	90º	U8-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	359	Médio	Pesado
18º	Neat RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	91º	U13-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	336	Médio	Pesado
19º	Neat RAP + 8% R + 1% HIMA (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	92º	M CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	329	Médio	Pesado
20º	SBS RAP (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	93º	GS 60/85 (Barboza Jr., 2018)	316	Médio	Pesado
21º	SBS RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	94º	M CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	314	Médio	Pesado
22º	SBS RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	95º	M30 (Luzzi, 2019)	309	Médio	Pesado
23º	SBS RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	96º	U4-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	284	-	Médio
24º	SBS RAP + 8% R + 1% HIMA (Almeida Júnior, 2022)	7200	Ext. Pesado	-	97º	CAF20 (Centofante, 2016)	262	-	Médio
25º	RAP A 100°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	98º	U2-DAER-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	262	-	Médio
26º	RAP A 140°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	99º	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	234	-	Médio
27º	RAP A 170°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	100º	50/70 - F (Possebon, 2021)	233	-	Médio
28º	RAP B 100°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	101º	CONV lab (Ilha, 2022)	228	-	Médio
29º	RAP B 140°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	102º	U11-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	226	-	Médio
30º	RAP B 170°C (Teixeira e outros, 2017)	7200	Ext. Pesado	-	103º	30/45 (Possebon, 2021)	214	-	Médio
31º	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	7200	Ext. Pesado	-	104º	50/70 - C (Possebon, 2021)	176	-	Médio
32º	SBS lab (Ilha, 2022)	7037	Ext. Pesado	-	105º	U5-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	175	-	Médio
33º	TLAF lab (Ilha, 2022)	6950	Ext. Pesado	-	106º	BC 50/70 (Barboza Jr., 2018)	175	-	Médio
34º	S BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	6300	Ext. Pesado	-	107º	50/70 - H (Possebon, 2021)	165	-	Médio
35º	HIMA (Vestena, 2021)	6070	Ext. Pesado	-	108º	V509 M6 (Bordin e outros, 2020)	164	-	Médio
36º	S BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	5528	Ext. Pesado	-	109º	U3-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	158	-	Médio
37º	S CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	5367	Ext. Pesado	-	110º	60/85E (Possebon, 2021)	158	-	Médio
38º	S CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	5165	Ext. Pesado	-	111º	AMP 60/85 (Oliveira, 2019)	158	-	Médio
39º	HIMA lab (Ilha, 2022)	5064	Ext. Pesado	-	112º	CACAMPO (Rossato e outros, 2015)	158	-	Médio
40º	BN25-D - A - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	3821	Ext. Pesado	-	113º	CALAB 50/70 (Rossato e outros, 2015)	158	-	Médio
41º	M BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	2976	Ext. Pesado	-	114º	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	155	-	Médio
42º	M BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	2945	Ext. Pesado	-	115º	CAF10 (Centofante, 2016)	150	-	Médio
43º	EGL-19 - A - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	2473	Ext. Pesado	-	116º	30 RAP 60/85 (Correa, 2020)	143	-	Médio
44º	M CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	2244	Ext. Pesado	-	117º	U1-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	132	-	Médio
45º	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	2072	Ext. Pesado	-	118º	50/70 - D (Possebon, 2021)	132	-	Médio
46º	U9-DNIT-FXC-TLAF (Faccin e outros, 2018)	2001	Ext. Pesado	-	119º	50/70 - A (Possebon, 2021)	128	-	Médio
47º	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1764	Pesado	Ext. Pesado	120º	AR (Possebon, 2021)	124	-	Médio
48º	M CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1742	Pesado	Ext. Pesado	121º	ECOFLEX B-3G (Oliveira, 2019)	124	-	Médio
49º	BN25-D - A - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1485	Pesado	Ext. Pesado	122º	GC 50/70 (Barboza Jr., 2018)	115	-	Médio
50º	BN25-D - B - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	1215	Pesado	Ext. Pesado	123º	20 RAP 60/85 (Correa, 2020)	111	-	Médio
51º	BN25-D - B - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1140	Pesado	Ext. Pesado	124º	V509 M2 (Bordin e outros, 2020)	102	-	Médio
52º	U2-DNIT-FXC-65/90 (Faccin e outros, 2018)	1033	Pesado	Ext. Pesado	125º	V509 M1 (Bordin e outros, 2020)	80	-	Leve
53º	EGL-19 - B - TLA (Nunes-Ramos, 2023)	1011	Pesado	Ext. Pesado	126º	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	75	-	Leve
54º	EGL-19 - B - 10/20 (Nunes-Ramos, 2023)	1004	Pesado	Ext. Pesado	127º	50/70 - G (Possebon, 2021)	70	-	Leve
55º	U12-DAER-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	986	Pesado	Ext. Pesado	128º	GS 50/70 (Barboza Jr., 2018)	68	-	Leve
56º	U12-DAER-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	923	Pesado	Ext. Pesado	129º	BS 50/70 (Barboza Jr., 2018)	65	-	Leve
57º	U14-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	822	Pesado	Ext. Pesado	130º	U5-DNIT-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	61	-	Leve
58º	U8-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	779	Pesado	Ext. Pesado	131º	CAref (Centofante, 2016)	60	-	Leve
59º	BC 60/85 (Barboza Jr., 2018)	719	Pesado	Pesado	132º	0% Areia (Schuster e outros, 2016)	51	-	Leve
60º	S CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	662	Pesado	Pesado	133º	2% Areia (Schuster e outros, 2016)	51	-	Leve
61º	U9-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	647	Pesado	Pesado	134º	4% Areia (Schuster e outros, 2016)	43	-	Leve
62º	SBS REF (Almeida Júnior, 2022)	645	Pesado	Pesado	135º	U5-DNIT-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	37	-	Leve
63º	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	645	Pesado	Pesado	136º	30 RAP 50/70 (Correa, 2020)	34	-	Leve
64º	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	636	Pesado	Pesado	137º	10 RAP 60/85 (Correa, 2020)	29	-	Leve
65º	CONV (Vestena, 2021)	634	Pesado	Pesado	138º	6% Areia (Schuster e outros, 2016)	29	-	Leve
66º	CONV - cap extraído (Vestena, 2021)	634	Pesado	Pesado	139º	20 RAP 50/70 (Correa, 2020)	26	-	Leve
67º	S BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	597	Médio	Pesado	140º	REF 60/85 (Correa, 2020)	23	-	Leve
68º	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	597	Médio	Pesado	141º	50/70 - I (Possebon, 2021)	21	-	Leve
69º	M10 (Luzzi, 2019)	590	Médio	Pesado	142º	50/70 - B (Possebon, 2021)	18	-	Leve
70º	U4-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	564	Médio	Pesado	143º	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	18	-	Leve
71º	UFSM 3 - 50/70 12,5 mm(a) (Santos e outros, 2015)	552	Médio	Pesado	144º	50/70 - E (Possebon, 2021)	17	-	Leve
72º	U14-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	546	Médio	Pesado	145º	REF 50/70 (Correa, 2020)	17	-	Leve
73º	CAF30 (Centofante, 2016)	540	Médio	Pesado	146º	10 RAP 50/70 (Correa, 2020)	16	-	Leve

Fonte: Autora.

A partir da tabela e pelos limites de Faccin (2018) é possível observar que o primeiro grupo de misturas, os quais possuem FN adequado a suportar tráfegos extremamente pesados, é composto majoritariamente por misturas modificadas por polímero (SBS e HiMA), contendo algumas misturas modificadas por TLA ou pela combinação de TLA e polímero SBS (TLA Flex). Seguindo a tendência encontrada para os ligantes, os polímeros SBS promovem um salto na qualidade das misturas frente à deformação permanente, quando avaliadas pelo ensaio uniaxial de cargas repetidas. No entanto, essas misturas apenas seriam recomendadas pelo MeDiNa para tráfego extremamente pesado se fossem condições severas.

Ainda dentro desse primeiro grupo, existem algumas misturas com ligante convencional, mas tratam-se de misturas recicladas (com RAP). Esses materiais, por possuírem um ligante já oxidado, possuem maior rigidez e um comportamento elástico mais evidente, o que é desejado na deformação permanente e que pode explicar esse resultado. Investigações sobre viscoelasticidade linear das misturas serão realizadas mais adiante.

Dentro do segundo grupo de misturas, para tráfego pesado, ainda há evidência da superioridade das misturas com asfalto modificado por polímero e asfalto natural, mas também aparecem misturas com CAP duro 10/20, o que pode ser um indicativo de que misturas com ligantes mais rígidos são efetivamente melhores à deformação permanente. Das 20 misturas contidas no grupo, 11 possuem ligante modificado, 3 são com CAP 10/20 e apenas 6 possuem CAP convencional. Para o MeDiNa, 12 misturas desse grupo poderiam suportar tráfego extremamente pesado em condições normais, sendo 2 com CAP 50/70.

O terceiro grupo indica que muitos ligantes convencionais são adequados para resistir um tráfego médio, contendo poucas misturas com ligantes modificados, sendo que muitas são misturas com RAP de Luzzi (2019). Das misturas com FN mais baixo, pertencentes ao quarto grupo, a grande maioria é composta por misturas com ligante convencional, e todas as misturas com CAP borracha ficaram nessa classificação (FN < 300 ciclos). Para o MeDiNa, a maioria das misturas de tráfego médio de Faccin suportariam tráfego pesado em condições normais, e ainda discretiza melhor as misturas do final da tabela (separando em tráfego médio e leve). Nesse caso, a maior parte das misturas com AMB suportariam um tráfego médio.

É interessante destacar, ainda, que todas as misturas de Ilha (2022) obtiveram menores valores de FN quando comparadas às respectivas misturas de Vestena (2021). Ilha reproduziu em laboratório as misturas coletadas após usinagem por Vestena, e o resultado da Tabela 50 dá indícios de maior oxidação da usinagem em relação ao envelhecimento de misturas

simulado em laboratório. Ainda, também sinaliza a influência do ligante mais rígido nos maiores valores de FN. Da mesma forma, observando a nomenclatura das misturas, fica evidente que as misturas estudadas por Pires (2020) e Schuster (2023) que possuem maior FN, possuem também ligantes com maior PGH, evidenciando que a rigidez dos mesmos é um indicador importante para a deformação permanente.

A divisão da tabela pelos limites de Faccin (2018), portanto, confirmam que a variação do ligante asfáltico é um forte indicador da qualidade das misturas, embora existam exceções. No entanto, selecionar ligantes adequados ao tráfego e ao clima do local de implantação da rodovia é um passo importante na garantia da qualidade da mesma, evitando ATRs excessivos. Além disso, cabe mencionar que a grande maioria das misturas asfálticas foram produzidas com agregados do estado do Rio Grande do Sul, que são de boa qualidade, fazendo com que o efeito do ligante asfáltico seja mais predominante do que eventuais modificações no arranjo granulométrico, por exemplo.

Considerando as variáveis com coeficiente de correlação de Pearson moderados em relação ao FN, foram investigadas as correlações por meio de linhas de tendência com as características das misturas que poderiam descrever a evolução do FN de maneira adequada. As melhores relações encontradas estão apresentadas na Figura 76. Foram realizadas outras correlações desconsiderando pontos considerados *outliers*, mas não houve melhora significativa nos coeficientes de determinação. Os outliers foram pontos acima ou abaixo dos limites superior (Ls) e inferior (Li) das Equações 28 e 29.

$$Ls = Q3 + 1,5 * IIQ \quad (28)$$

$$Li = Q1 - 1,5 * IIQ \quad (29)$$

Onde:

Q3 = terceiro quartil;

Q1 = primeiro quartil;

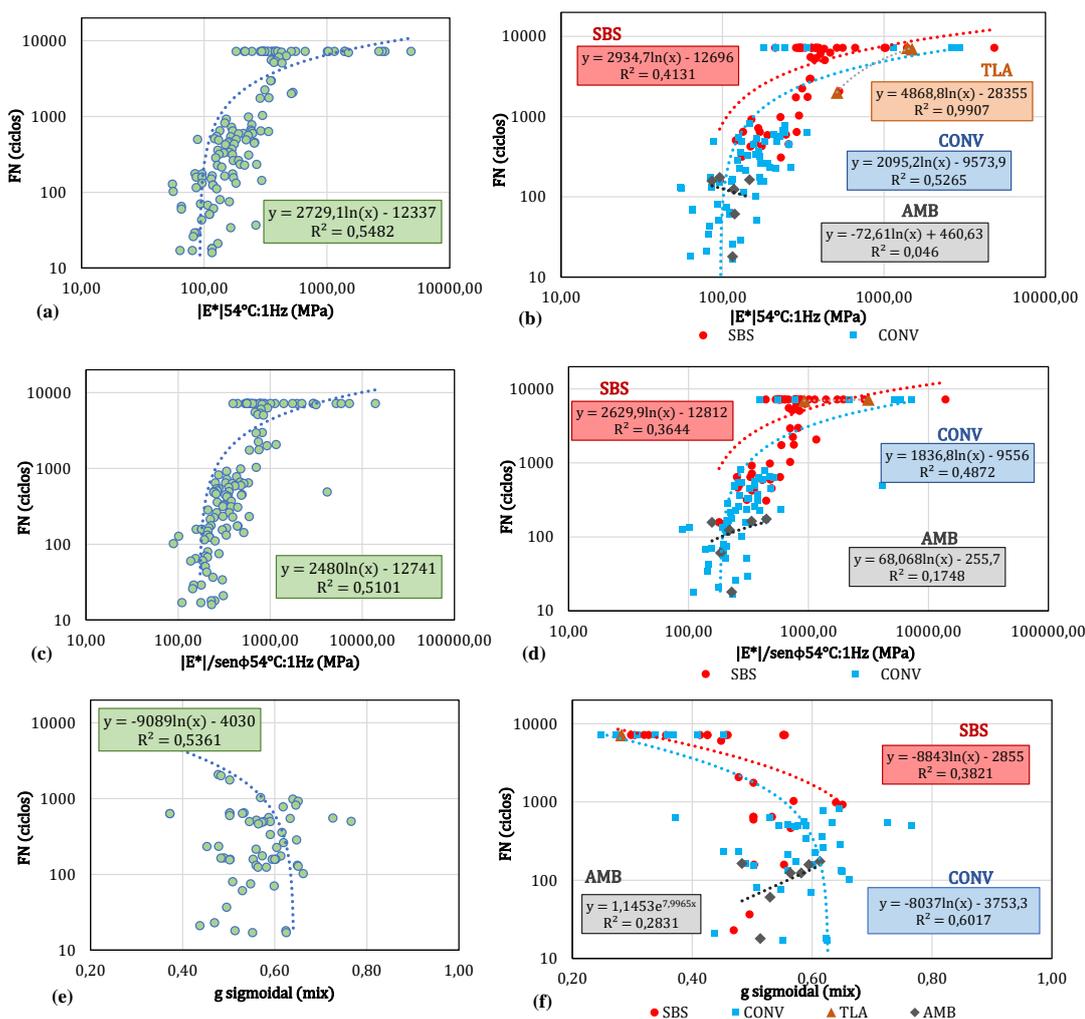
IIQ = intervalo interquartis.

Considerando a rigidez em alta temperatura ( $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ), pode ser observado um aumento no valor do FN sob forma logarítmica com maiores valores dessa rigidez. A correlação geral foi regular, mas houve redução no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) quando

visualizadas as correlações por tipo de ligante. Ainda, confirmando as tendências observadas anteriormente, ligantes modificados por polímero SBS (incluindo os altamente modificados, HiMA), possuem maior rigidez em altas temperaturas e são melhores para a deformação permanente considerando esse ensaio.

Os dados de misturas com asfalto-borracha ainda são escassos, e essa correlação foi muito baixa, inclusive com uma tendência contrária a esperada. Essas misturas ficaram como pontos dispersos em meio às misturas com CAP convencional. Já para misturas com CAP TLA, a correlação foi excelente, mas não se pode obter nenhuma conclusão significativa, dado que há apenas 3 pontos com esses dados, mas, de forma geral, essas misturas ficaram no quadrante de altas rigidezes e altos valores de FN.

Figura 76 - Correlações com FN:  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  (a) geral e (b) por tipo de CAP;  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  (c) geral e (d) por tipo de CAP; g sigmoidal (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

As correlações combinando a rigidez e o ângulo de fase em alta temperatura foram um pouco mais baixas que as anteriores, bem como as correlações separadas por tipo de CAP ficaram abaixo da correlação geral. As tendências por tipo de ligante são as mesmas do gráfico anterior. Por fim, a correlação geral com o parâmetro “g” da modelagem sigmoidal foi regular, obtendo melhora quando consideradas somente as misturas com CAP convencional. Novamente, as tendências para misturas com CAP borracha foram contrárias ao esperado, e ainda faltam dados de caracterização para esse tipo de material.

Por fim, buscou-se encontrar os intervalos de confiança para diversos índices, a partir das misturas separadas nos 4 grupos de FN de Faccin (2014) (Figura 76), seguindo o método *Bootstrap* com 95% de confiança. Misturas do grupo 1 são as que suportam o tráfego mais pesado.

No caso da rigidez em alta temperatura ( $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ), foi possível estabelecer os limites dentro das 4 classes de FN. Por exemplo, misturas com FN superior a 2000 ciclos possuem  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  mínimo de 514,79 MPa, e misturas que suportam menos de 300 ciclos possuem  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  abaixo de 142,31 MPa. No caso do parâmetro  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , os grupos 2 e 3 possuíram intersecção entre si, mas foi possível estabelecer que misturas do grupo 1 possuem  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  superior a 1059,11 MPa, e para misturas do grupo 4 esse valor fica abaixo de 273,72 MPa.

O mesmo ocorreu para a rigidez mínima da modelagem 2s2p1d de misturas, com os grupos 1 e 4 permanecendo com limites bem definidos. Misturas do grupo 1 possuem  $E_{00}$  maior que 105,95 MPa, e do grupo 4 possuem  $E_{00}$  abaixo de 57,99 MPa. Esse valor, conforme discutido, tem a ver com a rigidez “residual” da mistura em alta temperatura, devido à presença do agregado.

No caso do parâmetro “h” do 2s2p1d, os grupos 2, 3 e 4 não possuem limites bem definidos para a quantidade de dados estudada. No entanto, misturas do grupo 1 possuem “h” inferior a 0,52. Para o índice “g” da modelagem sigmoidal, ocorre a mesma questão, e misturas que suportam mais de 2000 ciclos no ensaio uniaxial de cargas repetidas possuem “g” inferior a 0,43. Por fim, observando os intervalos para o índice de forma, novamente ficaram estabelecidos limites para os grupos 1 e 4 de FN. Misturas que suportam mais de 2000 ciclos possuem índice de forma da fração #3/4 mínimo de 1,43, e misturas que suportam menos de 300 ciclos ficam com esse valor abaixo de 0,92.

Tabela 51 - Intervalos de confiança de propriedades das misturas segundo grupos de FN

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
E* 54°C:1Hz	1	753,98	919,78	-239,20	285,81	[ 514,79 - 1039,80 ]
	2	233,18	69,75	-35,30	35,38	[ 197,88 - 268,55 ]
	3	174,60	46,16	-18,04	17,45	[ 156,56 - 192,05 ]
	4	126,92	54,00	-14,19	15,39	[ 112,72 - 142,31 ]
E* /senφ 54°C:1Hz	1	1650,96	2389,43	-591,85	778,80	[ 1059,11 - 2429,76 ]
	2	459,79	154,85	-74,38	81,07	[ 385,41 - 540,8643 ]
	3	503,59	779,06	-180,53	328,81	[ 323,06 - 832,41 ]
	4	243,17	102,01	-26,06	29,46	[ 215,48 - 273,72 ]
E00 2s2p1d mix	1	122,72	52,56	-16,77	18,40	[ 105,95 - 141,12 ]
	2	81,20	41,65	-20,30	21,25	[ 60,89 - 102,45 ]
	3	78,53	29,20	-11,20	11,61	[ 67,34 - 90,14 ]
	4	51,73	21,75	-5,91	6,27	[ 45,81 - 57,99 ]
h 2s2p1d mix	1	0,51	0,05	-0,02	0,02	[ 0,49 - 0,52 ]
	2	0,55	0,04	-0,02	0,02	[ 0,53 - 0,57 ]
	3	0,56	0,05	-0,02	0,02	[ 0,55 - 0,58 ]
	4	0,57	0,06	-0,02	0,02	[ 0,56 - 0,59 ]
g sigmoidal	1	0,39	0,09	-0,04	0,03	[ 0,36 - 0,43 ]
	2	0,54	0,10	-0,05	0,05	[ 0,48 - 0,59 ]
	3	0,60	0,07	-0,03	0,04	[ 0,57 - 0,64 ]
	4	0,56	0,06	-0,02	0,02	[ 0,54 - 0,58 ]
Índice de forma #3/4	1	1,67	0,56	-0,23	0,23	[ 1,43 - 1,89 ]
	2	1,06	0,48	-0,23	0,32	[ 0,83 - 1,37 ]
	3	1,31	0,60	-0,28	0,28	[ 1,03 - 1,59 ]
	4	0,90	0,06	-0,02	0,02	[ 0,88 - 0,92 ]

Fonte: Autora.

### 5.1.4 Fadiga em misturas asfálticas

A partir das matrizes de correlação do Apêndice G, foram elencados na Tabela 52 as correlações mais significativas, considerando um nível de significância de 5%. Ao contrário do que ocorre na deformação permanente, foi encontrada uma menor quantidade de variáveis que se correlacionem ao menos de forma moderada com o FFM das misturas, de forma individual.

O parâmetro “d” da modelagem sigmoidal dos dados de módulo dinâmico apresentou uma correlação moderada negativa com o FFM da mistura, tendência contrária às correlações de rigidez em temperaturas intermediárias que também estão presentes na tabela. Essa análise contou com 79 pares de dados. Conforme discutido anteriormente, maiores valores de “d” reduzem de forma geral a rigidez das misturas, e a correlação indica que isso seria prejudicial ao comportamento frente ao dano por fadiga. Ao contrário, as correlações negativas de |E\*| em temperaturas intermediárias inferem que menores valores de rigidez produziram maiores valores de FFM.

Outro parâmetro que forneceu uma correlação moderada com o FFM foi o índice  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$ , com 117 pares de dados analisados. O  $G^R$  se refere à taxa de variação da média de energia de pseudodeformação liberada, e quanto maior o valor de  $\Delta$ , menos inclinada estará a curva, o que representa um melhor comportamento à fadiga. Assim, a correlação positiva está razoável com o esperado para o parâmetro. No entanto, o índice  $\alpha$  da abordagem S-VECD é apresentado na tabela com fraca correlação linear, e com sinal contrário ao esperado, uma vez que essa é a taxa de evolução do dano (quanto maior essa taxa, espera-se que o desempenho da mistura seja mais baixo). Essa análise também teve 117 pares.

Tabela 52 - Melhores correlações lineares para fadiga em misturas

PROPRIEDADES DAS MISTURAS			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1°	d sigmoidal	-0,47	Moderada
1°	$\Delta$ (GR vs. $N_f$ )	0,47	Moderada
1°	$ E^* _{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$	-0,47	Moderada
2°	$ E^* _{21^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	-0,46	Moderada
3°	$ E^* _{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	-0,40	Fraca
3°	$ E^*  \sin \phi_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$	-0,40	Fraca
4°	VAM	0,37	Fraca
5°	FAF Bailey	-0,35	Fraca
6°	Teor de CAP	0,33	Fraca
7°	$\alpha$ S-VECD	0,32	Fraca
7°	RBV	0,32	Fraca
8°	$\phi_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$	0,31	Fraca
8°	$\phi_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	0,31	Fraca
9°	a (C vs. S)	0,30	Fraca
10°	C1 (WLF)	-0,27	Fraca
10°	C2 (WLF)	-0,27	Fraca

Fonte: Autora.

Como ocorreu nas seções anteriores, os parâmetros com correlação linear fraca podem ter sinal contrário ao esperado, devido aos fatores já elencados previamente. Os valores de ângulo de fase em temperaturas intermediárias tiveram sinal positivo da correlação e, embora seja uma correlação fraca, observa-se que a tendência de maiores valores de FFM com o aumento do comportamento viscoso das misturas em temperaturas intermediárias.

Além disso, o teor de ligante, também em uma correlação fraca, apontou que maiores teores são benéficos para a fadiga, seguindo também a tendência da relação betume vazios (RBV), com correlação positiva. Poucos parâmetros referentes aos agregados ou à

composição de agregados e ligantes aparecem na tabela, dando indícios de que a reologia das misturas, muito ligadas à reologia dos ligantes, é o fator mais influente para o comportamento à fadiga.

Buscando entender se algum parâmetro poderia individualmente descrever a tendência de evolução do FFM, foram obtidas as correlações gráficas e as linhas de tendência entre os indicadores, sendo que as melhores correlações encontradas estão apresentadas na Figura 77. Além das correlações apresentadas na figura, foram testados os indicadores  $|E^*|_{\text{sen}\phi 21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , VAM, FAF (Bailey), RBV e  $\phi 21^\circ\text{C}:1\text{Hz}$ . Mesmo para esses casos, dos parâmetros “d” da modelagem sigmoidal,  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$ , e a rigidez em temperatura intermediária ( $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ), os coeficientes de determinação encontrados foram baixos. É importante destacar que foram testadas as correlações sem *outliers*, e também descartando as misturas com RAP, mas não houve melhora nas correlações.

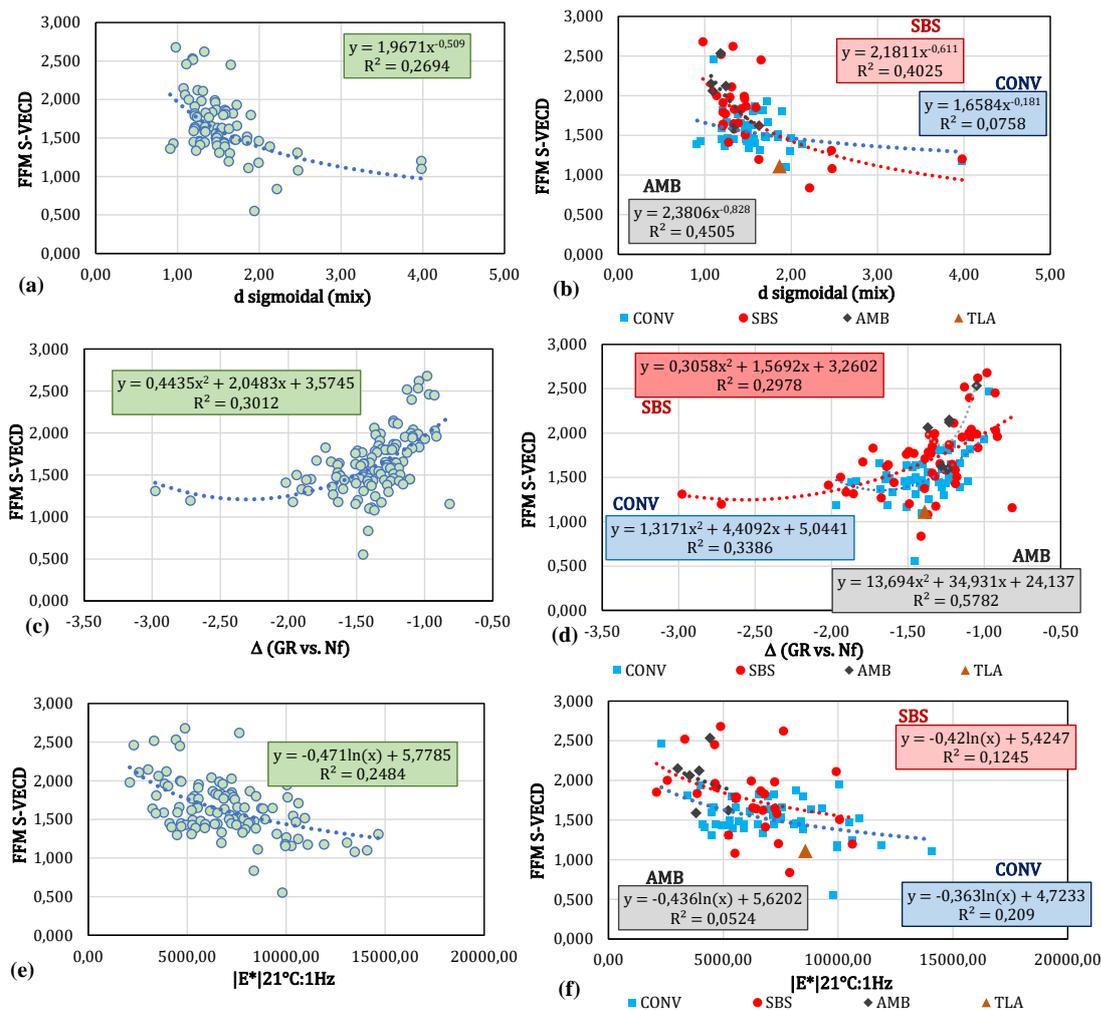
A Figura 77a e Figura 77b indicam uma tendência de queda do FFM com o aumento do parâmetro “d” da modelagem sigmoidal, e as melhores tendências encontradas foram para uma curva em forma de potência. Essa relação tende a melhorar quando os pontos são separados por tipo de ligante, exceto para CAPs sem modificação (convencionais). De forma geral, ligantes modificados por polímero (SBS e HiMA) e por borracha tendem a ter menores valores de “d” e maiores fatores de fadiga da mistura.

A Figura 77c e Figura 77d, por outro lado, mostram que maiores valores de  $\Delta$  sinalizam melhor comportamento à fadiga das misturas, sob curvas em formato de polinômio de 2º grau. Houve uma leve melhora nos coeficientes de determinação para as tendências individuais de CAP convencional e AMB. No entanto, não é possível observar diferenças claras entre misturas com diferentes tipos de ligantes observando o índice  $\Delta$ .

Por fim, a Figura 77e e Figura 77f indicam que maiores rigidezes em temperatura intermediária (21°C, nesse caso), pioram o comportamento à fadiga, mas essa correlação foi a mais baixa dentre as apresentadas. As correlações pioraram ao separar os pontos por tipo de ligante, e não é possível estabelecer uma diferença visual entre os conjuntos. No entanto, destacam-se os pontos das misturas com CAP borracha, por possuírem em geral menores rigidezes nessa faixa (21°C:1Hz) e maiores valores de FFM. Por fim, fica evidente que a fadiga em misturas asfálticas é um defeito mais complexo que a deformação permanente, e descrevê-lo adequadamente necessita de uma combinação de mais variáveis e simulações de

pavimentos, para abranger não só as características das misturas, mas também das camadas que a sustentam.

Figura 77 - Correlações com FFM S-VECD: d (sigmoidal) (a) geral e (b) por tipo de CAP;  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ) (c) geral e (d) por tipo de CAP;  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  (e) geral e (f) por tipo de CAP



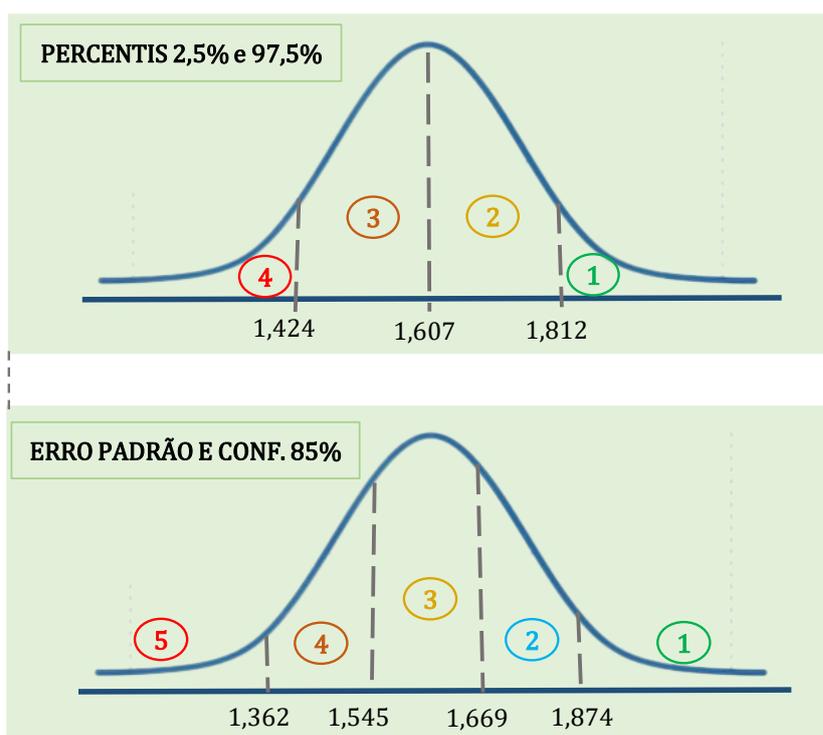
Fonte: Autora.

Uma vez que não há na literatura limites bem definidos para a classificação das misturas quanto ao FFM, alguns intervalos foram estabelecidos para separar os materiais e calcular os intervalos de confiança para outras propriedades. Dessa forma, para não limitar a classificação apenas à obtenção dos percentis da distribuição de FFM, foi utilizado o erro padrão dos dados e um nível de confiabilidade de 85%, pois a variabilidade das medidas não permitiria estabelecer com clareza os valores realmente acima ou abaixo da média sem essa

consideração, sendo necessário estabelecer uma classe central que contabilizasse essa variabilidade.

Assim, as quatro classes que seriam estabelecidas pelos percentis, transformaram-se em 5 classes (Figura 78). Para uma confiabilidade de 85%, e levando em consideração a média e o desvio padrão da amostra, o valor crítico encontrado para a distribuição foi de 1,95. Portanto, esse foi o multiplicador do erro padrão para subtrair e somar à média, formando a nova classe central (classe 3). As novas classes 2 e 4 foram mantidas com a mesma extensão das classes 2 e 3 estabelecidas anteriormente pelos percentis. Nessa distribuição, a classe 1 se refere aos melhores materiais (maior FFM), e a classe 5 aos piores materiais (menor FFM).

Figura 78 - Classes de FFM S-VECD para as misturas asfálticas



Fonte: Autora.

Considerando os indicadores  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ), buscou-se estabelecer os intervalos de confiança dentro das classes de FFM, para identificar se existiam valores mínimos ou máximos capazes de prever a classe de FFM que a mistura se encontraria. A análise gráfica do histograma de frequências e o teste de Shapiro-Wilk indicaram que os dados seguem a distribuição normal dentro dos intervalos propostos para FFM. Assim, a

distribuição *T-student* foi utilizada para prever os limites de cada classe, para um nível de confiança de 95%. A Tabela 53 mostra os resultados obtidos.

A tabela mostra que, embora a média das rigidezes em temperatura intermediária pareçam aumentar para as piores classes de FFM, os intervalos de confiança centrais possuem intersecção entre si, o que não permite identificar valores de  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  específicos para cada classe. No entanto, foi possível verificar que misturas que possuem FFM maior que 1,874 (classe 1), também possuem  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  abaixo de 6053,46 MPa. Por outro lado, misturas que possuem FFM menor que 1,362 (classe 5), têm  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  acima de 8544,47 MPa, com 95% de confiança.

Já para o parâmetro  $\Delta$ , as médias para cada grupo parecem indicar que nas piores classes de FFM, o valor desse indicador é menor. No entanto, novamente os intervalos apresentaram intersecção entre si. Nesse caso, somente foi possível identificar que misturas da classe 1 de FFM possuem  $\Delta$  acima de -1,18.

Tabela 53 - Intervalos de confiança para  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ) nas classes de FFM

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Margem de erro	Intervalo de confiança - IC
$ E^* _{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$	1	5114,01	2172,49	939,46	[ 4174,55 ; 6053,46 ]
	2	6918,72	1671,85	805,81	[ 6112,91 ; 7724,52 ]
	3	6445,94	2095,94	1010,21	[ 5435,73 ; 7456,14 ]
	4	6851,37	1800,56	684,90	[ 6166,47 ; 7536,27 ]
	5	9818,88	2799,69	1274,41	[ 8544,47 ; 11093,28 ]
$\Delta$ ( $G^R$ vs. $N_f$ )	1	-1,11	0,14	0,06	[ -1,18 ; -1,05 ]
	2	-1,34	0,19	0,09	[ -1,43 ; -1,25 ]
	3	-1,37	0,16	0,08	[ -1,45 ; -1,29 ]
	4	-1,45	0,25	0,09	[ -1,54 ; -1,35 ]
	5	-1,63	0,48	0,22	[ -1,85 ; -1,42 ]

Fonte: Autora.

Apenas a título de comparação, foram obtidas as matrizes de correlação de parâmetros das misturas com o fator de fadiga da mistura do ensaio de fadiga por compressão diametral, utilizado no dimensionamento pelo MeDiNa, daí estar referenciado como FFM MeDiNa nesta dissertação. Buscou-se observar se as variáveis consideradas relevantes para apontar a tendência de evolução do FFM S-VECD eram as mesmas que melhor se correlacionariam com o FFM MeDiNa. As matrizes de correlação estão apresentadas no Apêndice G, e foram

selecionadas as correlações a um nível de confiabilidade de 90%, uma vez que o número reduzido de dados não permitiu encontrar correlações significativas para 95% de confiança.

A Tabela 54 mostra os melhores indicadores, encontrados pelo coeficiente de correlação linear de Pearson. Nesse sentido, é possível observar que os valores de rigidez em temperatura intermediária do ensaio de módulo dinâmico voltam a aparecer como indicadores potenciais do comportamento à fadiga das misturas, além do parâmetro  $|E^*|\text{sen}\phi$  21°C:1Hz que combina o efeito da rigidez com o ângulo de fase. Destaca-se que a correlação negativa encontrada sinaliza que menores valores de rigidez, e comportamento viscoso mais acentuado, nessa faixa de temperatura e frequência (21 ou 19°C e 1 ou 10 Hz), são desejáveis no enfrentamento da fadiga.

Tabela 54 - Melhores correlações lineares entre FFM-MeDiNa e propriedades das misturas

PROPRIEDADES DAS MISTURAS			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1º	$ E^* _{21^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	-0,68	Moderada
2º	$ E^* \text{sen}\phi$ 21°C:1Hz	-0,64	Moderada
3º	a1 Arrhenius mix	0,63	Moderada
4º	a2 Arrhenius mix	-0,61	Moderada
5º	$ E^* _{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$	-0,58	Moderada
6º	$ E^* _{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$	-0,56	Moderada
7º	a3 Arrhenius mix	0,52	Moderada
8º	$\Delta$ (GR vs. Nf)	0,47	Moderada
9º	MR	-0,37	Fraca
10º	$\alpha$ S-VECD	0,32	Fraca
11º	a (C vs. S)	0,30	Fraca
12º	Índice de Tenacidade (IT)	0,28	Fraca
13º	Tenacidade	0,27	Fraca
14º	C11 (C vs. S)	-0,26	Fraca

Fonte: Autora.

Considerando que o próprio Manual do MeDiNa (FRANCO; MOTTA, 2023) indica a classificação das misturas asfálticas combinando um parâmetro de rigidez (MR) e um parâmetro de fadiga (FFM), os materiais foram classificados na Tabela 55 dos melhores até os piores, trazendo também os índices de rigidez apontados na tabela anterior. Como o número de dados é limitado, e a grande maioria das misturas é da Classe 4 de fadiga, não foi pertinente calcular os intervalos de confiança dos parâmetros do ensaio de módulo dinâmico para os grupos formados.

Ao observar a tabela acima é possível perceber que a classificação do MeDiNa quanto à fadiga não aponta tão claramente uma tendência relacionada ao tipo de ligante, como ocorre pelo ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão, utilizando seu respectivo FFM. Nesse caso, muitas misturas com ligantes convencionais são favorecidas, não sendo capaz de captar com eficiência os benefícios da modificação dos ligantes. Além disso, a classe 4 parece ser bastante abrangente para as misturas desse estudo, dificultando a identificação de um padrão para a fadiga utilizando a compressão diametral para medir rigidez e dano por fadiga.

Tabela 55 - Classificação das misturas pelas classes de fadiga do MeDiNa

Nomenclatura	$E^*$ [21°C:1Hz	$E^*$ [21°C:10Hz	$E^*$ sen $\phi$ [21°C:1Hz	$E^*$ [19°C:10Hz	MR	FFM_MeDiNa	Classe
CONV (Vestena, 2021)	7,90E+03	1,23E+04	2,77E+03	1,35E+04	6148,00	1,20	4
CONV - cap extraído (Vestena, 2021)				1,35E+04	6148,00	1,20	4
TLAF (Vestena, 2021)	1,09E+04	1,39E+04	2,06E+03	1,48E+04	9253,00	1,07	4
HIMA (Vestena, 2021)	7,69E+03	1,14E+04	2,47E+03	1,31E+04	5283,00	1,45	4
V509 M1 (Bordin e outros, 2020)	6,94E+03	1,09E+04	2,42E+03	1,20E+04	9029,00	1,28	4
V509 M2 (Bordin e outros, 2020)	5,36E+03	9,21E+03	2,35E+03	1,16E+04	8407,00	1,28	4
V509 M6 (Bordin e outros, 2020)	3,95E+03	6,75E+03	1,69E+03	7,88E+03	6386,00	1,45	4
CONV lab (Ilha, 2022)	6,92E+03	1,08E+04	2,62E+03	1,19E+04	5408,00	1,23	4
TLAF lab (Ilha, 2022)	1,16E+04	1,45E+04	2,05E+03	1,53E+04	8614,00	1,36	4
HIMA lab (Ilha, 2022)	7,62E+03	1,11E+04	2,33E+03	1,22E+04	4496,00	1,48	4
SBS lab (Ilha, 2022)	8,35E+03	1,24E+04	2,74E+03	1,37E+04	6039,00	1,27	4
CACAMPO (Rossato e outros, 2015)				8,31E+03	4006,00	1,32	4
UFMS 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)				1,17E+04	5921,00	1,41	4
DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	9,95E+03	1,50E+04	3,30E+03	1,63E+04	8977,67	1,19	4
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	9,81E+03	1,46E+04	3,26E+03	1,56E+04	10491,33	1,11	4
DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	4,70E+03	7,74E+03	1,83E+03	8,36E+03	2014,67	1,65	4
SBS (Vestena, 2021)	1,02E+04	1,40E+04	2,58E+03	1,51E+04	6747,00	1,07	3
DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	6,44E+03	1,11E+04	2,85E+03	1,20E+04	6163,33	1,10	3
DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,05E+04	1,50E+04	3,03E+03	1,61E+04	8290,00	0,79	2
UFMS 3 - 50/70 12,5 mm(a) (Santos e outros, 2015)				9,24E+03	1898,00	1,21	1
UFMS 3 - 50/70 12,5 mm(b) (Santos e outros, 2015)				1,07E+04	1898,00	1,09	1

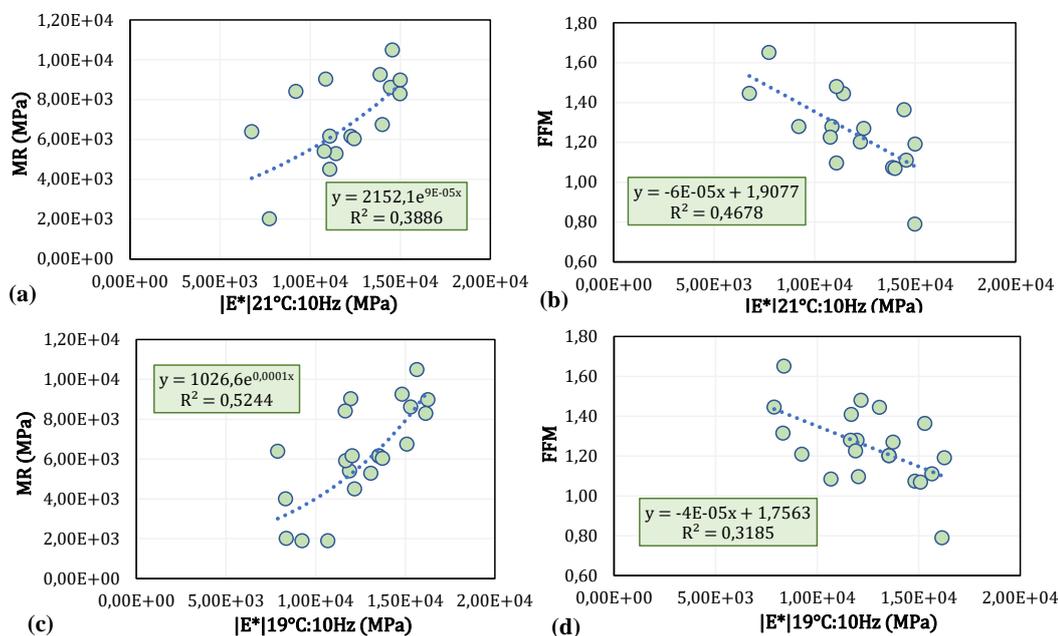
Fonte: Autora.

A partir dos índices da tabela, foram testadas as correlações com os indicadores do MeDiNa, com o objetivo de entender se o ensaio de módulo complexo poderia fornecer um indicativo dos parâmetros requeridos pelo MeDiNa. As melhores tendências estão apresentadas na Figura 79.

As melhores correlações encontradas foram para o módulo dinâmico na frequência de 10 Hz, o que parece razoável uma vez que a frequência de carregamento do ensaio de MR e de fadiga por compressão diametral é de 10 Hz (no pulso de carga de 0,1 s). No entanto, apesar desses ensaios serem realizados a 25°C, os dados a 19°C mostraram uma tendência mais clara, com  $R^2$  de 0,5244 em uma correlação exponencial.

No entanto, quando observado o FFM, o indicador na temperatura de 21°C obteve a melhor correlação linear ( $R^2 = 0,4678$ ), e indica realmente que maiores rigidezes prejudicam o comportamento à fadiga. Essas correlações foram regulares, e não é possível prever valores de MR e FFM MeDiNa somente a partir do módulo dinâmico, para as misturas testadas.

Figura 79 - Correlações entre MR e FFM MeDiNa com o módulo dinâmico



Fonte: Autora.

### 5.1.5 Conclusões parciais da seção

Como forma de organizar os resultados obtidos nesta primeira seção em um mesmo espaço, foram elencados os principais tópicos observados. Vale ressaltar que as observações acerca dos intervalos de confiança encontrados são realizadas com 95% de confiança.

#### Deformação permanente em ligantes asfálticos:

- Dentre os ensaios das especificações tradicionais de ligantes, os resultados de viscosidade Brookfield a  $135^\circ\text{C}$  e de ponto de amolecimento são bons indicativos do comportamento à deformação permanente em ligantes, sendo desejáveis maiores valores para essas propriedades;
- Pelas análises de reologia sob cisalhamento dinâmico, os índices de rigidez  $|G^*|/\text{sen}\phi$  (a  $58$  e  $64^\circ\text{C}$ ) e o PGH também forneceram correlações de Pearson moderadas com o FN, seguindo a tendência esperada, ou seja, maiores valores indicando um aumento no FN;
- Nessa análise exploratória, os parâmetros Jnr e R% ( $0,1$  kPa e  $3,2$  kPa) do MSCR parecem ser melhores indicadores da deformação permanente em ligantes;

- Maiores valores de “h” da modelagem 2s2p1d parecem indicar uma tendência de aumento no FN, especialmente porque reduzem o pico do ângulo de fase em temperaturas intermediárias a altas;
- Quando classificados segundo o  $J_{nr_{3,2}}$  a 64°C, ligantes modificados por polímero e TLA destacam-se frente aos convencionais, e os ligantes de menor penetração (30/45 e 10/20) parecem ser melhores à deformação permanente que o CAP 50/70;
- Maiores rigidezes ( $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) e um comportamento mais elástico ( $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) em altas temperaturas reduzem a parcela irreversível da deformação no MSCR, representada pelo  $J_{nr_{3,2}}$ ;
- Maiores valores de PGH contínuo promovem quedas exponenciais no  $J_{nr_{3,2}}$  a 64°C;
- Ligantes com  $J_{nr_{3,2}}$  superior a 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  a 64°C possuem ângulos de fase em alta temperatura ( $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) superiores a 86°;
- Ligantes com  $J_{nr_{3,2}}$  a 64°C maior que 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem um  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  abaixo de 1542 Pa;
- Ligantes com  $J_{nr_{3,2}}$  a 64°C entre 1,0 e 2,0  $\text{kPa}^{-1}$  possuem ponto de amolecimento mínimo de 55,8°C; entre 2,0 e 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem PA mínimo de 49,6°C e os que ficam acima de 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem PA abaixo de 48,7°C;
- Ligantes com  $J_{nr_{3,2}}$  a 64°C > 4,5  $\text{kPa}^{-1}$  possuem viscosidade rotacional a 135°C abaixo de 353,0 cP.

### **Fadiga em ligantes asfálticos**

- Os ensaios de caracterização convencional de ligantes, presentes nas especificações brasileiras, parecem não ser eficientes para avaliar fadiga nesses materiais;
- Os resultados do ensaio de LAS (ciclos até a falha e fator de fadiga do ligante) apresentaram indícios de serem bons indicadores da fadiga em ligantes;
- Uma vez que as correlações lineares entre os resultados do LAS na condição RTFOT e o fator de fadiga da mistura foram satisfatórias, essa condição de envelhecimento foi considerada suficiente para o estudo da fadiga em ligantes;

- O parâmetro  $\delta$  da modelagem 2s2p1d de ligantes, após RTFOT, é um indicador potencial da fadiga em ligantes, sendo que maiores valores promovem maior FFL. No geral, ligantes modificados por polímero apresentam maiores valores de  $\delta$ ;
- O critério de redução de 35% de  $|G^*| \sin \phi$  da norma AASHTO T 391 (2020) é mais rigoroso na determinação do ciclo de falha por fadiga no LAS quando comparado ao critério da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE);
- De forma geral, ligantes modificados por polímero e por borracha apresentam melhor comportamento à fadiga (pelo  $FFL_{19^\circ C}$ ) embora haja mais exceções do que na análise da deformação permanente;
- A rigidez e o ângulo de fase do ligante medidos na mesma temperatura e frequência do  $FFL$  ( $19^\circ C$  e 10 Hz) não foram bons indicadores de fadiga, mesmo quando os tipos de ligantes foram observados separadamente;
- Ligantes com  $FFL_{19^\circ C}$ (máxPSE) acima de 1,57 apresentaram valores de  $\delta$  maiores que 4,59;
- Ao contrário da deformação permanente, não foi possível observar tendências claras da fadiga em ligantes a partir de dados de viscoelasticidade linear.

### **Deformação permanente em misturas asfálticas**

- O índice de forma da fração #3/4 do agregado parece ser um indicador promissor da deformação permanente em misturas, sendo que maiores valores indicam misturas com FN mais alto;
- As características dos agregados aparentam não ser significativamente relevantes para a danificação das misturas quanto à deformação permanente;
- As correlações lineares estudadas indicam que misturas que mantêm maiores valores de rigidez e menores ângulos de fase mesmo em temperaturas elevadas, tendem a ter melhor comportamento à deformação permanente, considerando o ensaio uniaxial de cargas repetidas;
- O parâmetro  $h$  da modelagem 2s2p1d dos dados de módulo dinâmico das misturas parece ser um potencial indicador de deformação permanente, sendo que maiores valores refletiram em misturas com FN mais baixo;

- O índice E00 da modelagem 2s2p1d também é um indicador que parece dar indícios sobre o FN das misturas, e maiores valores indicam misturas com maior FN;
- Maiores valores de “g” da modelagem sigmoidal dos dados de módulo dinâmico refletiram em piores misturas à deformação permanente, e foi considerado um potencial parâmetro para inferir sobre esse defeito;
- Maiores teores de RAP indicaram misturas com maior FN;
- Há indícios de que misturas que suportam tráfegos mais pesados, sinalizados pelas classes de FN de Faccin (2018), são majoritariamente mais rígidas e/ou modificadas por polímero e TLA;
- Misturas de campo, com ligante oxidado, ou com ligantes virgens de maior PGH apresentaram maiores valores de FN, evidenciando a relevância do ligante asfáltico para esse defeito;
- A rigidez das misturas em alta temperatura ( $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) mostrou-se um bom indicador de deformação permanente. Materiais mais rígidos nessa faixa tendem a ter maiores valores de FN, destacando-se as misturas com AMP (tanto SBS quanto HiMa) e com CAP TLA;
- Foi possível estabelecer todos os intervalos de confiança para o parâmetro  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e dois intervalos para  $|E^*|_{\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}}$  e E00, considerando os limites de Faccin (2018). Como exemplo, misturas com FN superior a 2000 ciclos possuem  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  mínimo de 514,79 MPa;  $|E^*|_{\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}}$  superior a 1059,11 MPa; e E00 maior que 105,95 MPa;
- Misturas com FN acima de 2000 ciclos apresentaram um valor de “h” do modelo 2s2p1d inferior a 0,52 e “g” do modelo sigmoidal inferior a 0,43;
- Misturas que suportam mais de 2000 ciclos (FN) possuem índice de forma da fração #3/4 mínimo de 1,43, e misturas que suportam menos de 300 ciclos ficam com esse valor abaixo de 0,92.

### **Fadiga em misturas asfálticas**

- As características dos agregados individualmente parecem não ser bons indicadores da fadiga em misturas;

- Os valores de FFM S-VECD tendem a cair com o crescimento de “d” da modelagem sigmoideal. De forma geral, ligantes modificados por polímero (SBS e HiMA) e por borracha tendem a ter menores valores de “d” e maiores fatores de fadiga da mistura;
- O FFM cresce com o aumento do parâmetro  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$ , mas não houve tendências claras quando as misturas foram separadas por tipo de ligante;
- Maiores rigidezes em temperatura intermediária (21°C), parecem piorar o comportamento à fadiga. Destacam-se as misturas com CAP borracha, por possuírem em geral menores rigidezes nessa faixa (21°C:1Hz) e maiores valores de FFM;
- A fadiga em misturas asfálticas é um defeito mais complexo que a deformação permanente, e descrevê-lo adequadamente não foi possível utilizando variáveis isoladas, sem a consideração da estrutura de um pavimento;
- Para as classes de FFM S-VECD propostas, identificou-se que misturas que possuem FFM maior que 1,874 também possuem  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  abaixo de 6053,46 MPa. Por outro lado, misturas que possuem FFM menor que 1,362 têm  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  acima de 8544,47 MPa;
- Misturas com FFM maior que 1,874 possuem  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ) acima de -1,18;
- A classificação do MeDiNa quanto à fadiga não aponta tão claramente uma tendência de desempenho relacionada ao tipo de ligante, como ocorre pelo ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão, utilizando seu respectivo FFM;
- Não foi possível prever valores de MR e FFM MeDiNa somente a partir do módulo dinâmico, para as misturas testadas, mas maiores valores de  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$  e  $|E^*|_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$  parecem prejudicar o comportamento à fadiga.

## 5.2 RELAÇÕES ENTRE ESCALAS

Esta seção traz as relações entre escalas de análise. A investigação está dividida em deformação permanente, na qual foram correlacionados parâmetros de ligantes e misturas, e fadiga, na qual o ligante foi correlacionado com a mistura, e a mistura com os resultados de simulações de pavimentos.

## 5.2.1 Deformação permanente

### 5.2.1.1 Do ligante à mistura

Buscando entender a influência dos ligantes asfálticos na deformação permanente das misturas, foram realizadas correlações entre os melhores indicadores de deformação permanente em ligantes (identificados na seção anterior) com o parâmetro *Flow Number*. Estão apresentadas aqui as melhores correlações encontradas, e, assim como analisado anteriormente, foram desconsiderados os ligantes extraídos pelo rotaevaporador, uma vez que prejudicaram as tendências.

Os ligantes extraídos de misturas após usinagem passam pelo processo que mais provoca envelhecimento oxidativo, ou seja, a usinagem, o transporte, a aplicação e a compactação da mistura, o que pode ocasionar distorções nas análises. Além disso, ligantes extraídos e com agentes rejuvenescedores (pesquisa de Almeida Jr., 2022) podem também gerar resultados muito discrepantes dos demais. Cabe ressaltar que foram as correlações não incluem misturas com RAP, apesar de não ter se obtido melhora significativa nos coeficientes de determinação. Ligantes com borracha, por estarem em quantidade reduzida em relação ao total de dados, não prejudicaram as correlações gerais.

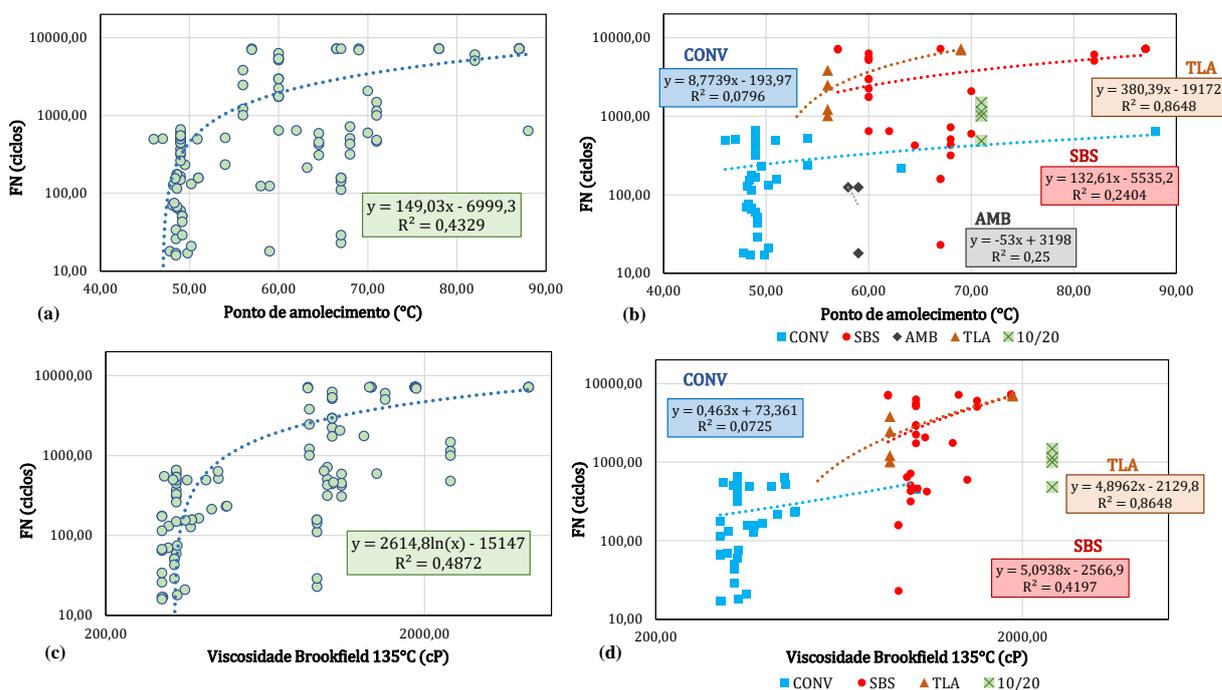
A Figura 80 mostra a correlação direta entre os ensaios de caracterização convencionais de ligantes, identificados como razoáveis marcadores da deformação permanente, com o FN das misturas. A Figura 80a mostra que é possível observar um crescimento linear do FN com o aumento do ponto de amolecimento dos ligantes, embora essa relação seja apenas regular (com um  $R^2$  de 0,4329).

Essa relação é razoável, uma vez que, embora o ponto de amolecimento seja um indicador com forte base empírica, ele está ligado ao início do fluxo do ligante asfáltico (com perda de capacidade de suporte) sob altas temperaturas, reproduzindo de maneira simplista o fenômeno da deformação permanente. No entanto, a correlação encontrada não é capaz de prever a evolução do FN com exatidão, sendo necessário que o ensaio seja interpretado com cautela. Uma vez que as temperaturas do pavimento podem atingir valores bastante superiores ao valor encontrado para o ponto de amolecimento, e devido à simplicidade do método em obter a propriedade do material, é importante que os ligantes asfálticos também sejam

submetidos a protocolos de avaliação mais robustos, como no caso da reologia sob cisalhamento dinâmico.

Além disso, as correlações ficaram prejudicadas quando os tipos de ligantes foram visualizados de maneira individual, com exceção do CAP TLA, o qual possui poucas amostras para permitir uma conclusão definitiva. De forma geral, ligantes duros (10/20) e modificados por SBS ou TLA, atingem maiores valores de ponto de amolecimento e de FN. No entanto, ligantes modificados por borracha, apesar de possuírem um ponto de amolecimento mais elevado que os ligantes convencionais, permanecem dentro da mesma faixa de FN de ligantes sem nenhuma modificação, confirmando que outras propriedades precisam ser avaliadas na previsão da deformação permanente em misturas.

Figura 80 - Correlações com o FN: ponto de amolecimento (a) geral e (b) por tipo de CAP; viscosidade Brookfield 135°C (c) geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Vale destacar que algumas misturas incluídas nessa correlação possuem os mesmos ligantes, variando características como tipo de agregado, faixa granulométrica, tipo de cal, etc. Os pontos alinhados em uma mesma linha vertical (mesmo ponto de amolecimento) mostram

que o mesmo ligante pode fazer parte de misturas bastante distintas no ensaio uniaxial de cargas repetidas, sinalizando que, apesar dessa propriedade indicar uma tendência de evolução do FN, outras características precisam ser incluídas na análise. Como exemplo, pode-se verificar que ligantes modificados por polímero SBS com PA de 60°C, foram incorporados a misturas com FN variando de 645 a 6300 ciclos. Além disso, foi testada a correlação desconsiderando o CAP 50/70 PA 85, mas permaneceu insatisfatória ( $R^2 = 6.10^{-5}$ ).

No que se refere à viscosidade Brookfield a 135°C (Figura 80c e Figura 80d), observou-se uma tendência de crescimento do FN na forma logarítmica, para ligantes mais viscosos nessa temperatura. A correlação geral encontrada indica que esse é um ensaio mais adequado que o ponto de amolecimento para indicar a tendência de evolução da deformação permanente em misturas (quando simuladas em laboratório), mas ainda não é uma correlação satisfatória ( $R^2 = 0,4872$ ).

Quando as misturas foram separadas por tipo de CAP, as melhores correlações observadas foram em tendências lineares, embora piores que a correlação contendo todos os pontos. Destaca-se a grande disparidade nos valores de viscosidade de ligantes convencionais, uma vez que ficam bastante abaixo dos demais ligantes. No entanto, existem algumas misturas com esses ligantes que geram bons valores de FN, sendo que o esqueleto mineral pode justificar esses resultados.

As correlações para ligantes com SBS e TLA foram muito superiores quando comparadas aos ligantes convencionais. No entanto, destaca-se que o mesmo fenômeno da Figura 80a e Figura 80b): valores idênticos de viscosidade entre ligantes, ou misturas formadas pelo mesmo ligante, geram um espectro amplo de FN. Por exemplo, ligantes modificados por TLA com viscosidade a 135°C de 870 cP podem atingir FN de 1010 a 3821 ciclos.

A Figura 81 traz as melhores correlações com o FN encontradas para o PGH contínuo após RTFOT,  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ . A Figura 81a indica que o PGH contínuo, quando observado para todos os tipos de ligantes conjuntamente, não é capaz de apontar uma tendência clara para a evolução do FN. Embora as correlações melhorem ao se separar os tipos de CAP, elas ainda permanecem em um patamar ruim. No entanto, é possível observar uma inclinação positiva dos pontos, sinalizando que maiores valores de PGH contínuo tendem a formar misturas melhores à deformação permanente.

Ressalta-se pela Figura 81b que, mesmo que alguns ligantes com polímero estejam em uma faixa de PGH contínuo próxima dos CAPs convencionais, eles compõem misturas com maiores FN, mas outras características também podem gerar esse resultado, além de apenas o tipo de ligante utilizado. Observando apenas a rigidez dos ligantes em alta temperatura (Figura 81c e Figura 81d), também não se obteve sucesso ao buscar a tendência de evolução do FN a partir de um parâmetro na escala ligante. As tendências melhoram quando separados por tipo de CAP, mas ainda são insatisfatórias, com exceção do CAP TLA. No entanto, tratam-se de apenas 5 pontos, sendo 4 deles referentes a misturas com o mesmo ligante. Vale destacar que a tendência para os CAPs convencionais diferiu dos demais, sendo a tendência exponencial a melhor correlação encontrada ( $R^2 = 0,1707$ ).

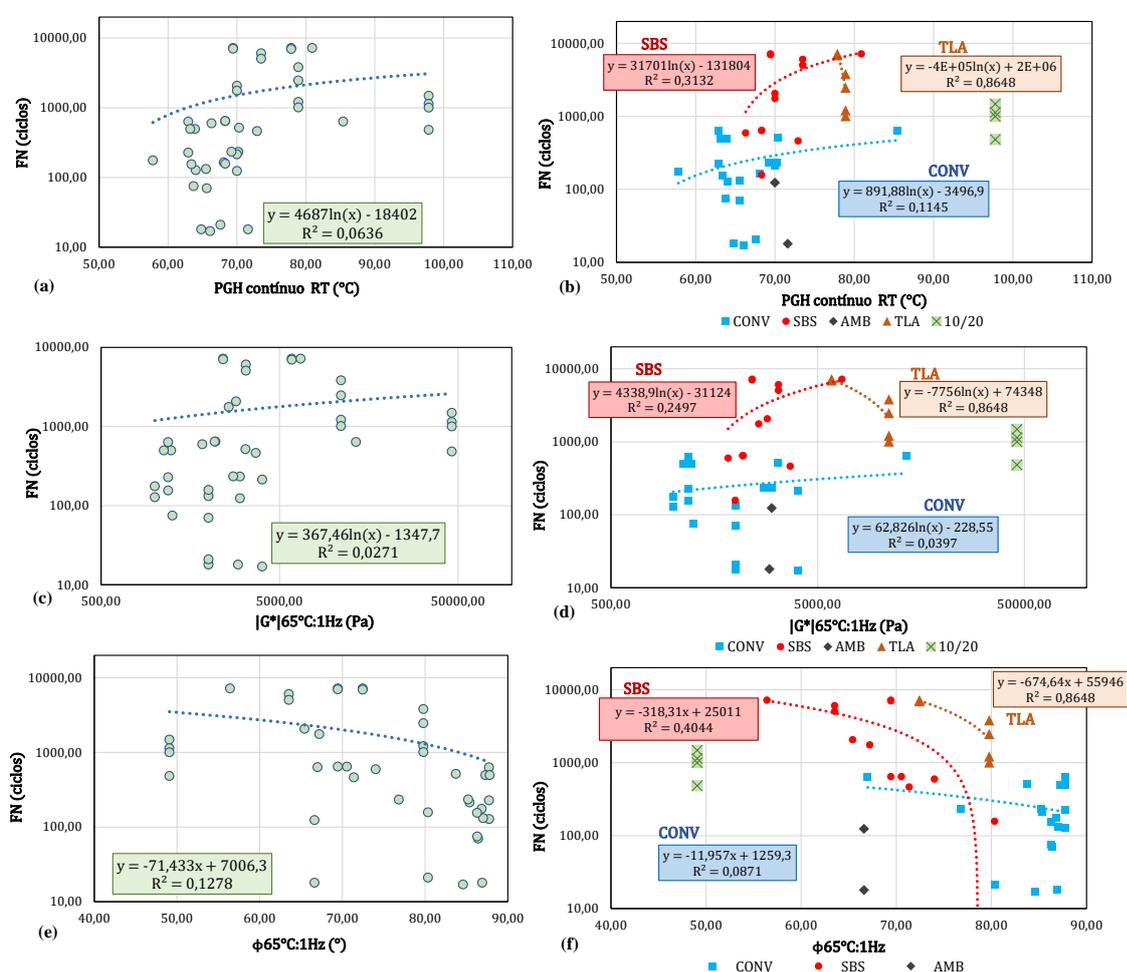
Já a Figura 81e e Figura 81f mostram que o ângulo de fase em alta temperatura mostrou-se um parâmetro mais adequado que a rigidez para inferir sobre a deformação permanente, mas os coeficientes de determinação também foram insatisfatórios. No entanto, é possível observar que esse indicador pode ser interessante para observar as tendências em asfaltos com polímero, mostrando mais claramente que um maior comportamento viscoso em altas temperaturas, para esse tipo de ligante, prejudica o desempenho à deformação permanente da mistura final. As diferenças com os CAPs convencionais também se evidenciam, uma vez que esses ligantes possuem valores de  $\phi$  bastante superiores aos dos ligantes SBS e HiMA, e permanecem na metade inferior do eixo vertical (onde estão os menores valores de FN).

Apesar de o valor da compliância não recuperável (Jnr do MSCR) medida a 64°C ter apresentado correlações mais adequadas com outras características dos ligantes, a Figura 82 indica que a medida realizada efetivamente no PGH apresenta melhores correlações com o FN das misturas. Essa abordagem segue as recomendações da especificação Superpave, a qual classifica os ligantes de acordo com propriedades medidas no PGH, uma vez que essa abordagem entende que serão selecionados ligantes adequados ao PGH da rodovia onde o material será aplicado, e que as propriedades precisam ser avaliadas nessa condição.

Para o Jnr<sub>3,2</sub> 64°C, as correlações ficaram prejudicadas ao se observarem os ligantes separadamente. Vale destacar que, para os CAPs com polímero, a melhor correlação que pode ser obtida é sob forma de potência ( $R^2 = 0,1747$ ), ou seja, a forma em que o FN evolui com a mudança do Jnr<sub>3,2</sub> 64°C é diferente dos demais tipos de ligantes. Ao contrário, quando o índice é avaliado no PGH as correlações logarítmicas são as mais adequadas, com exceção do

CAP convencional (em uma tendência potencial o coeficiente de determinação passa para 0,1163). Essas diferenças sugerem que diferentes tipos de ligantes precisam de uma observação individualizada, pois compõem misturas com diferentes tendências de variação do FN.

Figura 81 - Correlações com o FN: PGH contínuo RT (a) geral e (b) por tipo de CAP;  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  (c) geral e (d) por tipo de CAP;  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  (e) geral e (f) por tipo de CAP

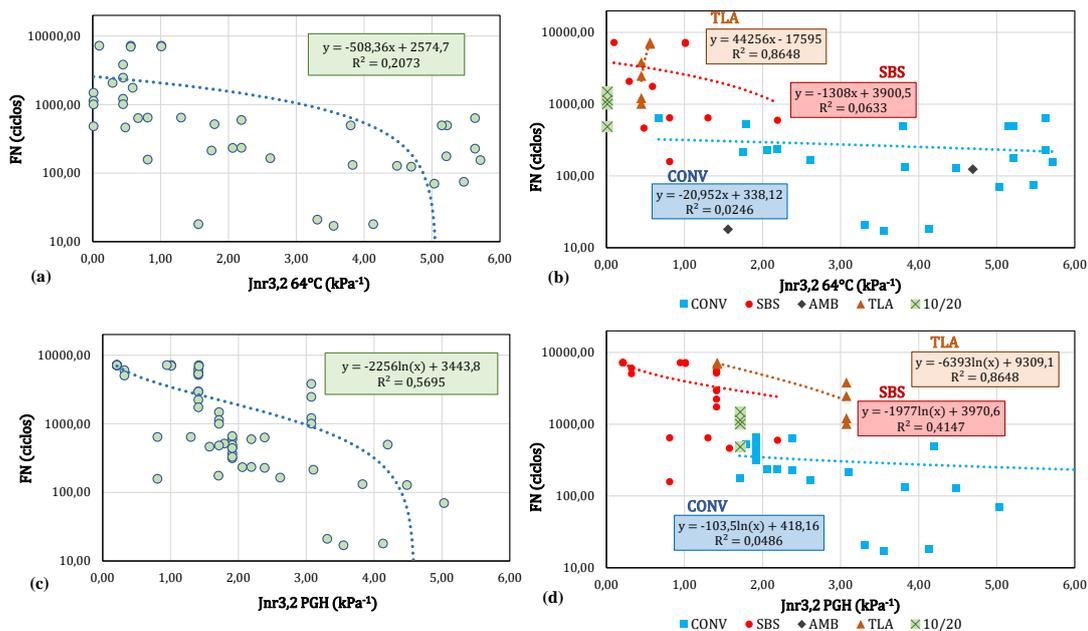


Fonte: Autora.

De forma geral, é possível verificar que ligantes sem modificação possuem maiores valores de Jnr, ou seja, recuperam menos a deformação após ciclos de carga e descarga, e fazem parte de misturas com menor FN. Destaca-se, ainda, que a medida em um domínio de danificação dos ligantes é realmente mais adequada para inferir sobre o desempenho das

misturas, mas que ainda não é uma avaliação suficiente para sozinha prever com precisão o que ocorrerá nessa escala.

Figura 82 - Correlações com o FN: Jnr<sub>3,2</sub> 64°C (a) geral e (b) por tipo de CAP; Jnr<sub>3,2</sub> PGH (c) geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Buscando entender se é possível estabelecer faixas de valores prováveis para cada variável, nos grupos de FN de Faccin (2018), foram estimados os intervalos de confiança para um nível de significância de 5%. Os intervalos foram calculados para os índices mais promissores encontrados (Jnr<sub>3,2</sub> 64°C e Jnr<sub>3,2</sub> PGH), e também para ensaios da caracterização convencional (ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield a 135°C), uma vez que a indústria da pavimentação ainda utiliza a especificação brasileira baseada em ensaios empíricos. Não foram utilizados ligantes extraídos nessa análise.

Assim, as misturas asfálticas foram novamente divididas em quatro grupos:

- Grupo 1: *Flow Number* superior a 2000 ciclos;
- Grupo 2: *Flow Number* entre 600 e 2000 ciclos;
- Grupo 3: *Flow Number* entre 300 e 600 ciclos;
- Grupo 4: *Flow Number* abaixo de 300 ciclos.

Dentro desses grupos, foi observado que as variáveis elencadas não seguiam uma distribuição normal, e, assim, foi utilizada novamente a técnica de *Bootstrap* para o cálculo

dos intervalos de confiança, com 4000 reamostragens com reposição. Cabe destacar que para a viscosidade a 135°C não estão inclusos os ligantes modificados por borracha. Os resultados estão elencados na Tabela 56.

Tabela 56 - Intervalos de confiança para índices de ligantes nos grupos de FN

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança IC
Ponto de amolecimento (°C)	1	71,44	11,84	-4,03	4,08	[ 67.40- 75.52 ]
	2	64,33	10,19	-5,25	5,75	[ 59.08 - 70.08 ]
	3	56,75	9,45	-3,60	3,65	[ 53.14 - 60.39 ]
	4	53,01	6,96	-2,01	2,30	[ 51.00 - 55.31 ]
Viscosidade Brookfield 135°C (cP)	1	1662,19	938,61	-295,04	362,15	[ 1367.16 - 2024.34 ]
	2	1275,18	774,49	-410,02	454,73	[ 865.16 - 1729.91 ]
	3	737,85	520,51	-199,54	222,30	[ 558.30 - 980.15 ]
	4	436,81	223,11	-64,50	74,76	[ 372.30 - 511.56 ]
Jnr 3,2 64°C (kPa <sup>-1</sup> )	1	0,55	0,32	-0,20	0,20	[ 0.36 - 0.76 ]
	2	0,99	1,68	-0,70	1,14	[ 0.29 - 2.13 ]
	3	2,66	2,11	-1,46	1,42	[ 1.20 - 4.08 ]
	4	3,65	1,58	-0,73	0,71	[ 2.92 - 4.36 ]
Jnr 3,2 PGH (kPa <sup>-1</sup> )	1	1,01	0,84	-0,31	0,34	[ 0.70 - 1.34 ]
	2	2,69	2,67	-1,08	1,70	[ 1.60 - 4.39 ]
	3	2,07	0,69	-0,25	0,42	[ 1.82 - 2.49 ]
	4	3,53	2,24	-0,97	1,26	[ 2.56 - 4.79 ]

Fonte: Autora.

No que se refere ao ensaio de ponto de amolecimento, a média de cada grupo indica que há redução desse valor para grupos com comportamento inferior quanto à deformação permanente. Os intervalos de confiança apresentaram intersecção nos grupos 1 e 2, não permitindo uma conclusão precisa. No entanto, é possível afirmar, com 95% de confiança, que misturas do grupo 3 possuem ponto de amolecimento abaixo de aproximadamente 60°C. Nesse caso, destaca-se que o limite inferior do grupo está contido no intervalo do grupo 4, e não foi possível estabelecer classificações claras considerando as faixas de FN.

Para a viscosidade Brookfield a 135°C também foram observadas intersecções entre os intervalos, os quais dependem da quantidade de amostras e da variabilidade dos dados obtidos. Para essa propriedade, o grupo 4 foi o único que permitiu concluir que misturas com FN abaixo de 300 ciclos possuem viscosidade rotacional a 135°C abaixo de 511,56 cP. De forma geral, as médias indicam queda na viscosidade para os grupos inferiores.

Para o Jnr<sub>3,2</sub> a 64°C do ensaio de MSCR não foi possível estabelecer intervalos de confiança bem definidos para o FN, embora as médias dos grupos indiquem que esse valor aumenta significativamente nas piores misturas. Isso pode ter ocorrido pois existem menos dados em cada grupo para o Jnr a 64°C, aumentando o erro padrão da estimativa e o intervalo de confiança por consequência. Os estudos do GEPPASV contendo a caracterização da

deformação permanente em ligantes na temperatura de 64°C são mais recentes, e a maioria conta com um grande número de ligantes extraídos, como no caso de Almeida Jr. (2022) e Nascimento (2023).

Considerando o mesmo parâmetro, mas medido no PGH dos ligantes, foi possível identificar duas classes referentes aos grupos extremos: as melhores e as piores misturas à deformação permanente pelo FN. Com 95% de confiança, é possível afirmar que misturas que suportam tráfegos extremamente pesados segundo a classificação de Faccin (2018), ou seja, com mais de 2000 ciclos de FN, possuem  $J_{nr_{3,2}}$  no PGH abaixo de 1,34 kPa<sup>-1</sup>. Por outro lado, misturas abaixo de 300 ciclos possuem  $J_{nr_{3,2}}$  no PGH superior a 1,56 kPa<sup>-1</sup>. Mesmo com a variabilidade dos dados, foi possível identificar esses dois intervalos de confiança pois há uma maior quantidade de amostras para o parâmetro.

## 5.2.2 Fadiga

### 5.2.2.1 Do ligante à mistura

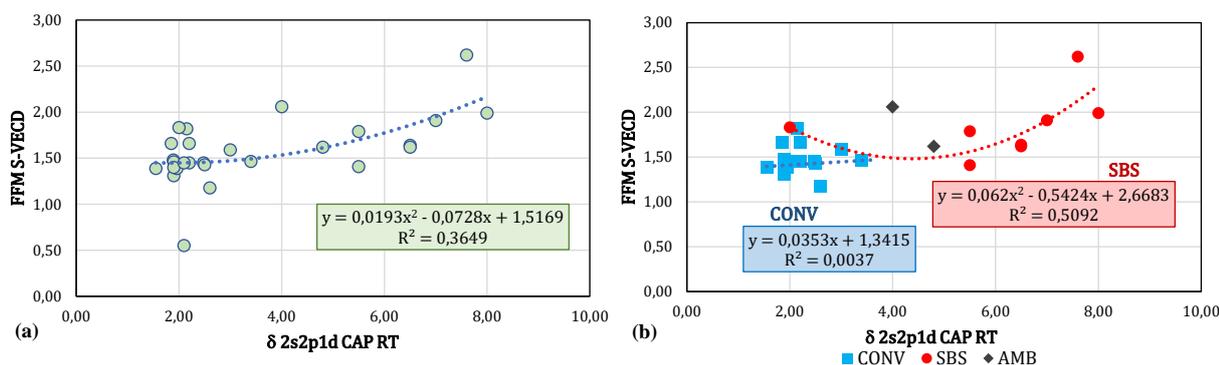
Da mesma forma como foi realizado para a deformação permanente, buscou-se entender os melhores indicadores dos ligantes asfálticos que seriam capazes de prever a tendência da evolução da fadiga em misturas. Em primeiro lugar, foram investigadas as relações entre os melhores parâmetros identificados na seção anterior, com o FFM das curvas de Wöhler simuladas pela equação de Nascimento (2016) (chamado nessa dissertação de FFM S-VECD).

Além das figuras que serão apresentadas, foram testadas as correlações com a rigidez e o ângulo de fase a 19°C e 10 Hz, mas as tendências observadas não foram conclusivas, tanto para as correlações gerais quanto para aquelas separadas pelos tipos de ligantes (coeficientes de determinação abaixo de 0,2). A Figura 83 ilustra a relação obtida entre o parâmetro  $\delta$  da modelagem 2s2p1d dos ligantes, na condição após RTFOT, e o FFM.

A figura indica que a correlação considerando todos os pontos foi baixa, mesmo com o melhor ajuste (polinômio de segundo grau). No entanto, é possível observar que maiores valores de  $\delta$  parecem identificar misturas com maior FFM. Essa tendência enfraquece consideravelmente observando apenas os ligantes convencionais, mas passa a ser uma correlação regular para ligantes com polímero. Foi possível identificar claramente, nesse caso,

que ligantes modificados por SBS (tanto SBS convencionais quanto altamente modificados – HiMA), possuem no geral valores superiores de  $\delta$ , e que ligantes AMB possuem esse parâmetro superior aos asfaltos sem modificação. No entanto, o salto em FFM não foi considerável entre os tipos de ligantes, quando observado esse indicador.

Figura 83 - Correlação entre  $\delta$  2s2p1d CAP RT e FFM S-VECD: (a) geral e (b) por tipo de ligante



Fonte: Autora.

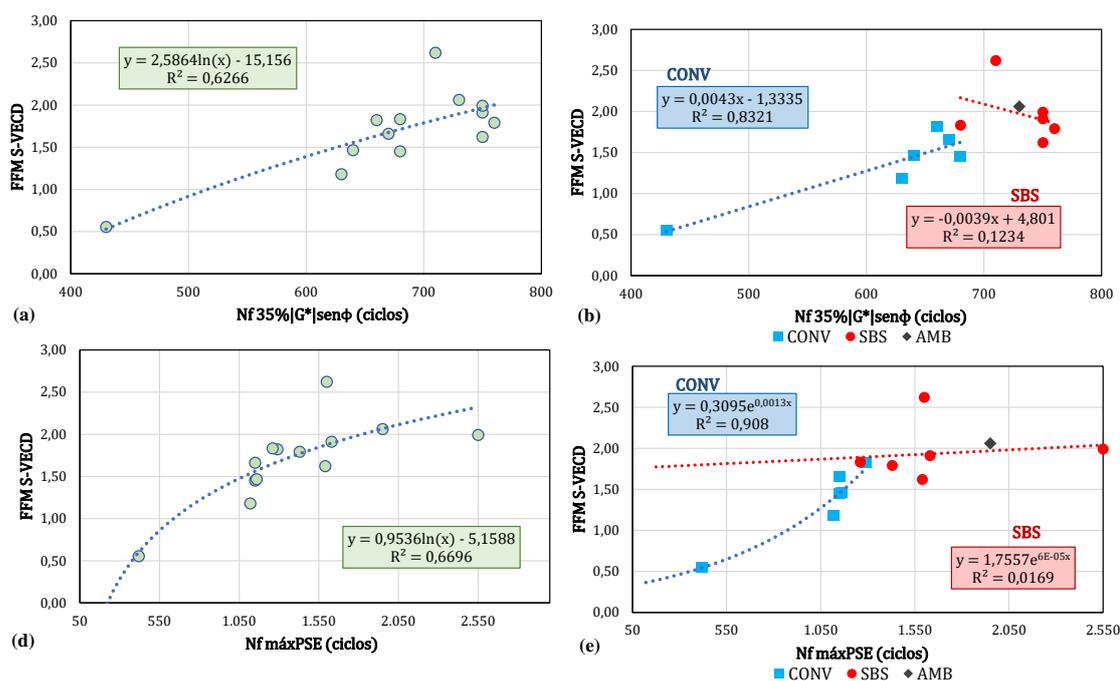
Por outro lado, a Figura 84 mostra correlações melhores quando considerados os ciclos de falha do ensaio de LAS, tanto para o critério de perda de 35% da integridade ( $|G^*|\text{sen}\phi$ ) e da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE). Nas linhas de tendência considerando todos os pontos, as melhores tendências encontradas foram sob forma logarítmica, com o critério máxPSE se sobressaindo nesse aspecto.

No entanto, ao separar os tipos de ligantes, foi possível identificar boas correlações para ligantes sem modificação, mas péssimas para ligantes com polímero, os quais inclusive apontaram uma tendência contrária ao esperado para o critério de 35% $|G^*|\text{sen}\phi$ . Em geral, maiores valores de ciclos até a falha no ensaio de LAS indicam misturas que terão maior FFM, confirmando a influência relevante da danificação em ligantes no desempenho à fadiga das misturas.

No caso da Figura 85, foram confrontados os dados de FFL pelos dois critérios com o FFM das misturas. Nesse caso, as correlações gerais encontradas foram regulares, e maiores fatores de fadiga do ligante indicam misturas com melhor desempenho à fadiga. Considerando a separação por tipo de ligante, novamente as tendências foram mais claras para ligantes sem modificação, embora os coeficientes de determinação para asfaltos com polímero tenham

melhorado com relação à figura anterior. Assim, considera-se que é mais adequado observar os ligantes sob a ótica do FFL do que apenas obtendo o ciclo de falha do ensaio.

Figura 84 - Correlação com FFM S-VECD: Nf 35%|G\*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e Nf máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante

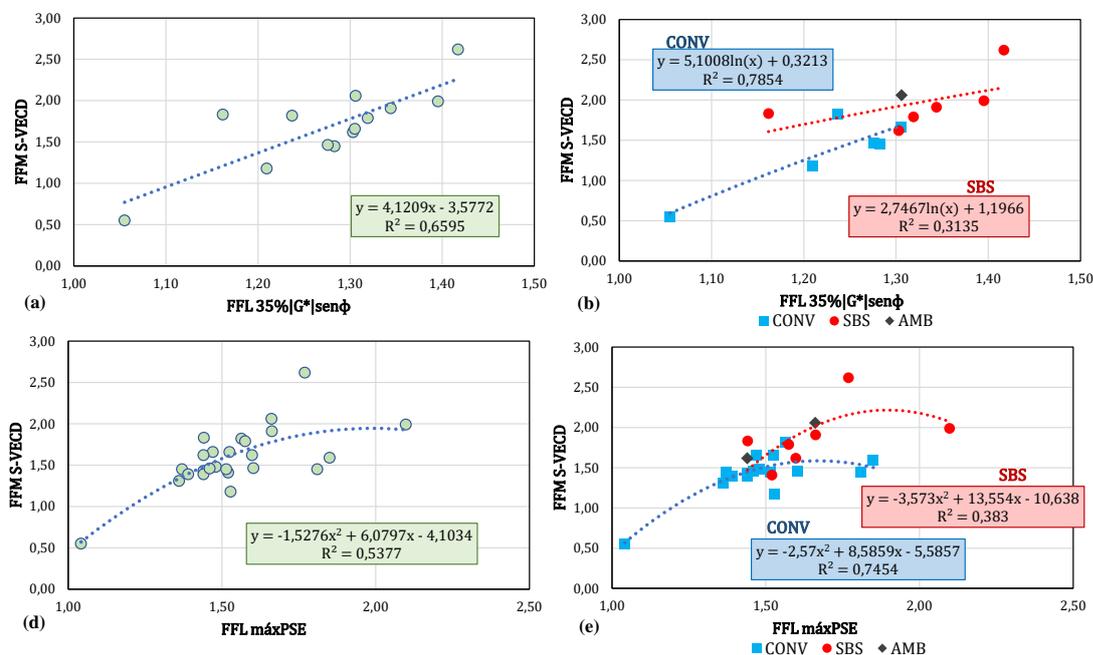


Fonte: Autora.

Vale destacar que a correlação exponencial para CAPs com polímero pelo critério de 35%|G\*|senφ teve um  $R^2$  de 0,3758. Considerando as tendências obtidas, o critério presente na norma AASHTO T 400 (2022) (35%|G\*|senφ) foi mais adequado para prever o FFM, mas é importante notar que há uma maior quantidade de dados pelo critério máxPSE, que acaba por sofrer o impacto da variabilidade dos dados.

Considerando os intervalos propostos para o FFM S-VECD na seção anterior, buscou-se identificar se existiam intervalos de confiança claros para o  $FFL_{19^\circ C}$  máxPSE para cada classe de FFM das misturas. Esse estudo não foi realizado para o  $FFL_{19^\circ C}$  35%|G\*|senφ visto que existiam poucos dados em cada classe de FFM.

Figura 85 - Correlação com FFM S-VECD: FFL 35%|G\*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e FFL máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante



Fonte: Autora.

Como esse indicador não seguia uma distribuição normal dentro das classes, foi utilizada novamente a técnica de *Bootstrap*, com 4000 reamostragens com repetição e confiança de 95%. O resultado encontrado está na Tabela 56, e vale lembrar que a classe 1 de FFM é aquela que contém as melhores misturas segundo esse indicador, ou seja, com os maiores valores de FFM.

Tabela 56 - Intervalos de confiança para FFL<sub>19°C</sub> máxPSE segundo as classes de FFM S-VECD

Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
FFL <sub>19°C</sub> máxPSE (RTFOT)	1	1,797	0,207	-0,136	0,191	[ 1,662 - 2,000 ]
	2	1,526	0,074	-0,085	0,049	[ 1,441 - 1,575 ]
	3	1,576	0,164	-0,108	0,141	[ 1,469 - 1,718 ]
	4	1,503	0,127	-0,065	0,081	[ 1,434 - 1,583 ]
	5	1,310	0,247	-0,268	0,218	[ 1,041 - 1,528 ]

Fonte: Autora.

As médias para cada grupo indicam que as piores misturas quanto à fadiga, segundo o indicador FFM, são compostas por ligantes de menor FFL<sub>19°C</sub> máxPSE. No entanto, para o nível de confiança adotado não foi possível separar esses valores para os grupos 2 a 5, e

apenas foi possível inferir que ligantes com  $FFL_{19^{\circ}C}$  máxPSE acima de 1,662 fazem parte de misturas com FFM acima de 1,874 (classe 1).

Uma vez que os ensaios por trás dos fatores de fadiga da mistura S-VECD e MeDiNa possuem premissas e configurações distintas, foram encontradas as matrizes de correlação de Pearson também para o FFM MeDiNa, considerando os parâmetros dos ligantes, cujos resultados completos estão no Apêndice G. Novamente pela pouca quantidade de dados, foi utilizado um nível de confiança de 90% para definir os coeficientes de Pearson estatisticamente diferentes de zero.

A Tabela 57 descreve os melhores índices encontrados. A partir da tabela, foi possível observar que não houve nenhum coeficiente de correlação classificado como fraco, e que a única classificação como “boa correlação” se refere ao  $\tau$ , índice da modelagem 2s2p1d dos ligantes na condição após RTFOT+PAV. Existiam apenas 5 pares de dados, mas a correlação positiva sinaliza que maiores valores para  $\tau$  (maior rigidez e menor ângulo de fase nas curvas mestras como um todo) indicam misturas mais resistentes à fadiga.

Além do parâmetro  $\tau$ , destacaram-se ainda diversos outros parâmetros da modelagem 2s2p1d, ou seja, dos dados oriundos de um ensaio que capta a viscoelasticidade dos materiais, diferentemente dos ensaios por compressão diametral, que consideram a medida das propriedades em uma única temperatura e frequência. As correlações positivas para o parâmetro “k” indicam tendência contrária àquela encontrada para  $\tau$ , e parece mais razoável. O “k” age na curva em baixas temperaturas ou altas frequências, e o coeficiente encontrado mostra que menores valores de rigidez e maiores ângulos de fase são desejáveis para a fadiga, reduzindo um possível comportamento frágil do material nessa faixa. Já o aumento parâmetro  $\delta$  reduz a rigidez em temperaturas intermediárias, mas também reduz o ângulo de fase, e sua correlação positiva com o FFM-MeDiNa mostra que esse seria o efeito mais desejável para a fadiga.

É evidente, pela análise desses dados, que os efeitos dos parâmetros de modelagem devem ser analisados com cautela, uma vez que não agem sozinhos no ajuste matemático. Os 7 parâmetros do 2s2p1d são ajustados de maneira conjunta, fazendo com que um possua influência sobre o outro e a observação isolada do efeito de cada um fique muitas vezes pouco precisa.

Tabela 57 - Melhores coeficientes de correlação de Pearson entre FFM-MeDiNa e parâmetros dos ligantes

REOLOGIA SOB CISALHAMENTO DINÂMICO			
ORDEM	Propriedade	Coef. de correlação de Pearson	Classificação
1°	$\tau$ 2s2p 1d PAV	0,89	Boa
2°	k 2s2p 1d VG	0,62	Moderada
3°	$\phi$ 65°C:1Hz RT	-0,58	Moderada
4°	G0 2s2p 1d RT	-0,57	Moderada
4°	k 2s2p 1d RT	0,57	Moderada
5°	G* 19°C:10Hz RT	-0,54	Moderada
5°	FFL 19°C RT (máxPSE)	0,54	Moderada
6°	$\delta$ 2s2p 1d RT	0,50	Moderada
7°	$\beta$ 2s2p 1d VG	0,48	Moderada
7°	$\beta$ 2s2p 1d RT	0,48	Moderada
8°	G00 2s2p 1d RT	0,47	Moderada

Fonte: Autora.

Também pode ser verificado que 4 índices da tabela se referem a propriedades em altas temperaturas ( $\phi$ 65°C:1Hz,  $\beta$  e G00), o que não parece pertinente para a análise da fadiga, e podem não estabelecer relações de causa e efeito. A correlação negativa com  $\phi$ 65°C:1Hz indica que maiores valores de ângulo de fase em altas temperaturas (comportamento viscoso mais acentuado), geram menores FFM. Por outro lado, maiores valores atribuídos para G00 e  $\beta$  indicariam que uma maior rigidez em altas temperaturas representaria melhor comportamento à fadiga.

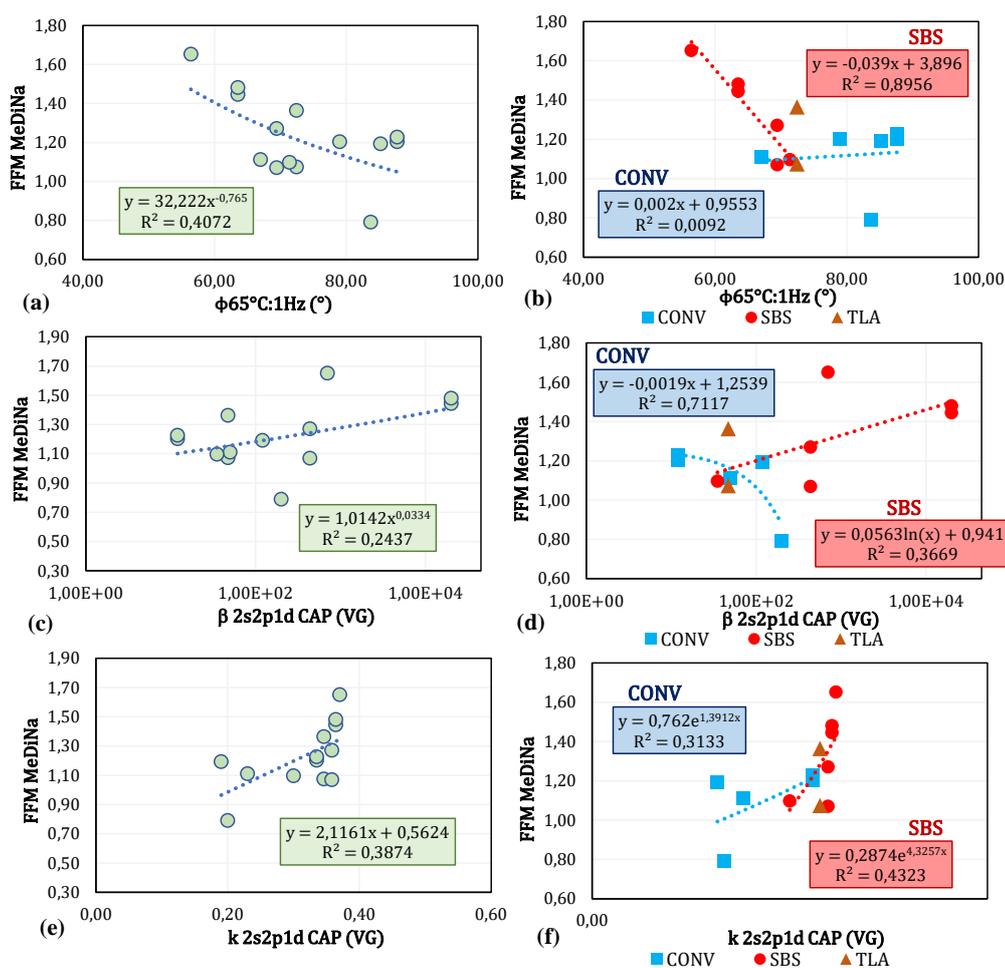
O último parâmetro do 2s2p1d que está presente na tabela é o G0, ou seja, a máxima rigidez que o ligante pode atingir (nas temperaturas baixas ou frequências altas). A correlação linear negativa sinaliza que ligantes com menor rigidez nessa faixa produzem melhores misturas à fadiga. Seguindo a mesma tendência, o parâmetro |G\*|19°C:10Hz também mostra que menores valores de rigidez nas temperaturas intermediárias são desejáveis. Por fim, o fator de fadiga do ligante pelo critério máxPSE aparece com uma relação moderada positiva, e ligantes com maior FFL representam misturas com tendência a ter maior FFM.

Para visualizar efetivamente a relação individual de cada variável com o FFM-MeDiNa, e observar as linhas de tendência, todos os indicadores da Tabela 57 foram plotados graficamente com o FFM, e serão discutidos aqueles que formaram as melhores tendências. A Figura 86a mostra que há uma correlação regular, considerando todos os pontos, entre  $\phi$ 65°C:1Hz e o FFM.

No entanto, a Figura 86b deixa mais evidente que os ligantes modificados por polímero são efetivamente os responsáveis por essa tendência. Embora a observação desse índice em alta temperatura não fosse esperado para a inferência de fadiga, foi obtida uma boa

correlação para os CAPs SBS e HiMA, e maiores valores de ângulo de fase nessa faixa geram menor FFM.

Figura 86 - Correlações com FFM-MeDiNa:  $\phi 65^\circ\text{C}:1\text{Hz}$  (a) geral e (b) por tipo de CAP;  $\beta$  2s2p1d VG (c) geral e (d) por tipo de CAP; e  $k$  2s2p1d VG (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Vale destacar que os dois pontos de misturas com CAP TLA são referentes ao mesmo ligante, mas um ponto é indexado a mistura usinada e o outro a mistura de laboratório. A mistura usinada teve pior comportamento à fadiga, possivelmente relacionado à oxidação excessiva do CAP. Ressalta-se, novamente, que essa relação pode não ser de causa e efeito, sendo necessária a observação de uma quantidade maior de dados para verificar essa relação.

Além disso, o parâmetro  $\beta$  apresentou baixa correlação com o FFM considerando todos os pontos (Figura 86c). No entanto, é possível observar pela Figura 86d que ligantes

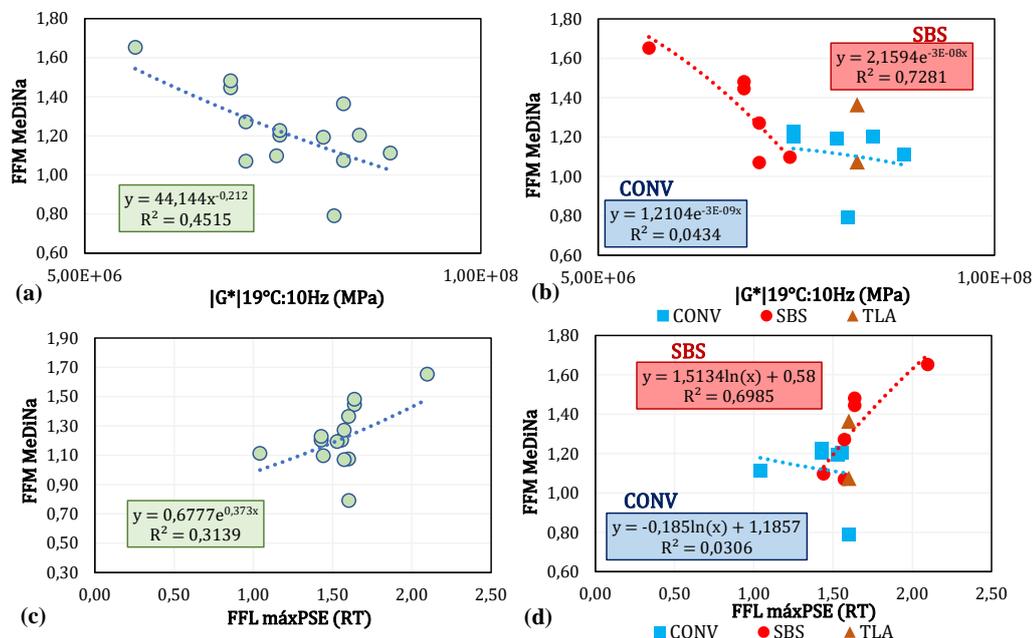
com e sem modificação por polímero apresentam tendências bastante distintas. Apesar do bom coeficiente de determinação encontrado para CAPs convencionais, não foi considerada uma tendência clara para possibilitar qualquer conclusão. Misturas com polímero parecem ter alguma sensibilidade a altas temperaturas mesmo para o problema da fadiga, mas é necessária uma maior quantidade de dados para investigações futuras. Para esses ligantes, maior rigidez e menor ângulo de fase nessas temperaturas são desejáveis no enfrentamento da fadiga (maior  $\beta$ ).

Para o parâmetro “k” (atuante nas baixas temperaturas), a correlação geral foi baixa para um modelo linear (Figura 86e), mas moderada quando observada sob polinômio de segundo grau ( $R^2 = 0,5122$ ). Essa curvatura é explicada pela diferença nas tendências de CAPs com e sem polímero (Figura 86f), uma vez que a presença de polímero faz com que menores incrementos de k (reduzindo  $|G^*|$  e aumentando  $\phi$ ), produzem saltos maiores em FFM.

Considerando a rigidez em temperatura intermediária e a 10 Hz da Figura 87a ( $|G^*|_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$ ), é possível perceber que há uma tendência regular entre esse indicador e o FFM-MeDiNa, e sinaliza que o aumento da rigidez nessa faixa reduz o fator de fadiga da mistura. No entanto, a Figura 87b indica que essa tendência é condicionada pelos ligantes com polímero, uma vez que foi obtida uma boa correlação para esses materiais. Nesse sentido, a fadiga (pelo ensaio por compressão diametral) das misturas com CAP polímero parece ser bastante sensível ao comportamento do ligante, enquanto que para as misturas com CAP convencional outras variáveis precisam ser consideradas na inferência do FFM.

As mesmas observações valem para o fator de fadiga dos ligantes pelo critério máxPSE. Embora a Figura 87c mostre que há uma correlação geral baixa, a Figura 87d evidencia que ligantes com SBS ou HiMA que possuem maiores valores de FFL máxPSE produzem misturas melhores à fadiga, enquanto que o efeito da melhora do FFL em ligantes convencionais parece não ter influência no FFM. No entanto, ressalta-se novamente que uma maior quantidade desses dados é necessária para uma inferência mais precisa.

Figura 87 - Correlações com FFM-MeDiNa:  $|G^*|_{19^\circ\text{C}:10\text{Hz}}$  (a) geral e (b) por tipo de CAP; e FFL máxPSE (c) geral e (d) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

### 5.2.2.2 Da mistura para a simulação de pavimentos

Dando sequência para a observação dos dados entre escalas diferentes, foram cruzados parâmetros relacionados à fadiga de misturas asfálticas com o resultado das simulações de pavimentos. A seção está dividida entre as simulações no FlexPAVE<sup>TM</sup> e no MeDiNa.

#### 5.2.2.2.1 Simulações no FlexPAVE<sup>TM</sup>

Para o cruzamento do resultado obtido no FlexPAVE<sup>TM</sup> com os parâmetros das misturas, foi considerado ao final de 10 anos de período de projeto o dano médio acumulado na camada asfáltica (N/Nf), a área trincada pela função de transferência de Nascimento (2015) e a área trincada pela nova função de transferência, de Nascimento (2021). Para essa ferramenta, foram simuladas 125 misturas asfálticas (as quais possuíam a caracterização à fadiga pelo ensaio uniaxial à tração-compressão), totalizando 375 simulações com as 3 estruturas propostas.

Nesse sentido, as figuras seguintes ilustram o cruzamento desses parâmetros com o fator de fadiga das misturas, identificado na seção anterior como um potencial indicador desse defeito. No entanto, inicialmente foram considerados todos os pontos, mas foi observado que algumas misturas não tiveram nenhum dano acumulado ou área trincada ao final dos 120 meses, prejudicando algumas tendências. Dessa forma, foram apresentadas aqui as correlações desconsiderando as misturas com valores nulos de N/Nf ou AT%.

Das misturas com dano igual a zero para a estrutura de 5 cm de revestimento, 7 são oriundas do estudo de Boeira (2018) com CAP 50/70, com diferentes faixas granulométricas, métodos de composição de agregados e dosagem; 4 misturas com RAP, de Correa (2020) (apenas uma com CAP 50/70 e as demais com AMP 60/85); 3 misturas de campo dos trechos monitorados da UFSM (SANTOS, 2015; ROSSATO, 2015), com CAP 50/70.

Considerando a função de transferência de Nascimento (2015), as misturas com área trincada nula em 120 meses incluem, além das mencionadas para o dano, outras misturas de campo, como a V509 M6 de Bordin (2020) com AMB, diversas misturas com RAP, especialmente de Almeida Jr. (2022), poucas modificadas com SBS e apenas uma com CAP 50/70 (50/70-I de Possebon, 2021). Praticamente as mesmas misturas apresentaram 0% de área trincada pela função de transferência de Nascimento (2021).

Uma vez que as misturas observadas com dano e área trincada iguais a zero ao final de 10 anos de simulação possuem diferentes tipos de agregados, granulometrias, métodos de dosagem, entre outros, é possível que esse comportamento se deva à presença de ligantes oxidados oriundos de RAP, ou modificados, especialmente por polímero, com exceção das misturas de Boeira (2018) e uma mistura de Possebon (2021), com CAP convencional.

Vale destacar que, conforme a estrutura proposta ficou mais robusta (aumentando a espessura da camada asfáltica), foi possível observar que um maior número de misturas não obteve dano ou área trincada, mesmo para um tráfego extremamente pesado. Nesse sentido, fica evidente que a fadiga está intimamente ligada à composição estrutural do pavimento, fazendo com que camadas mais robustas (gerando menores deflexões) possuam melhor desempenho à fadiga.

Apenas a título de comparação, observou-se uma diferença no comportamento viscoelástico linear (a 21°C e 1Hz) das misturas que obtiveram pior e melhor desempenho nas simulações. Considerando a função de transferência de Nascimento (2015) e para a estrutura com 5 cm de revestimento, a rigidez média das misturas com área trincada de 100% em 10

anos foi aproximadamente 36% superior àquelas com 0% de área trincada, e o ângulo de fase médio foi aproximadamente 17% menor.

Para 10 cm de concreto asfáltico, a rigidez foi aproximadamente 40% maior, e o ângulo de fase em torno de 16% menor. Por fim, para a estrutura com 15 cm de revestimento, a rigidez média foi 25% maior e o ângulo de fase foi 13% menor. Assim, apenas por uma análise inicial, é possível inferir que misturas com melhor desempenho à fadiga são, em média, menos rígidas e possuem um comportamento viscoso mais acentuado em temperaturas intermediárias.

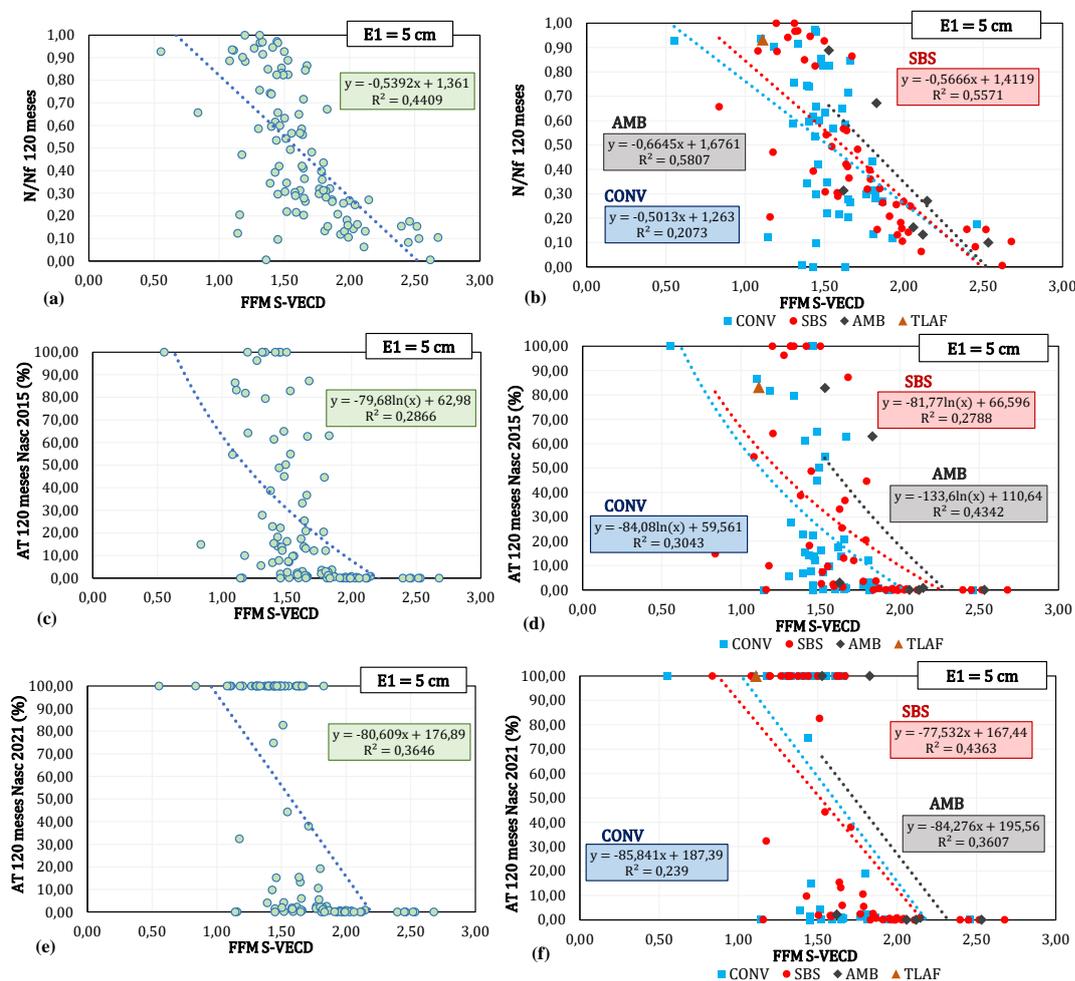
Observando, portanto, a Figura 88, é possível afirmar que dano médio acumulado na camada asfáltica ao final de 10 anos diminui de forma aproximadamente linear com o aumento do FFM. A correlação encontrada foi regular, tanto observando todos os pontos, quanto para os CAPs com polímero e borracha, mas foi insatisfatória para ligantes convencionais.

Para a estrutura com 5 cm de revestimento, não é possível visualizar uma diferença clara entre os tipos de CAPs, sendo que os ligantes convencionais se comportam tão bem quanto ligantes modificados sob médio volume de tráfego ( $2,51 \cdot 10^6$  repetições do eixo-padrão ao final dos 120 meses). Misturas com AMB parecem ser mais sensíveis a uma melhora no FFM, visto que para o mesmo incremento de FFM, geram maiores quedas de  $N/N_f$  (maior inclinação da reta de ajuste).

Considerando a área trincada, também não fica clara a diferença entre as misturas com diferentes tipos de ligantes, e as correlações encontradas são inferiores àquelas que consideram apenas o dano médio acumulado. As linhas de tendência indicam que as misturas com AMB possuem valores maiores de FFM, mas não necessariamente apresentam o menor trincamento.

Além disso, ficou bastante evidente a diferença entre as duas funções de transferência. Enquanto a versão de 2015 capta mais valores intermediários de área trincada, a versão atualizada forneceu em sua maioria valores extremos (próximos a zero ou próximos a 100%). O melhor ajuste, para a versão de 2015, foi obtida sob uma curva logarítmica, e a versão de 2021 parece seguir uma tendência linear de evolução com o FFM. De forma geral, apenas o FFM da mistura parece não ser satisfatório para prever o dano e a área trincada, embora o dano tenha gerado melhores tendências, mas é promissor como um critério de seleção de materiais.

Figura 88 - Correlação de FFM (E1): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

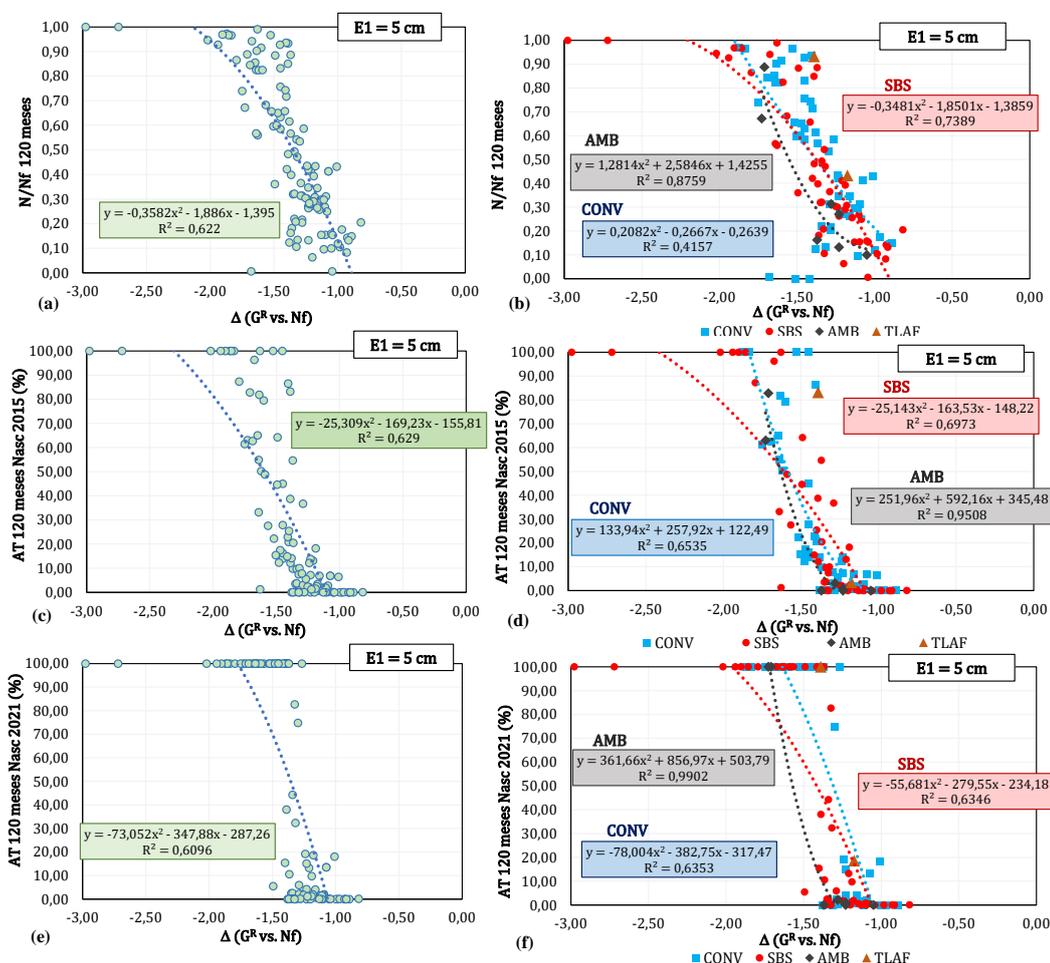
Além do FFM, na seção anterior o parâmetro  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs. Nf também se mostrou um potencial indicador do comportamento à fadiga das misturas. Vale lembrar que esse é o expoente do modelo de potência atribuído nas curvas de  $G^R$  vs. Nf. A Figura 89 ilustra a correspondência encontrada com o resultado das simulações da primeira estrutura, com 5 cm de concreto asfáltico. Também estão desconsiderados os pontos com dano ou área trincada iguais a zero, visto que prejudicaram substancialmente as correlações.

Para todos os indicadores da simulação, as tendências mais adequadas apareceram sob forma parabólica (polinômio de segundo grau). Para as simulações gerais, foi possível obter correspondências regulares entre os parâmetros, com coeficientes de determinação acima de

0,6. Os ajustes seguiram a tendência esperada, na qual maiores valores de  $\Delta$  sugerem melhor desempenho à fadiga.

Esse indicador fornece a inclinação da curva  $G^R$  vs.  $N_f$ , que por sua vez ilustra a evolução da taxa de variação da média de energia de pseudodeformação liberada com os ciclos de falha por fadiga. Quanto maior o valor de  $\Delta$ , menos inclinada será a curva, fazendo com que o parâmetro  $G^R$  tenha menor tendência de chegar ao valor nulo, e os ciclos até a falha tendem ao infinito.

Figura 89 - Correlação de  $\Delta$  (E1): com  $N/N_f$  120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

A Figura 89b mostra que foram obtidos bons ajustes entre  $\Delta$  e  $N/N_f$  para as misturas com AMB e AMP. Para misturas com ligantes convencionais, a correspondência foi apenas regular, mas manteve a mesma tendência descrita anteriormente. A nuvem de pontos, no

entanto, não permite distinguir visualmente uma diferença precisa entre as misturas com diferentes ligantes, indicando novamente que ligantes convencionais podem ser suficientes para atender o tráfego médio na estrutura proposta.

Observando a área trincada pelas duas funções de transferência, o ajuste obtido foi ainda melhor, para os três tipos de ligantes mencionados (convencionais, AMB e AMP), mesmo com as diferenças encontradas para AT% 120 meses pelas duas versões (2015 e 2021). Novamente, não foi possível perceber graficamente as diferenças específicas entre misturas com ligantes distintos, mas o índice  $\Delta$  parece ser um melhor indicador de fadiga em misturas quando comparado ao FFM.

No caso da simulação com 10 cm de revestimento, as correspondências encontradas entre o FFM e o dano ou área trincada foram baixas, considerando todos os pontos (com exceção das misturas com resultado nulo) (Figura 90). É possível verificar uma queda linear (ou logarítmica quando utilizada a função de transferência de Nascimento, 2015) do dano ou área trincada com o aumento do FFM. Entretanto, essa relação não é precisa, e mesmo a consideração da área abaixo da curva de Wöhler que simula um ensaio perfeito não se mostrou satisfatória para prever o resultado das simulações.

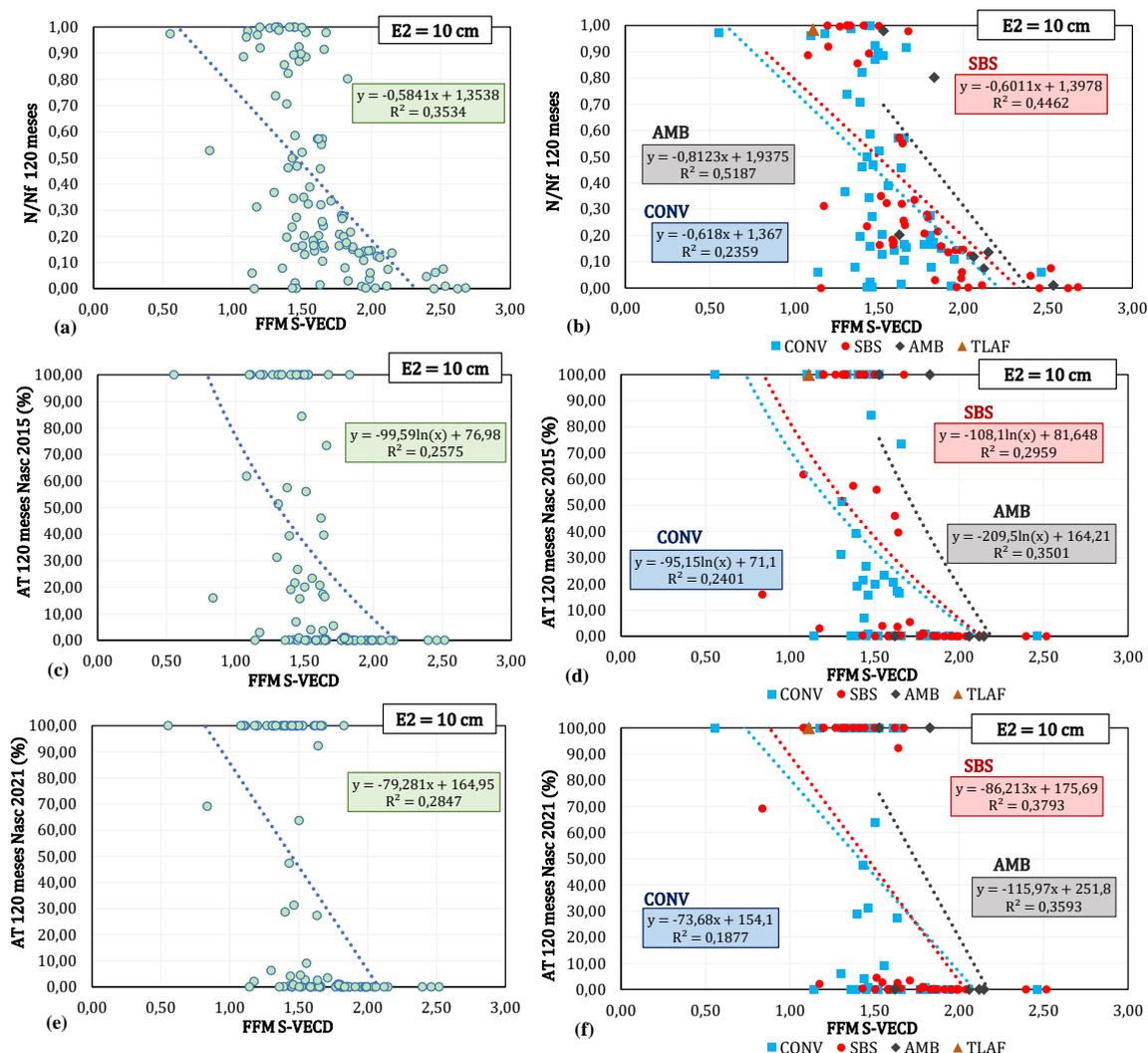
De forma geral, o aumento de 5 cm na espessura do revestimento reduziu o dano e a área trincada das misturas mesmo com o aumento de tráfego ( $1,46 \cdot 10^7$  repetições do eixo-padrão ao final de 10 anos). Novamente, ressalta-se a diferença nos resultados das duas funções de transferência, uma vez que a função de 2021 parece estimar valores menores de área trincada, fazendo com que um maior número de misturas fique abaixo, por exemplo, do limite de 30% do método de dimensionamento brasileiro.

Considerando a separação entre os tipos de ligantes, as correspondências foram regulares para CAP com modificação, mas permaneceu ruim para os ligantes convencionais. Embora a distinção entre as misturas apenas pela análise gráfica não forneça distinções claras entre os tipos de ligantes, observou-se que a maioria dos ligantes com borracha estudados no GEPPASV apresentam maiores valores de FFM e danos satisfatórios ao final de 10 anos (abaixo de 0,35, que corresponderia, segundo Nascimento (2015), a uma área trincada estabilizada em torno de 10% ou menos).

Para os valores de área trincada, as correlações para essa estrutura não foram satisfatórias, embora pareçam ser melhor aplicadas para asfaltos modificados. Assim, é

possível verificar que o aumento de FFM leva a um melhor comportamento à fadiga, mas esse parece ser um indicador limitado apenas à seleção de materiais.

Figura 90 - Correlação de FFM (E2): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP

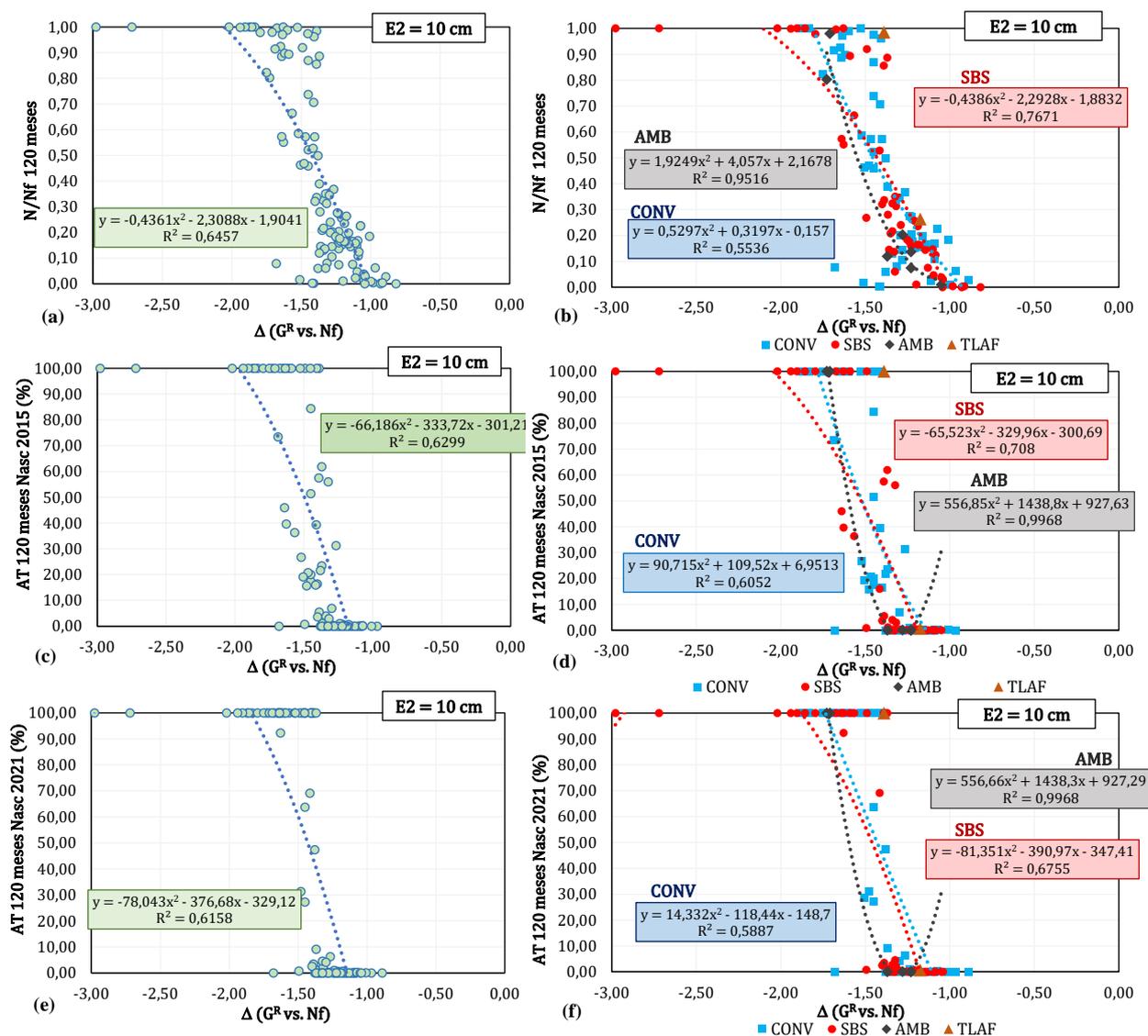


Fonte: Autora.

A Figura 91 indica, mais uma vez, o potencial do índice  $\Delta$  nas correlações com o resultado das simulações de pavimentos. A mesma tendência de queda sob forma de parábola foi encontrada na estrutura com 10 cm de revestimento, tanto para o dano quanto para a área trincada. Essas relações melhoram quando os ligantes são analisados separadamente, e fica evidente que a consideração de um parâmetro relacionado à energia liberada no ensaio

uniaxial de fadiga à tração-compressão é mais eficiente na avaliação desse defeito em misturas.

Figura 91 - Correlação de  $\Delta$  (E2): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Embora a nuvem de pontos dificulte a análise visual dos pontos por tipo de CAP, observa-se que, aparentemente, ligantes modificados por polímero (SBS ou HiMA) e por borracha começam a se distanciar dos ligantes convencionais para essa estrutura e nível de tráfego. Como exemplo, pode-se perceber na Figura 91b que, para um  $\Delta$  de aproximadamente -1,40, há mais misturas com ligante convencional na metade superior do gráfico (maiores

danos), indicando que pode ser interessante a utilização de ligantes melhores para um tráfego pesado, mas essa escolha também dependerá da estrutura proposta e da disponibilidade de materiais para as outras camadas na região da rodovia.

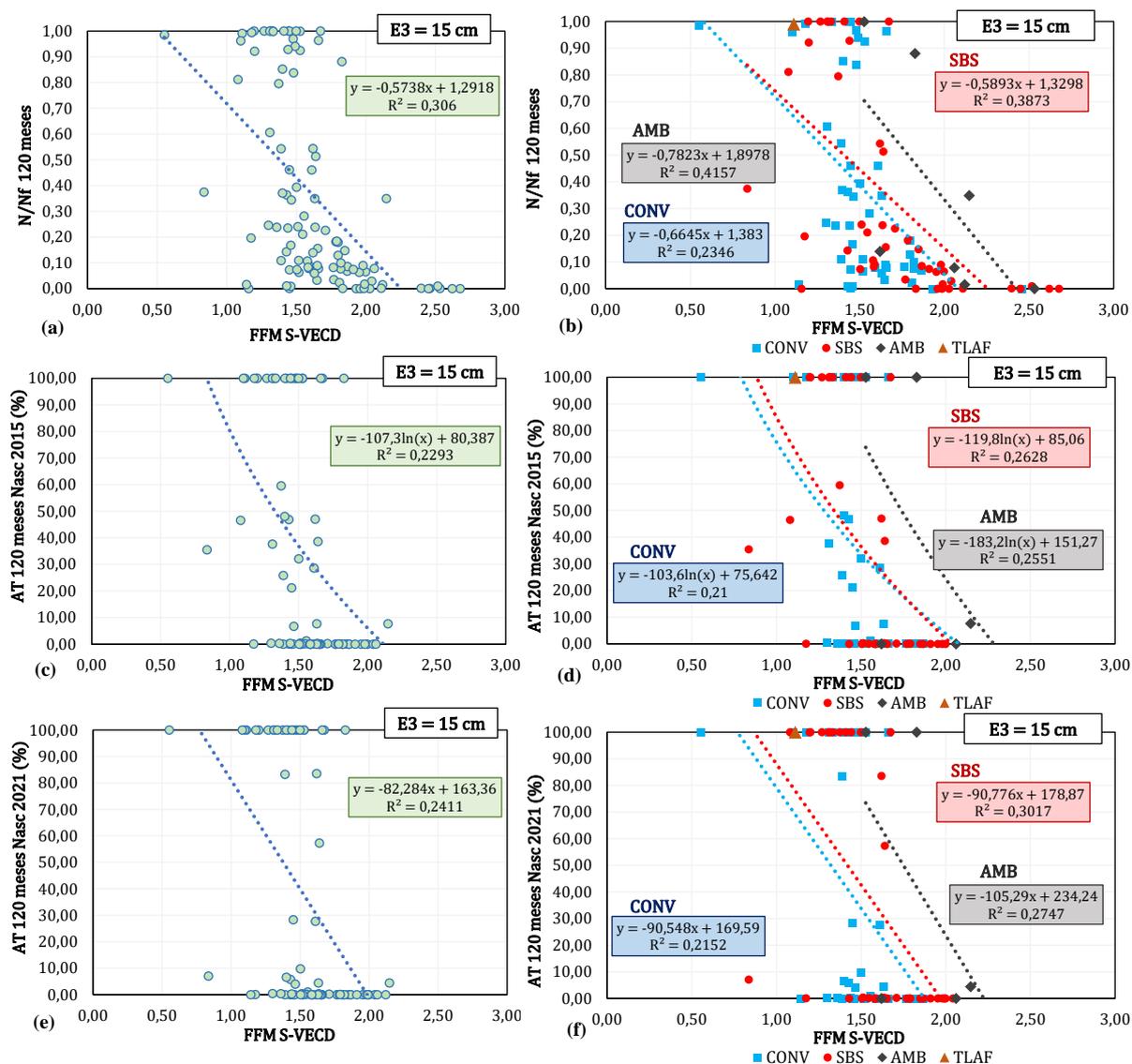
Da mesma forma que para as demais simulações, a Figura 92 mostra que não há uma correspondência satisfatória com o FFM. Foi possível perceber, no entanto, que os ajustes pioraram sequencialmente com o aumento da espessura do revestimento. Observando a tendência de quedas dos pontos, nota-se que há uma diminuição mais brusca nos danos e áreas trincadas na estrutura E3, mesmo para tráfegos mais elevados ( $5,0 \cdot 10^7$  repetições do eixo-padrão). Isso sinaliza que, mesmo utilizando diferentes tipos de ligantes, o papel da rigidez estrutural é bastante significativo e não deve ser negligenciado, e a utilização de 15 cm de revestimento reduziu os problemas de fadiga na maioria das misturas.

Embora as correlações tenham melhorado na separação entre tipos de ligantes, o indicador segue sendo insatisfatório para prever dano por fadiga simulado e área trincada simulada. Além disso, vale destacar que apenas o tipo de ligante não garante um bom comportamento à fadiga das misturas. Como exemplo, ficou evidente que as únicas duas misturas com TLAFlex do banco de dados, ensaiadas à fadiga por tração-compressão, geraram resultados completamente distintos.

Algumas particularidades de cada uma envolvem, por exemplo, o teor de ligante e a resistência à tração por compressão diametral. Enquanto a mistura com baixo desempenho U9-DNIT-FXC-TLAF de Faccin (2018) possui 5,27% de CAP e um RT de 2,25 MPa, a mistura com melhor comportamento “TLAF” de Vestena (2021) possui um teor de ligante de 5,39% e um RT de 2,40 MPa, indicando que não devem ser negligenciados outros parâmetros de dosagem e resistência. No entanto, especialmente se tratando de AMB ou asfalto com TLA, mais dados são necessários para conclusões efetivas.

Novamente, seguindo as tendências encontradas nas demais simulações, o índice  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$  se mostrou um bom indicador da fadiga em misturas, uma vez que foram obtidas correspondências gerais regulares sob modelo polinomial de grau 2 (Figura 93). Para ligantes com polímero e borracha, as relações foram boas, embora mais baixas quando considerada a função de transferência de Nascimento (2021), que prevê mais uma vez valores próximos aos extremos (0 ou 100%).

Figura 92 - Correlação de FFM (E3): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP

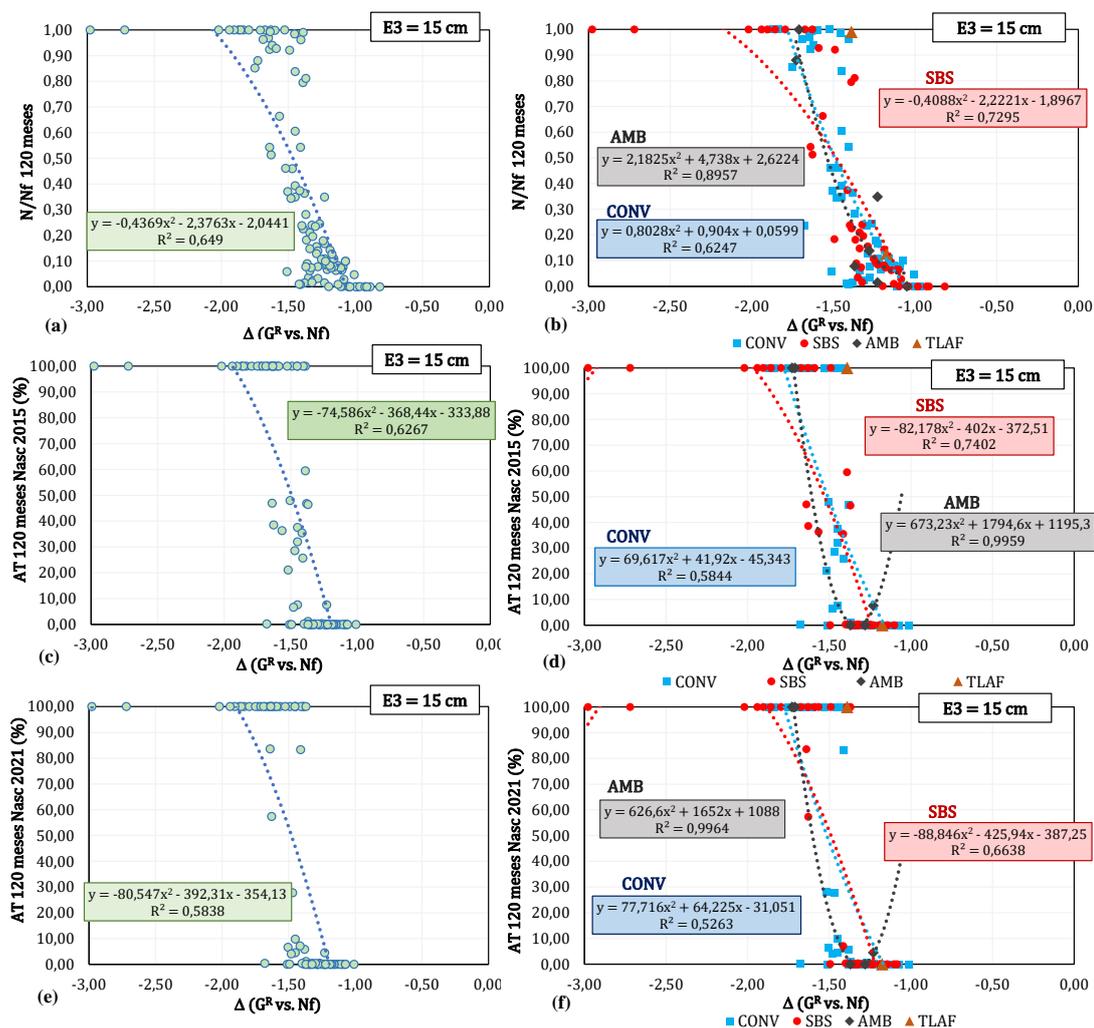


Fonte: Autora.

Considerando em termos físicos, o fator de fadiga das misturas é um indicador mais robusto, quando calculado pelas curvas de Wöhler simuladas a partir da equação de Nascimento (2016), do que apenas a consideração do expoente  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs. Nf. Os ciclos até a falha, nesse caso, reúnem todos os parâmetros obtidos pela abordagem S-VECD, incluindo as curvas características de dano, a própria envoltória de ruptura pelo critério  $G^R$ , e dados de viscoelasticidade linear. Mais detalhes dessa formulação podem ser encontrados em Boeira (2018). No entanto, as correlações de  $\Delta$  com dados de simulações de pavimentos

foram bastante superiores. Santos (2020) destaca a importância desse parâmetro em uma análise de sensibilidade, com relação ao dano acumulado encontrado pelo programa CAP3D-D, desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC). Schuster (2023) também observa que esse é um bom indicador do envelhecimento de misturas asfálticas em campo.

Figura 93 - Correlação de  $\Delta$  (E3): com N/Nf 120 meses (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% Nascimento (2015) (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% Nascimento (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Como foi identificado que o índice  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $Nf$ ) é um indicador promissor para classificação das misturas quanto à fadiga, o ranqueamento foi realizado por esse índice, em paralelo com o FFM S-VECD (Tabela 58). Dessa forma, foi possível identificar que as classificações possuem tanto misturas com classificação similar pelos dois critérios, como variações significativas para alguns materiais.

Tabela 58 - Ranqueamento das misturas pelo FFM S-VECD e  $\Delta$  ( $G^R$  vs. Nf)

Ordem	Nomenclatura	FFM_SVECD	Nomenclatura	$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)
1°	U12-DAER-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	2,678	S BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-0,818
2°	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	2,620	REF (RAP B 100°C) (Teixeira e outros, 2017)	-0,915
3°	U5-DNIT-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	2,533	S CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	-0,926
4°	REF 60/85 (Correa, 2020)	2,517	SBS RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	-0,929
5°	Neat RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	2,460	Neat RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	-0,968
6°	SBS RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	2,450	U12-DAER-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-0,983
7°	M CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	2,397	Neat RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	-0,999
8°	U3-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	2,147	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	-1,041
9°	V509 M6 (Bordin e outros, 2020)	2,120	M4-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	-1,043
10°	SBS RAP + 8% R + 1% HiMA (Almeida Júnior, 2022)	2,110	U5-DNIT-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	-1,050
11°	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	2,060	M10 (Luzzi, 2019)	-1,050
12°	M BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	2,041	M BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,085
13°	S CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	2,028	10 RAP 60/85 (Correa, 2020)	-1,090
14°	U12-DAER-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,998	M BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,090
15°	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	1,991	U11-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,093
16°	M10 (Luzzi, 2019)	1,987	M CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,097
17°	SBS RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	1,980	U12-DAER-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,101
18°	10 RAP 60/85 (Correa, 2020)	1,962	50/70 - B (Possebon, 2021)	-1,110
19°	REF (RAP B 100°C) (Teixeira e outros, 2017)	1,960	50/70 - I (Possebon, 2021)	-1,110
20°	M BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,953	REF 60/85 (Correa, 2020)	-1,130
21°	M BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,944	U14-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,130
22°	Neat RAP + 12% R (Almeida Júnior, 2022)	1,930	M BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,145
23°	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,910	50/70 - E (Possebon, 2021)	-1,160
24°	U9-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,867	50/70 - D (Possebon, 2021)	-1,160
25°	U2-DAER-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,865	REF (RAP B 140/170°C) (Teixeira e outros, 2017)	-1,180
26°	U6-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,849	S CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,189
27°	DERSA - FX III - 60/85E A (Nunes-Ramos, 2023)	1,832	M20 (Luzzi, 2019)	-1,190
28°	U5-DNIT-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,827	SBS RAP + 8% R + 1% HiMA (Almeida Júnior, 2022)	-1,199
29°	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,820	U2-DAER-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,210
30°	U11-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,818	U14-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,210
31°	Neat RAP + 8% R + 1% HiMA (Almeida Júnior, 2022)	1,810	REF 50/70 (Correa, 2020)	-1,220
32°	M CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,800	M6-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	-1,223
33°	V509 M1 (Bordin e outros, 2020)	1,800	U3-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	-1,230
34°	V509 M2 (Bordin e outros, 2020)	1,800	V509 M6 (Bordin e outros, 2020)	-1,230
35°	M7-PG64-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	1,790	U9-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,230
36°	M CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,785	U8-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,230
37°	U2-DNIT-FXC-65/90 (Faccin e outros, 2018)	1,769	30/45 (Possebon, 2021)	-1,230
38°	20 RAP 60/85 (Correa, 2020)	1,769	V509 M2 (Bordin e outros, 2020)	-1,240
39°	U14-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,767	U5-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	-1,240
40°	30 RAP 60/85 (Correa, 2020)	1,758	10 RAP 50/70 (Correa, 2020)	-1,250
41°	M BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,709	SBS RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	-1,253
42°	M CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,674	Neat RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	-1,267
43°	50/70 - E (Possebon, 2021)	1,660	M CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,270
44°	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,660	S CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,276
45°	U2-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,654	AR (Possebon, 2021)	-1,280
46°	REF 50/70 (Correa, 2020)	1,651	50/70 - F (Possebon, 2021)	-1,280
47°	M BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,647	V509 M1 (Bordin e outros, 2020)	-1,290
48°	U14-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,645	U2-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,290
49°	SBS REF (Almeida Júnior, 2022)	1,640	REF (RAP A 170°C) (Teixeira e outros, 2017)	-1,298
50°	M CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,638	Neat RAP + 8% R + 1% HiMA (Almeida Júnior, 2022)	-1,315
51°	U4-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,632	S BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,318
52°	UFMS 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)	1,630	S BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,324
53°	AR (Possebon, 2021)	1,620	DERSA - FX III - 60/85E B (Nunes-Ramos, 2023)	-1,324
54°	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	1,620	M5-PG70-SBS-12.5 (Schuster e outros, 2023)	-1,330
55°	30 RAP 50/70 (Correa, 2020)	1,611	U6-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,340
56°	50/70 - F (Possebon, 2021)	1,590	M BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,340
57°	U5-DAER-FXB-ECO (Faccin e outros, 2018)	1,588	U2-DNIT-FXC-65/90 (Faccin e outros, 2018)	-1,350
58°	M20 (Luzzi, 2019)	1,584	SBS RAP + 16% R (Almeida Júnior, 2022)	-1,360
59°	SBS RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	1,580	S CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,364
60°	U4-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,556	M CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,366
61°	M BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,546	M8-PG64-RUB-12.5 (Schuster e outros, 2023)	-1,370
62°	U1-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,528	U4-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,370
63°	U8-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,517	RAP B 170°C (Teixeira e outros, 2017)	-1,370
64°	S BAI FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,512	50/70 - G (Possebon, 2021)	-1,380
65°	REF (RAP B 140/170°C) (Teixeira e outros, 2017)	1,504	M BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,389
66°	U8-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,502	U9-DNIT-FXC-TLAF (Faccin e outros, 2018)	-1,390

Tabela 58 - Ranqueamento das misturas pelo FFM S-VECD e  $\Delta$  ( $G^R$  vs. Nf)

				(Conclusão)
Ordem	Nomenclatura	FFM_SVECD	Nomenclatura	$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)
67°	M30 (Luzzi, 2019)	1,499	M CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,391
68°	20 RAP 50/70 (Correa, 2020)	1,492	M BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,403
69°	50/70 - C (Possebon, 2021)	1,480	Neat RAP (Almeida Júnior, 2022)	-1,407
70°	U10-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,478	CACAMPO (Rossato e outros, 2015)	-1,410
71°	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	1,465	50/70 - H (Possebon, 2021)	-1,410
72°	30/45 (Possebon, 2021)	1,460	RAP B 100°C (Teixeira e outros, 2017)	-1,415
73°	CACAMPO (Rossato e outros, 2015)	1,460	UFMSM 3 - 50/70 12,5 mm(b) (Santos e outros, 2015)	-1,420
74°	U14-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,450	M CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,446
75°	50/70 - B (Possebon, 2021)	1,450	U4-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,450
76°	50/70 - I (Possebon, 2021)	1,450	U8-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,450
77°	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	1,450	50/70 - C (Possebon, 2021)	-1,450
78°	U13-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	1,443	50/70 - A (Possebon, 2021)	-1,450
79°	M0 (Luzzi, 2019)	1,441	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	-1,453
80°	REF (RAP A 170°C) (Teixeira e outros, 2017)	1,439	20 RAP 60/85 (Correa, 2020)	-1,460
81°	50/70 - G (Possebon, 2021)	1,430	30 RAP 50/70 (Correa, 2020)	-1,470
82°	10 RAP 50/70 (Correa, 2020)	1,430	DERSA - FX III - 30/45 B (Nunes-Ramos, 2023)	-1,480
83°	UFMSM 3 - 50/70 12,5 mm(b) (Santos e outros, 2015)	1,430	SBS RAP (Almeida Júnior, 2022)	-1,491
84°	S CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,429	M7-PG64-SBS-12,5 (Schuster e outros, 2023)	-1,494
85°	60/85E (Possebon, 2021)	1,410	Neat REF (Almeida Júnior, 2022)	-1,505
86°	Neat REF (Almeida Júnior, 2022)	1,400	S BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,508
87°	50/70 - D (Possebon, 2021)	1,390	30 RAP 60/85 (Correa, 2020)	-1,510
88°	50/70 - H (Possebon, 2021)	1,390	UFMSM 1 - 50/70 12,5 mm (Santos e outros, 2015)	-1,510
89°	S CON FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,383	M1-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	-1,520
90°	M CON FX C HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,374	M0 (Luzzi, 2019)	-1,590
91°	UFMSM 3 - 50/70 12,5 mm(a) (Santos e outros, 2015)	1,360	REF (RAP A 140°C) (Teixeira e outros, 2017)	-1,600
92°	REF (RAP A 140°C) (Teixeira e outros, 2017)	1,334	20 RAP 50/70 (Correa, 2020)	-1,620
93°	S BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	1,331	SBS REF (Almeida Júnior, 2022)	-1,628
94°	S CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,313	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	-1,635
95°	50/70 - A (Possebon, 2021)	1,310	M2-PG64-SBS-19 (Schuster e outros, 2023)	-1,640
96°	RAP B 140°C (Teixeira e outros, 2017)	1,310	U1-DAER-FXA-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,640
97°	Neat RAP + 8% R (Almeida Júnior, 2022)	1,300	U10-DNIT-FXC-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,649
98°	S CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,269	S CON FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,674
99°	S CON FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,248	UFMSM 3 - 50/70 12,5 mm(a) (Santos e outros, 2015)	-1,680
100°	SBS RAP (Almeida Júnior, 2022)	1,200	M3-PG58-19 (Schuster e outros, 2023)	-1,688
101°	U7-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	1,196	U5-DNIT-FXB-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-1,728
102°	DERSA - FX III - 30/45 A (Nunes-Ramos, 2023)	1,179	M CON FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,795
103°	S BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,178	U14-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,835
104°	S BAI FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,175	S CON FX C 60/85 (Boeira e outros, 2018)	-1,857
105°	S BAI FX B 60/85 (Boeira e outros, 2018)	1,157	U13-DNIT-FXB-50/70 (Faccin e outros, 2018)	-1,870
106°	S BAI FX C 50/70 (Boeira e outros, 2018)	1,156	S BAI FX B HIMA (Boeira e outros, 2018)	-1,904
107°	U9-DNIT-FXC-TLAF (Faccin e outros, 2018)	1,111	M30 (Luzzi, 2019)	-1,940
108°	Neat RAP (Almeida Júnior, 2022)	1,100	S BAI FX B 50/70 (Boeira e outros, 2018)	-1,968
109°	RAP B 170°C (Teixeira e outros, 2017)	1,080	60/85E (Possebon, 2021)	-2,020
110°	RAP B 100°C (Teixeira e outros, 2017)	0,836	U7-DNIT-FXC-60/85 (Faccin e outros, 2018)	-2,720
111°	DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (Nunes-Ramos, 2023)	0,552	RAP B 140°C (Teixeira e outros, 2017)	-2,978

Fonte: Autora.

De forma geral, ambas as classificações parecem favorecer as misturas com ligantes modificados por polímero (SBS e HiMA) e por borracha. No entanto, apenas essa análise visual utilizando a escala de cores não permite conclusões mais precisas. Tendo em vista que o parâmetro  $\Delta$  se correlacionou melhor com os resultados das simulações, esse parece ser o ranqueamento mais adequado para as misturas do banco de dados. Como exemplos das diferenças encontradas pelas duas classificações, pode-se citar a mistura U5-DNIT-FXC-ECO (posição 25° pelo FFM e 101° pelo  $\Delta$ ), e a DERSA-FXIII-60/85A (posição 27° pelo FFM e 8° pelo  $\Delta$ ).

#### 5.2.2.2.2 Simulações no MeDiNa

Além das simulações no FlexPAVE<sup>TM</sup>, os resultados das simulações do MeDiNa também foram confrontados com parâmetros das misturas asfálticas. Dessa forma, buscou-se entender se existem características das misturas capazes de prever a evolução da área trincada prevista, as diferenças entre as condições estruturais e de tráfego propostas e ainda observar se os resultados seguem o mesmo padrão das simulações do FlexPAVE<sup>TM</sup>.

Pela Figura 94 foi possível verificar que as correlações com AT% encontradas foram baixas para o FFM do MeDiNa, que considera a área abaixo da curva de Nf vs. deformação de tração do ensaio de fadiga por compressão diametral, embora seja possível observar que os pontos com maior FFM são aqueles que também possuem menor área trincada na simulação. Para 5 cm de revestimento, as melhores tendências foram por meio de equações exponenciais. O ajuste foi mais assertivo para misturas com AMP, embora existam poucos dados desse tipo de mistura.

Para essa estrutura, com uma espessura de revestimento mais fina, mas também com o tráfego mais baixo entre as simulações, as misturas com ligantes convencionais se comportaram tão bem quanto misturas com asfalto modificado, e a maioria ficou abaixo dos 30% de área trincada limitados pelo MeDiNa. Quanto às misturas com asfaltos convencionais, destacaram-se 3 com comportamento insatisfatório: a mistura DERSA-FX III – 30/45 B, introduzida ao banco de dados pela autora, e as misturas UFSM 3 – 50/70 – 12,5 mm (a) e (b) de Santos (2015).

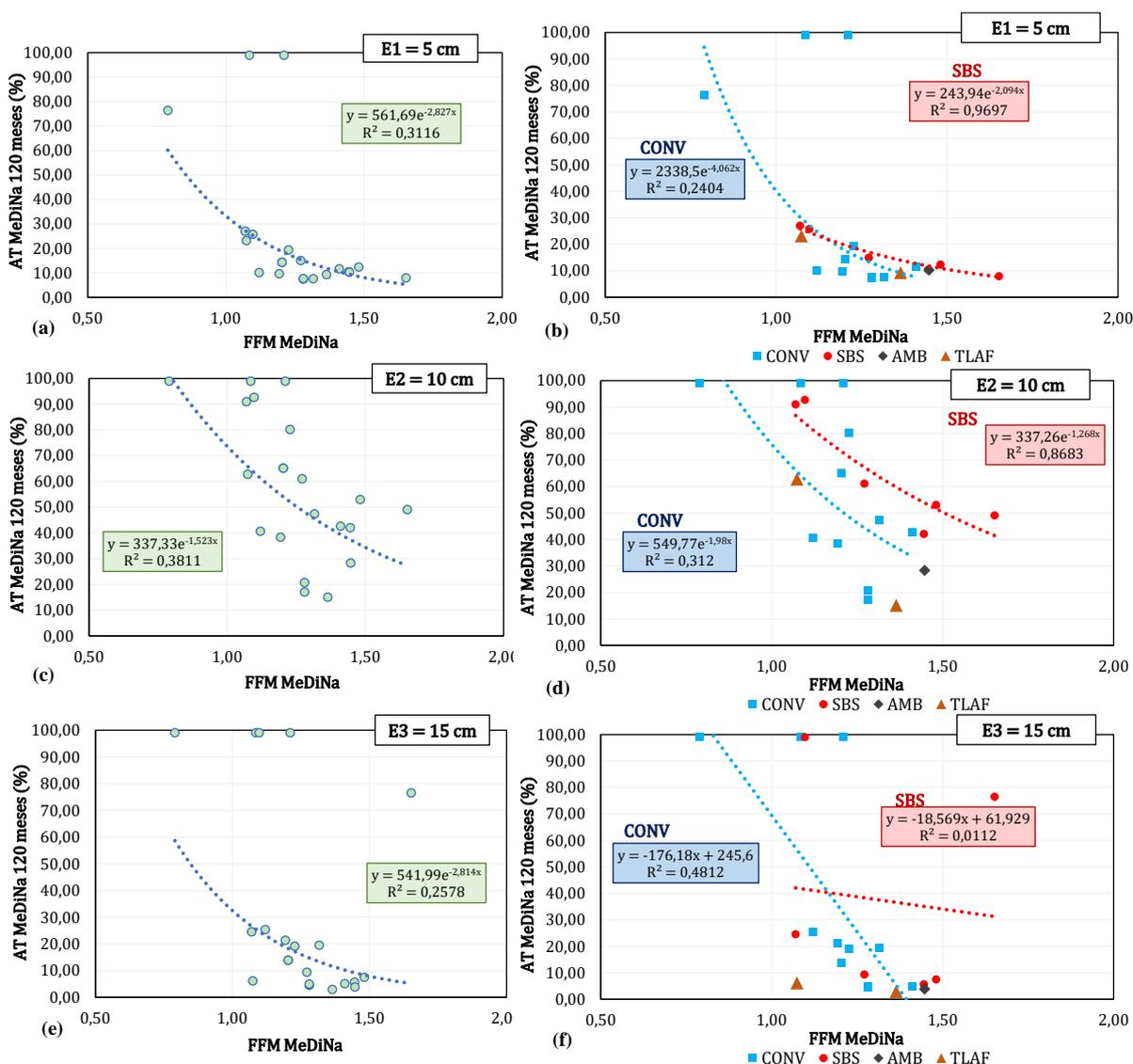
A mistura com CAP 30/45, com 76,43% de área trincada, é granulometricamente mais fina que a mistura das duas camadas do trecho UFSM 3, com um teor de ligante de 4,77%, MR de 8290 MPa e RT de 1,59 MPa. Já as camadas (a) e (b) da mistura UFSM 3 foram compostas com a faixa granulométrica B do DAER, com 5,39% e 5,85% de CAP, respectivamente, MR de 1898 MPa, e RT de 0,53 MPa. Essas últimas foram as misturas com pior desempenho em todas as simulações do MeDiNa.

Também para efeito de comparação, enquanto a mistura UFSM 3 (a), com FFM de 1,21, possui uma área trincada de 99% para a estrutura 1, a mistura “CONV” de Ilha (2022) possui FFM de 1,23, mas uma área trincada de 19,38% em 120 meses. No entanto, a mistura de Ilha tem um módulo de resiliência de 5408 MPa, bastante superior à mistura UFSM 3 (a). Além disso, a mistura com AMB de Bordin (2020) também possui um MR mais elevado, de

6386 MPa, e resultou em apenas 10,32% de AT. Nesse sentido, e também com base nos comentários anteriores, parece que estruturas com espessuras menores de revestimento e tráfegos médios, beneficiam-se de misturas mais rígidas.

Considerando as simulações com 10 cm de revestimento, foi possível observar que, ao contrário das simulações pelo FlexPAVE™, nenhuma mistura teve AT abaixo de 10%. As misturas que ficaram abaixo do limite de 30% foram a M6 de Bordin (2020) com AMB, M1 e M2 também de Bordin (2020), com CAP 50/70, e a TLAf de Ilha (2022).

Figura 94 - Correlação de FFM MeDiNa: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Nesse sentido, o MeDiNa parece estimar valores de AT maiores. De fato, as misturas M1 e M2 de Bordin geraram AT de 17,1% e 20,8% pelo MeDiNa, respectivamente, enquanto que pelo FlexPAVE™ os valores foram de 1,01% e 0,94%, respectivamente, pela função de transferência de Nascimento (2021). O mesmo ocorre para misturas com polímero. A título de exemplo, a mistura DERSA – FX III – 60/85B introduzida neste estudo, possui uma área trincada pelo MeDiNa de 49,11%, enquanto que pelo FlexPAVE™ essa estimativa foi de 31,29%. Apesar de as estimativas possuírem um erro atrelado, as diferenças encontradas foram significativas.

Observando a simulação com 15 cm de revestimento, a tendência de queda da área trincada com o aumento do FFM se mantém, embora as correspondências não sejam satisfatórias. Para essa simulação, no entanto, o mais interessante foi que, mesmo com um tráfego extremamente pesado, a maioria das misturas ficaram abaixo do limite de 30% de AT ao final de 120 meses, assim como na simulação com 5 cm de concreto asfáltico.

Nesse sentido, a adequação da espessura de revestimento ao tráfego imposto, parece ser um fator determinante para o bom desempenho à fadiga do pavimento pelo MeDiNa, negligenciando de certo modo os benefícios da modificação dos ligantes. No entanto, é válido considerar que apenas duas misturas com ligantes convencionais ficaram abaixo de 10% de AT para o tráfego extremamente pesado, mesmo com o FFM dentro do mesmo intervalo das misturas com modificadores de ligantes.

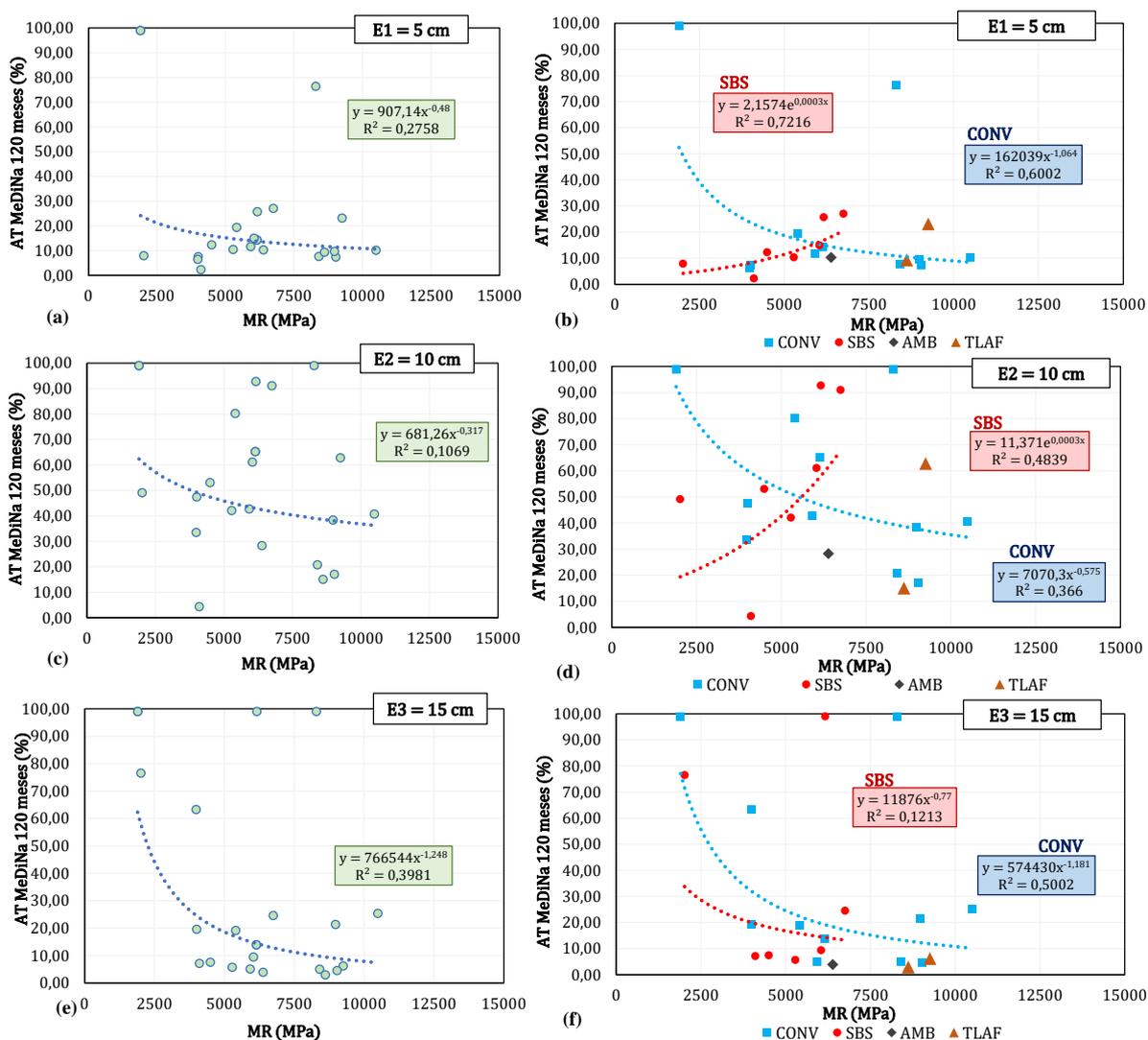
Para entender se realmente maiores valores de módulo de resiliência levariam a um melhor desempenho nas simulações, esse parâmetro está confrontado com a área trincada simulada na Figura 95. Grande parte das linhas de tendência ofereceram melhores ajustes para um modelo potencial, mas algumas estão apresentadas como um modelo exponencial devido à melhora significativa encontrada para esse formato em determinadas correlações.

Para a primeira estrutura (E1 com 5 cm de revestimento), houve baixa correlação geral, embora seja visualizada uma tendência de queda de AT com a maior rigidez das misturas. Separando-as por tipo de CAP, essas tendências ficam invertidas: misturas com CAP convencional beneficiam-se de rigidezes mais altas (correlação regular, com  $R^2 = 0,6002$ ), mas as com CAP polímero parecem seguir uma tendência contrária, com rigidezes maiores levando a uma área trincada estimada mais elevada (correlação boa, com  $R^2 = 0,7216$ ). Da mesma forma, a mistura mais rígida contendo CAP TLAFlex obteve maior área trincada prevista. Para um valor de 10% de área trincada, foi possível observar misturas com

AMP na faixa de 5000 MPa de MR, AMB em torno de 6400 MPa, e convencionais próximos a 10000 MPa de módulo de resiliência.

No caso da segunda estrutura, as tendências se mantêm, embora a correlação geral seja demasiadamente baixa, e as correlações por tipo de CAP sejam regulares (mas ainda bastante inferiores à primeira simulação). Para essa estrutura e para o tráfego pesado, os resultados parecem aleatórios, não sendo possível distinguir com clareza as diferenças entre misturas. Para 15 cm de revestimento, a correlação geral e por tipo de CAP segue agora a mesma tendência, com maiores rigidezes favorecendo o desempenho à fadiga, mesmo para misturas com AMP.

Figura 95 - Correlação de MR: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

Essa tendência parece mais clara para misturas com CAP convencional. As variações de rigidez encontradas para as misturas com AMP e CAP TLAFlex não promoveram mudanças significativas na área trincada prevista, uma vez que a maioria permaneceu estável abaixo de 10% em 120 meses. Para o MeDiNa, mesmo para um tráfego extremamente pesado, a maior espessura do revestimento parece ser mais relevante que a mudança na propriedade do material efetivamente, representado pelo MR nesse caso.

Assim como realizado em análises anteriores desta dissertação, buscou-se combinar os efeitos dos ensaios de MR e fadiga por compressão diametral para obter as correlações com área trincada prevista, por meio do produto  $MR*FFM$ . As melhores tendências encontradas pela Figura 96 foram sob modelos potenciais, com exceção das tendências lineares observadas para a estrutura E2.

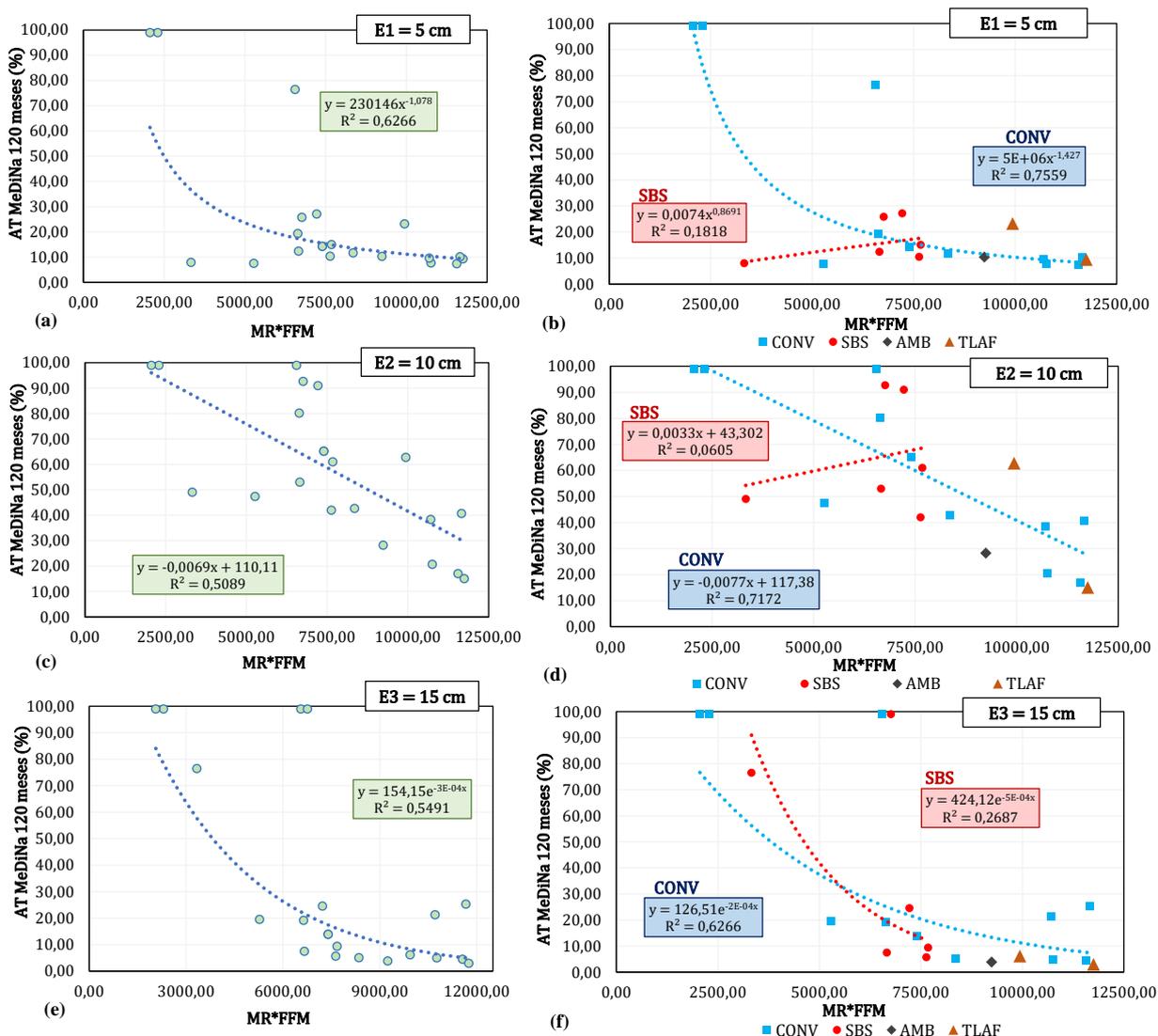
A combinação dos dois indicadores forneceu correlações gerais superiores quando comparadas às obtidas anteriormente. Os resultados indicam, em um primeiro momento, que, quanto maior o produto  $MR*FFM$ , menor é a área trincada estimada pelo MeDiNa. No entanto, ao observar as misturas separadas por tipos de ligantes, ficou evidente que essa combinação é efetiva apenas para misturas com ligantes convencionais, uma vez que misturas com AMP forneceram baixas correlações.

Novamente a estrutura intermediária promoveu resultados bastante aleatórios. Além disso, embora as misturas com AMP tenham mantido as mesmas tendências do MR (na maior parte dos casos a rigidez elevada é determinante para provocar maiores áreas trincadas), as misturas com CAP TLAFlex seguiram a tendência do FFM, com o maior produto  $MR*FFM$  levando a menores valores de AT. Isso pode indicar que para misturas com esse tipo de ligante os resultados do ensaio de fadiga são mais importantes para prever a tendência da área trincada estimada pelo MeDiNa.

### **5.2.3 Conclusões parciais da seção**

Novamente com o intuito de reunir em um mesmo espaço as principais contribuições da seção, estão elencados abaixo os principais tópicos discutidos. Além disso, será apresentado um resumo dos melhores indicadores identificados nas seções 5.1 e 5.2.

Figura 96 - Correlação de MR\*FFM: com AT% E1 (a) geral e (b) por tipo de CAP; com AT% E2 (c) geral e (d) por tipo de CAP; e com AT% E3 (2021) (e) geral e (f) por tipo de CAP



Fonte: Autora.

## Do ligante à mistura

### Deformação permanente:

- É possível observar um crescimento linear do FN com o aumento do ponto de amolecimento dos ligantes. Embora seja uma medida com forte base empírica, ainda assim reproduz de maneira simplista o fenômeno da deformação permanente;

- De forma geral, ligantes duros (10/20) e modificados por SBS ou TLA, atingem maiores valores de ponto de amolecimento e de FN. Ligantes modificados por borracha possuem ponto de amolecimento mais elevado que os ligantes convencionais, mas valores de FN na mesma faixa desses, confirmando a necessidade de caracterizações mais robustas;
- A viscosidade Brookfield a 135°C foi mais adequada que o ponto de amolecimento para inferir sobre a deformação permanente, embora a correlação ainda seja insatisfatória. De forma geral, há uma tendência de crescimento do FN com a viscosidade;
- Misturas com ligantes convencionais podem apresentar valores mais elevados de FN em relação aos demais ligantes sem modificação, e o esqueleto mineral pode justificar esse resultado;
- O PGH contínuo não é capaz de apontar uma tendência clara para a evolução do FN, mas a inclinação da tendência sinaliza que o FN cresce com o aumento desse índice;
- O parâmetro  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  também não foi eficaz na inferência sobre o FN, embora haja uma tendência de maiores valores de FN com o aumento da rigidez do ligante em alta temperatura;
- O ângulo de fase em alta temperatura ( $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ ) parece ser mais eficiente para inferir sobre a tendência do FN em misturas com asfalto modificado por SBS ou HiMA. Mesmo assim, verificou-se menores valores de  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  para esses CAPs, promovendo melhora na deformação permanente;
- A caracterização da deformação permanente em ligantes em um domínio de danificação foi mais adequada para inferir sobre o desempenho das misturas, embora não consiga realizar uma previsão precisa de forma isolada;
- Ligantes sem modificação possuem maiores valores de  $J_{nr_{3,2}}$  e fazem parte de misturas com menor FN, além de apresentarem tendências diferentes de evolução desse parâmetro;
- Misturas com FN abaixo de 600 ciclos possuem ponto de amolecimento menor que aproximadamente 60°C;
- Misturas com FN abaixo de 300 ciclos possuem viscosidade rotacional a 135°C menor que 511,56 cP;
- Misturas que suportam tráfegos extremamente pesados segundo a classificação de Faccin (2018) (FN > 2000 ciclos), possuem  $J_{nr_{3,2}}$  no PGH abaixo de 1,34 kPa<sup>-1</sup>, e misturas abaixo de 300 ciclos possuem  $J_{nr_{3,2}}$  no PGH superior a 1,56 kPa<sup>-1</sup>.

**Fadiga:**

- Maiores valores de  $\delta$  da modelagem 2s2p1d de ligantes parecem identificar misturas com maior FFM, embora a correlação seja fraca. Ligantes com SBS ou HiMA, possuem no geral valores superiores de  $\delta$ , e ligantes AMB possuem esse parâmetro superior aos asfaltos sem modificação;
- Em geral, maiores valores de ciclos até a falha no ensaio de LAS indicam misturas que terão maior FFM, mas essa tendência é fraca para misturas com CAP polímero;
- Maiores fatores de fadiga do ligante indicam misturas com melhor desempenho à fadiga pelo FFM S-VECD, e considerou-se mais adequado observar os ligantes sob a ótica do FFL do que apenas obtendo o ciclo de falha do ensaio de LAS;
- Considerando os grupos de FFM S-VECD propostos na seção anterior, foi possível inferir que ligantes com  $FFL_{19^{\circ}C} \text{ máxPSE}$  acima de 1,662 fazem parte de misturas com FFM acima de 1,874;
- Maiores valores de  $\phi_{65^{\circ}C:1Hz}$  parecem gerar misturas com menor FFM, embora essa relação possa não ser de causa e efeito;
- Misturas com polímero parecem ter alguma sensibilidade a altas temperaturas mesmo para o problema da fadiga, mas é necessária uma maior quantidade de dados para investigações futuras. Para esses ligantes, maior rigidez e menor ângulo de fase nessas temperaturas parecem ser desejáveis no enfrentamento da fadiga (maior valor de  $\beta$  da modelagem 2s2p1d);
- Maiores valores de “k” do 2s2p1d (atuante nas baixas temperaturas) promovem tendências de aumento no FFM MeDiNa das misturas. A presença de polímero no ligante fez com que menores incrementos de k (reduzindo  $|G^*|$  e aumentando  $\phi$ ), produzissem saltos maiores em FFM;
- O aumento da rigidez em temperaturas intermediárias parece reduzir o FFM MeDiNa, principalmente para ligantes com polímero;
- A fadiga (no ensaio por compressão diametral) das misturas com CAP polímero parece ser bastante sensível ao comportamento do ligante, enquanto que para as misturas com CAP convencional outras variáveis precisam ser consideradas na inferência do FFM MeDiNa;

- Ligantes com SBS ou HiMA que possuem maiores valores de FFL máxPSE produzem misturas melhores à fadiga pelo FFM MeDiNa.

## **Da mistura para a simulação de pavimentos**

### **Simulações no FlexPAVE™:**

- A maior parte das misturas com dano ou área trincada prevista nula ao final de 120 meses eram compostas por RAP ou ligantes modificados por polímero;
- Para estruturas mais robustas, mais misturas não tiveram dano ou área trincada, mesmo para um tráfego extremamente pesado, e a fadiga se mostrou intimamente ligada à composição estrutural do pavimento;
- O dano médio acumulado na camada asfáltica ao final de 10 anos diminuiu de forma aproximadamente linear com o aumento do FFM para misturas com AMP e AMB;
- Para a estrutura com 5 cm de revestimento e tráfego médio, misturas com ligantes convencionais obtiveram desempenho semelhante ao das misturas com CAP modificado;
- Para a estrutura com 10 cm de revestimento e tráfego pesado, a análise gráfica não forneceu distinções claras entre misturas com diferentes ligantes, mas a maioria dos CAPs com borracha estudados apresentam maiores valores de FFM e danos menores que 0,35 ao final de 10 anos;
- Misturas com AMB possuem valores maiores de FFM, mas não necessariamente apresentam o menor trincamento;
- Foram observadas diferenças entre as funções de transferência para área trincada: a versão de 2015 capta mais valores intermediários, e a versão atualizada fornece em sua maioria valores extremos (próximos a zero ou próximos a 100%);
- De forma geral, apenas o FFM da mistura parece não ser satisfatório para prever o dano e a área trincada nas 3 estruturas propostas, mas é promissor como um critério de seleção de materiais, e maiores valores de FFM S-VECD geram menores valores de N/Nf e AT%;
- O parâmetro  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs. Nf se mostrou um potencial indicador do desempenho à fadiga das misturas nas 3 estruturas simuladas, sendo que maiores valores de  $\Delta$  sugerem melhor desempenho;

- Apenas o tipo de ligante não prevê o desempenho à fadiga, e não devem ser negligenciados outros parâmetros de dosagem e resistência nas investigações futuras, como teor de ligante e resistência à tração por compressão diametral.

#### **Simulações no MeDiNa:**

- O FFM MeDiNa apresentou baixas correlações com a área trincada prevista nas 3 estruturas, embora exista uma tendência de queda de AT% com maiores valores de FFM;
- Para estrutura E1, com tráfego médio, as misturas com ligantes convencionais se comportaram tão bem quanto misturas com asfalto modificado, e a maioria ficou abaixo de 30% de área trincada;
- Estruturas com espessuras menores de revestimento e tráfegos médios, parecem se beneficiar de misturas mais rígidas;
- Para a mesma condição estrutural e de tráfego, o MeDiNa parece estimar valores de AT maiores que as previsões do FlexPAVE™;
- Para a estrutura E3, com tráfego extremamente pesado, a maioria das misturas ficaram abaixo do limite de 30% de AT ao final de 120 meses, e novamente a robustez da estrutura mostrou ter grande influência nessa previsão;
- A adequação da espessura de revestimento ao tráfego imposto, parece ser um fator determinante para o bom desempenho à fadiga do pavimento pelo MeDiNa, negligenciando de certo modo os benefícios da modificação dos ligantes;
- Para as estruturas E1 e E2, misturas com CAP convencional parecem se beneficiar de rigidezes mais altas, mas as com CAP polímero seguiram uma tendência contrária;
- Na estrutura E3, as correlações de AT% com MR foram muito baixas, mas maiores rigidez para todos os ligantes parecem aumentar a área trincada prevista;
- O produto  $MR \cdot FFM$  parece ser um bom indicador da AT prevista para ligantes convencionais, sendo que quanto maior esse valor, menor é a área trincada;
- Para misturas com CAP TLAFlex, os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral parecem ser mais importantes que o MR para prever a tendência da área trincada estimada pelo MeDiNa.

A Tabela 59 traz o resumo dos melhores indicadores identificados nas seções 5.1 e 5.2, elencando suas vantagens e desvantagens, e pesquisas encontradas na literatura que se dedicaram ao estudo desses índices. As vantagens e desvantagens foram abordadas com base

nos critérios do relatório nº 982 do *National Cooperative Highway Research Program* (CHRISTENSEN; TRAN, 2021), o qual classifica os métodos de ensaio de fadiga em ligantes asfálticos de acordo com critérios de custo do equipamento, tempo requerido para o ensaio, correlação com ensaios de desempenho ou com o desempenho do pavimento em campo, solidez técnica e facilidade de execução.

Nesse sentido, é evidente que a maioria dos ensaios com menos solidez técnica e/ou correlação com o desempenho de pavimentos são aqueles em que o método de teste é empírico, sem medir efetivamente uma propriedade fundamental do material. Esse é o caso, por exemplo, do ponto de amolecimento dos ligantes, que é uma medida bastante simplificada e que deve estar limitada a inferências em relação à deformação permanente (GOMES; SOARES; BASTOS, 2022).

A maior vantagem desses ensaios diz respeito ao custo ser reduzido, daí serem utilizados em larga escala pelas especificações brasileiras. No entanto, conforme evidenciado nesta pesquisa, existem poucos indicadores empíricos capazes de prever o desempenho de materiais asfálticos, especialmente quando se busca uma metodologia de seleção de materiais mais robusta.

Sendo assim, para ligantes asfálticos se recomenda a utilização de ensaios sob cisalhamento dinâmico, especialmente aqueles que são executados em um domínio de danificação do material. Mesmo que esses testes necessitem de um equipamento de custo elevado (nesse caso, o reômetro de cisalhamento dinâmico), o tempo requerido para a caracterização é reduzido, especialmente em ensaios de danificação, e é necessária apenas uma pequena quantidade de amostra. Além dos benefícios em termos laboratoriais, as propriedades obtidas promovem uma previsão de comportamento mais assertiva, o que permite que a seleção do ligante asfáltico se torne precisa e econômica no longo prazo (DOMINGOS; FAXINA; BERNUCCI, 2017; MOGAWER et al., 2018).

Para a deformação permanente em misturas, a reologia desses materiais, bem como as propriedades dos ligantes foram consideradas propriedades mais adequadas para descrever esse defeito, visto que os agregados do banco de dados são de boa qualidade, fazendo com que pequenas variações nas suas propriedades ou no arranjo granulométrico, não provoquem mudanças significativas na deformação permanente. Apesar disso, o índice de forma pode ser controlado para garantir agregados mais cúbicos e entrosados na estrutura granular (SCHUSTER et al., 2021).

Tabela 59 - Vantagens e desvantagens dos indicadores de ligantes e misturas asfálticas

Índice	Vantagens	Desvantagens	Referências
<b>Deformação permanente em ligantes asfálticos</b>			
Ponto de Amolecimento	Baixo custo; execução rápida e relativamente simples.	Ensaio empírico e com fraca solidez técnica; correlação insatisfatória com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Domingos, Faxina e Bernucci (2017); Gomes, Soares e Bastos (2021)
Viscosidade Brookfield 135°C	Custo relativamente baixo; execução rápida e simples; mede uma propriedade fundamental do material.	Ensaio empírico; correlação insatisfatória com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Gomes, Soares e Bastos (2021); Ferreira et al. (2020)
Jnr3,2 (MSCR)	Execução rápida e simples; maior solidez técnica; mede uma propriedade de danificação; melhor correlação com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Custo elevado do equipamento.	Domingos, Faxina e Bernucci (2017); Possebon (2021); Almeida Jr. (2022)
PG contínuo	Execução simples e relativamente rápida; maior solidez técnica.	Custo elevado do equipamento; não mede uma propriedade de danificação; baixa correlação com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Almeida Jr. (2022); Mogawer et al. (2018)
G*  e $\phi$ 65°C:1Hz	Execução simples e rápida; maior solidez técnica.	Custo elevado do equipamento; não medem propriedades de danificação; correlação insatisfatória com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Almeida Jr. (2022); Pires (2020); Schuster (2023)
<b>Fadiga permanente em ligantes asfálticos</b>			
FFL 35% G* sen $\phi$	Execução simples e rápida; maior solidez técnica, mede uma propriedade de danificação; melhor correlação com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Custo elevado do equipamento.	Hintz et al. (2011); Almeida Jr. (2022); Nascimento (2023) Schuster (2023)
FFL máxPSE	Execução simples e rápida; maior solidez técnica, mede uma propriedade de danificação; melhor correlação com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Custo elevado do equipamento.	Wang et al., (2015); Possebon (2021); Almeida Jr. (2022); Nascimento (2023) Schuster (2023)
$\delta$ 2S2PID	Execução simples e rápida; relativamente boa solidez técnica.	Custo elevado do equipamento, não mede uma propriedade de danificação; correlação insatisfatória com ensaios de desempenho em misturas e de pavimentos.	Schuster (2023); Quintero et al. (2016)
<b>Deformação permanente em misturas asfálticas</b>			
Flow Number	Execução simples e relativamente rápida; boa solidez técnica; melhor correlação com o desempenho de pavimentos.	Custo elevado do equipamento; baixa correlação com o desempenho de pavimentos para misturas com AMB.	Faccin (2018); Pires (2020)
E* 54°C:1Hz	Execução simples e relativamente rápida; boa solidez técnica; correlação regular com ensaios de desempenho em misturas.	Custo elevado do equipamento; não mede uma propriedade de danificação; menor correlação com o desempenho de pavimentos.	Pires (2020), Schuster (2023)
E* sen $\phi$ 54°C:1Hz	Execução simples e relativamente rápida; boa solidez técnica; correlação regular com ensaios de desempenho em misturas.	Custo elevado do equipamento; não mede uma propriedade de danificação; menor correlação com o desempenho de pavimentos.	Faccin (2018); Pires (2020)
g sigmoidal	Execução simples e relativamente rápida; relativamente boa solidez técnica; correlação regular com ensaios de desempenho em misturas.	Custo elevado do equipamento; não mede uma propriedade de danificação; poucas investigações sobre a correlação com o desempenho de pavimentos.	-
Índice de forma #3/4	Execução simples; baixo custo; relativamente boa solidez técnica.	Execução demorada; baixa capacidade de prever individualmente o desempenho de misturas e pavimentos.	Schuster et al. (2021)
<b>Fadiga em misturas asfálticas</b>			
FFM S-VECD	Ótima solidez técnica, correlação regular com o desempenho de pavimentos.	Execução difícil e demorada; alto custo do equipamento.	Nascimento (2015); Boeira (2018); Schuster (2018); Possebon (2021)
E* 21°C:1Hz	Execução simples e relativamente rápida; boa solidez técnica.	Custo elevado do equipamento; não mede uma propriedade de danificação; baixa correlação com o desempenho de pavimentos.	Schuster (2018)
$\Delta$ (G <sup>R</sup> vs. Nf)	Ótima solidez técnica, boa correlação com o desempenho de pavimentos.	Execução difícil e demorada; alto custo do equipamento.	Santos (2020)
FFM MeDiNa	Execução simples, boa solidez técnica.	Execução demorada; alto custo do equipamento; baixa correlação com o desempenho de pavimentos.	Fritzen et al. (2019)
MR	Execução simples e rápida	Alto custo do equipamento; não capta a viscoelasticidade das misturas; baixa correlação com o desempenho de pavimentos.	Motta (1991); Medina (1997); Boeira (20218)
MR*FFM MeDiNa	Execução simples, boa solidez técnica, melhor correlação com o desempenho de pavimentos	Execução demorada; alto custo do equipamento.	-

Fonte: Autora.

Além disso, apesar de as propriedades no domínio viscoelástico linear das misturas possuírem boa solidez técnica, visto que seus sentidos físicos estão alinhados com o defeito que se quer analisar (como a rigidez e o ângulo de fase em temperaturas altas ou intermediárias), muitas vezes pouco se correlacionam com as propriedades de danificação ou mesmo com o desempenho em campo (FRITZEN et al., 2019; MEDINA, 1997; MOTTA, 1991). Assim, para a deformação permanente, o ensaio de *Flow Number* é um indicador já bastante consolidado na literatura, e a fadiga pode ser avaliada por diferentes metodologias, apesar do ensaio à tração direta ser mais robusto que no ensaio por compressão diametral (além de ser mais difícil de ser executado e analisado). As associações entre rigidez e dano por fadiga também parecem razoáveis, conforme já reportado em outras pesquisas.

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO GERAL DE MATERIAIS

Com base nas investigações realizadas até este ponto da dissertação, foi possível perceber que as propriedades dos materiais asfálticos apresentam tendências distintas quanto à deformação permanente e quanto à fadiga. Nesse sentido, alguns estudos atualmente procuram visualizar conjuntamente esses dois mecanismos.

Dessa forma, é possível entender quais os materiais devem ser evitados, ou apenas limitados a rodovias com baixo volume de tráfego; encontrar os materiais que desempenham de maneira adequada quanto aos dois defeitos; e ainda selecionar os materiais de acordo com o mecanismo de ruptura que atuará de forma mais acentuada na rodovia, possibilitando a economia de recursos.

Dessa forma, em rodovias com temperatura do ar elevada, e/ou tráfego lento e canalizado, pode ser interessante atentar-se para materiais mais resistentes à deformação permanente. Por outro lado, sob temperaturas amenas e/ou tráfego mais rápido, pode-se direcionar os esforços para um material mais resistente à fadiga. Assim, essa visualização conjunta está descrita nos tópicos seguintes, discretizados entre ligantes e misturas asfálticas.

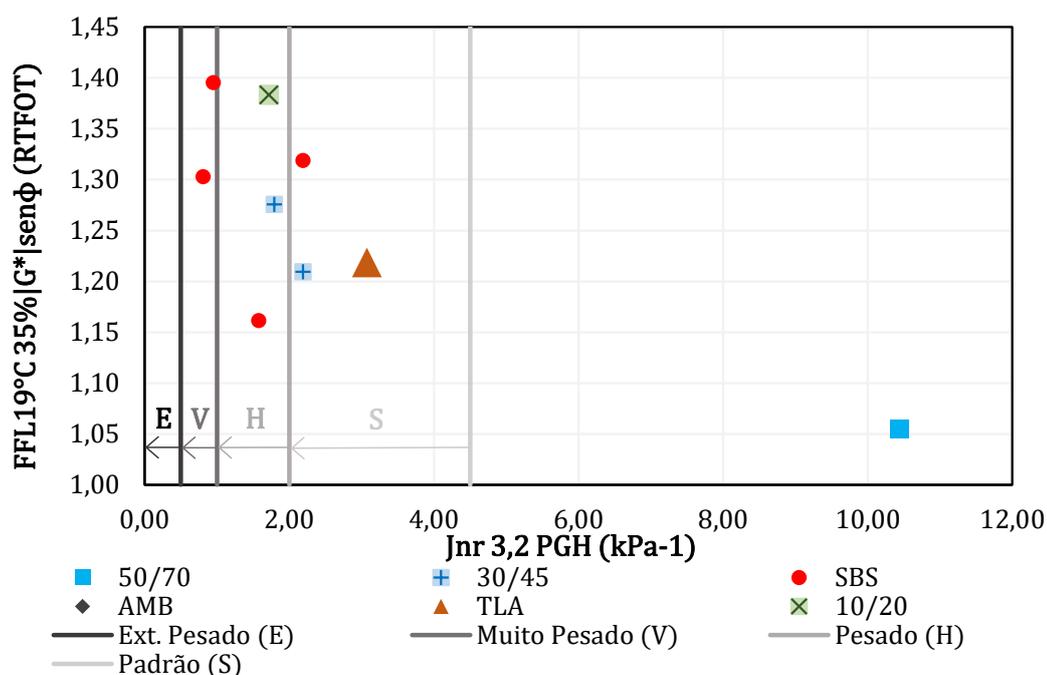
#### 5.3.1 Ligantes asfálticos

Considerando os ligantes asfálticos desta pesquisa e com base nas investigações anteriores, os dois parâmetros escolhidos para a classificação geral dos ligantes foram o fator

de fadiga do ligante ( $FFL_{19^{\circ}C}$ ) e a compliância não recuperável ( $Jnr$ ). O  $FFL_{19^{\circ}C}$  é um indicador que se mostrou bastante promissor na análise de fadiga para os ligantes, e vem sendo estudado por diversos autores no meio acadêmico, conforme citado anteriormente. Por outro lado, o  $Jnr$  já é o índice da especificação Superpave que classifica os ligantes segundo o tráfego no ensaio de MSCR, e também parece promissor para separar os ligantes quanto à deformação permanente. Vale destacar, ainda, que ambos provêm de ensaios de danificação em ligantes, e parece razoável utilizá-los nesse momento.

Nesse sentido optou-se inicialmente por observar os índices baseados nas normas mais atuais, ou seja,  $FFL_{19^{\circ}C}$  foi calculado para o critério da perda de 35% de  $|G^*|_{sen\phi}$ , e o  $Jnr$  está obtido na temperatura do PGH dos ligantes (Figura 97). As linhas limítrofes dos valores de  $Jnr$  correspondem, portanto, aos níveis de tráfego trazidos pela norma AASHTO M 332 (2022). Uma vez que não há limites estabelecidos para  $FFL_{19^{\circ}C}$  no critério considerado, foi feita uma tentativa de classificação considerando o erro padrão das medidas e um nível de confiança atribuído, mas a falta de dados suficientes fez com que os intervalos entre classes ficassem muito pequenos.

Figura 97 -  $FFL_{19^{\circ}C} 35\%|G^*|_{sen\phi}$  (RTFOT) vs.  $Jnr_{3,2}$  PGH



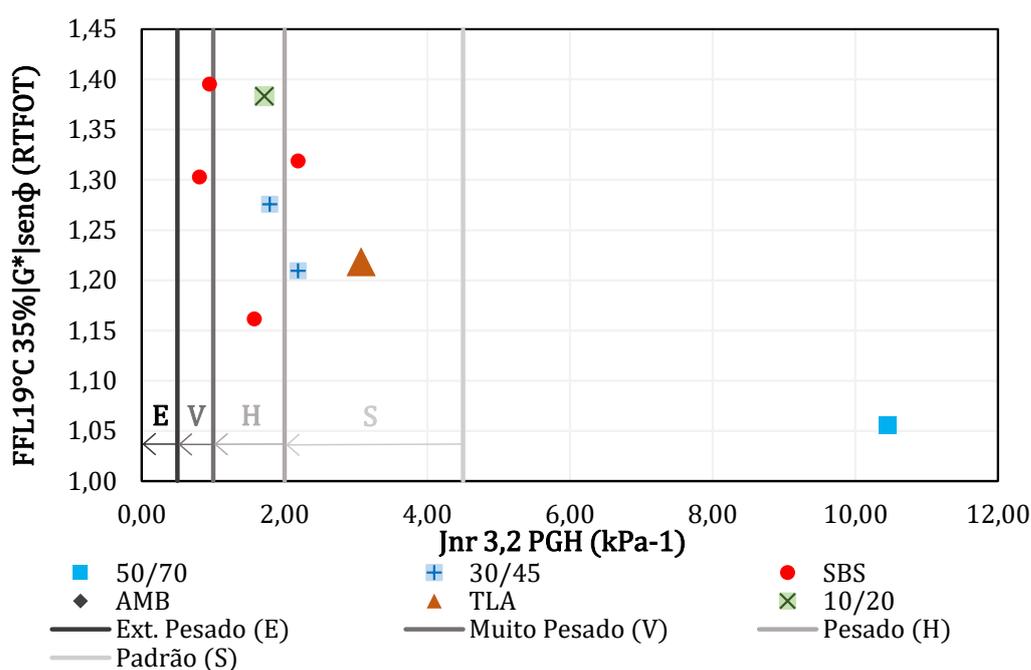
Fonte: Autora.

Considerando, assim, esses dois indicadores, os melhores materiais serão aqueles que possuam menores valores de  $J_{nr}$  e maiores valores de  $FFL_{19^{\circ}C}$ , ou seja, no canto superior esquerdo do gráfico. Por essa análise, foi encontrado apenas 1 ligante com comportamento indesejável para os dois defeitos, que é o CAP 50/70 PA 85. Este ligante, apesar de ser um CAP convencional, ajustado para elevar o seu ponto de amolecimento até  $85^{\circ}C$ , não obteve bom desempenho nem à deformação permanente, nem à fadiga.

Na faixa de tráfego pesado para o  $J_{nr}$  estão 1 CAP TLA, 1 CAP 30/45 e 1 AMP. Os CAPs mais rígidos (30/45 e TLA), mostraram-se inferiores à fadiga comparados ao CAP com polímero. Embora haja uma exceção (CAP 60/85A desta pesquisa, todos os ligantes com SBS possuem maiores valores de  $FFL_{19^{\circ}C}$ , sendo que apenas dois desses materiais ficaram na classe de tráfego muito pesado para o  $J_{nr}$ . Destaca-se também o bom desempenho do CAP 10/20 quanto aos dois defeitos.

Uma vez que o critério de falha por fadiga mais estudado pelos autores do grupo é o critério da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE), esses valores foram confrontados novamente com o  $J_{nr}$  no PGH dos ligantes (Figura 98). Além disso, os limites apresentados em Possebon (2021) estão dividindo os ligantes quanto à fadiga pelas linhas tracejadas.

Figura 98 -  $FFL_{19^{\circ}C}$  máxPSE (RTFOT) vs.  $J_{nr,3,2}$  PGH



Fonte: Autora.

Assim, foi possível observar que o CAP 50/70 PA 85 realmente pertence ao quadrante com desempenho inferior aos dois defeitos. Por outro lado, apenas o CAP HiMA de Vestena (2021) e Ilha (2022) ficou na classe com desempenho excelente. A classe de tráfego pesado para deformação permanente e mediano para a fadiga, conta em sua maioria com ligantes sem modificação, com exceção do CAP TLA introduzido nesta pesquisa e o ligante da mistura M7-PG64-SBS-12,5 de Schuster (2023).

Outro ligante que merece destaque é o CAP 60/85B estudado pela autora, com bom desempenho aos dois defeitos. Esse ligante possui um PGH de 76°C. Ainda, vale salientar que o AMB estudado por Possebon (2021), apesar de mediano para a fadiga, apresentou baixo desempenho à deformação permanente, sendo um ligante com PGH de 70°C, o que parece ser um resultado atípico.

Considerando que muitos autores do grupo optam por realizar o ensaio de MSCR a 64°C para permitir a comparação entre os diferentes ligantes, mais dados estão disponíveis para o Jnr nessa temperatura. Dessa forma, a Figura 99 mostra essas informações plotadas no mesmo gráfico que o  $FFL_{19^{\circ}C}$  calculado pelo critério  $35\%|G^*|\text{sen}\phi$ . Os limites para o Jnr são os mesmos descritos anteriormente, e foram inseridos na figura justamente para permitir uma distinção mais clara entre os ligantes.

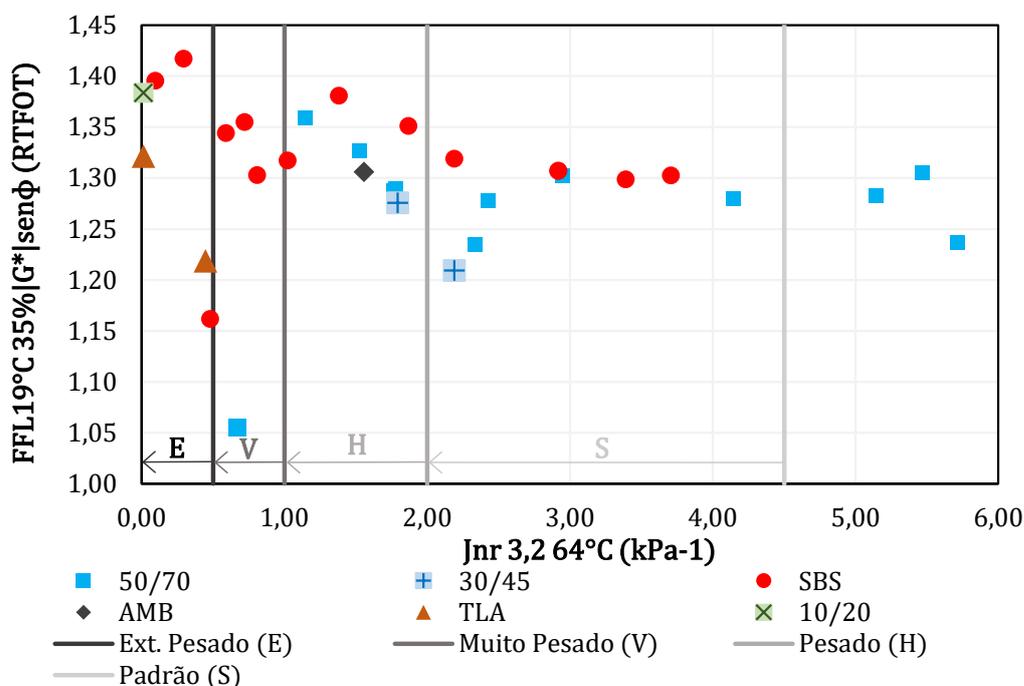
Por meio da figura, é possível perceber que a maioria dos ligantes com polímero situam-se na parte superior do gráfico, ou seja, apresentam melhor desempenho à fadiga com relação aos demais, com exceção do CAP 60/85A introduzido ao banco de dados pela autora. No entanto, há uma variabilidade considerável nesses ligantes quanto ao Jnr, embora nenhum fique acima de  $4,5 \text{ kPa}^{-1}$  a 64°C. Com exceção do CAP 60/85B desta pesquisa com PGH 76, seis desses ligantes possuem PGH 70 e cinco possuem PGH 64. Sendo assim, é possível concluir que o PGH não discretiza tão precisamente os ligantes asfálticos, para fins de seleção de material.

Embora fique evidente que os ligantes modificados superam os ligantes convencionais, é importante destacar que o CAP 50/70 PA 85, embora com desempenho baixo quando ensaiado no seu PGH, possui excelente comportamento à deformação permanente a 64°C, justamente por seu PGH ser bastante superior (82°C). Assim, uma vez que também não teve bom desempenho à fadiga, esse tipo de ligante modificado pela

indústria precisa ser utilizado com cautela, e estaria limitado a vias com temperaturas abaixo do seu PGH e onde a fadiga não seria tão expressiva.

Por outro lado, é possível verificar que os ligantes convencionais localizados à direita do gráfico ficam em média no mesmo patamar de FFL dos ligantes modificados, mas apresentam  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$  mais elevado. Assim, para rodovia com clima ameno e sem tráfego lento, esses ligantes poderiam ser utilizados em detrimento de CAPs modificados, visando a economia de recursos. Esses ligantes referem-se aos da pesquisa de Schuster (2023), das misturas M1, M3 e M6, com PGH 58.

Figura 99 -  $FFL_{19^{\circ}C} 35\% |G^*|_{sen\phi}$  (RTFOT) vs.  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$



Fonte: Autora.

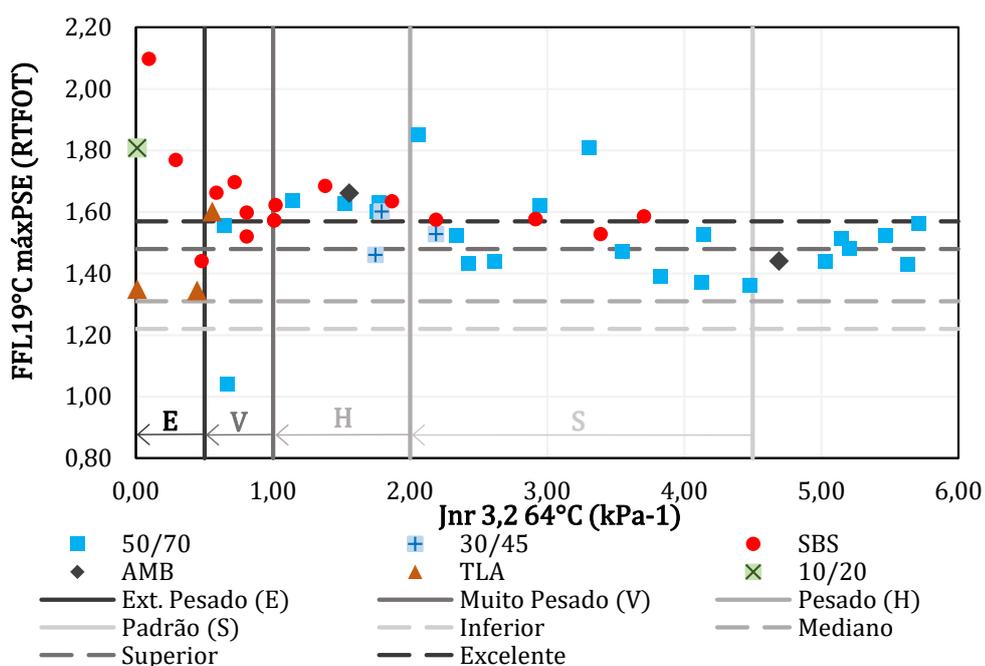
Considerando, por fim, os parâmetros com maior quantidade de dados, a Figura 100 traz os resultados de  $FFL_{19^{\circ}C} máxPSE$  vs.  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$ . Por meio dessa, verifica-se que os ligantes com polímero SBS são os mais eficazes no enfrentamento conjunto da deformação permanente e da fadiga, mas que apenas o tipo de ligante não é suficiente para escolher o material para o projeto do CBUQ. Da mesma forma, embora a maioria dos ligantes convencionais possuam maiores valores de  $Jnr$  e valores intermediários de FFL, existem

exceções, que podem ser estudadas por meio desses ensaios e serem utilizados no lugar de ligantes modificados, possivelmente tornando-se uma opção mais barata.

Destaca-se, ainda, que os ligantes com TLA, devido a sua elevada rigidez, são excelentes para a deformação permanente, mas nem sempre pertencem a classes superiores de fadiga. Nesse sentido, possivelmente esses ligantes são mais adequados para rodovias com temperatura do ar elevada e/ou tráfegos muito pesados e lentos. Novamente o CAP 10/20 forneceu resultados muito satisfatórios, mas deve ser salientado que só há 1 ligante desse tipo no banco de dados, e sua utilização em obras rodoviárias requer estudos mais detalhados.

A partir dessas análises, ficou evidente que a consideração conjunta dos defeitos na escolha dos ligantes é de fato a maneira mais assertiva de iniciar um projeto de mistura asfáltica. Assim como nas seções anteriores, ficou claro que os ligantes asfálticos desempenham papel fundamental no desempenho das misturas, especialmente na deformação permanente. Dentro do banco de dados do grupo foi possível identificar ligantes das mais variadas classes, evidenciando que a indústria é vasta e a caracterização reológica é necessária para a assertividade dos projetos e economia de custos.

Figura 100 -  $F_{FL19^{\circ}C} máxPSE (RTFOT)$  vs.  $J_{nr3,2} 64^{\circ}C$



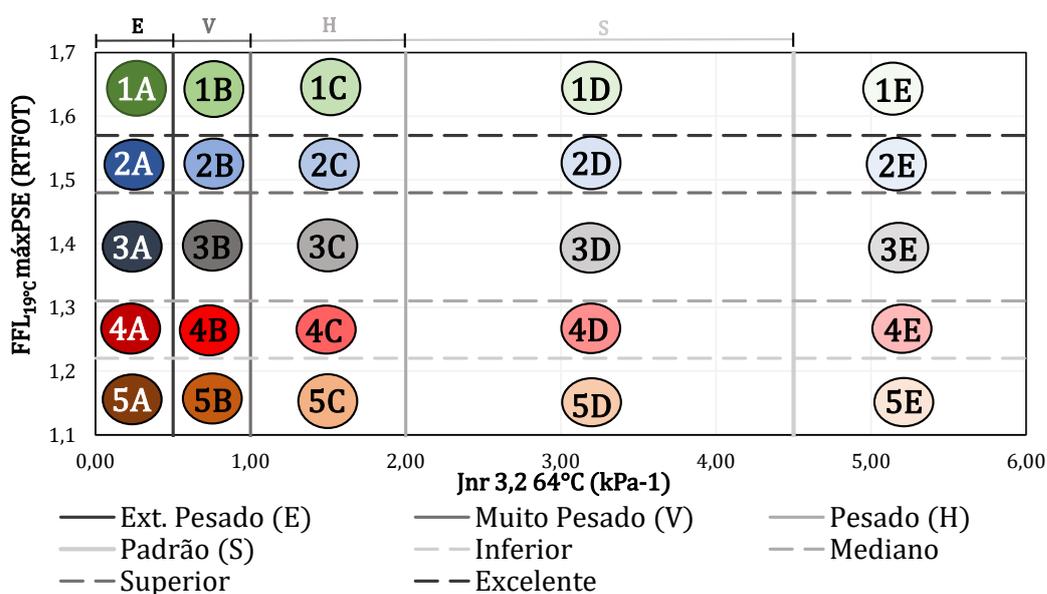
Fonte: Autora.

O estudo realizado ao longo desta dissertação salientou que a seleção adequada de ligantes asfálticos de acordo com critérios de projeto estabelecidos, auxiliam a garantir que a mistura final terá um desempenho adequado. Nesse sentido, a Figura 101 ilustra o ábaco proposto como recomendação inicial na seleção dos ligantes asfálticos, considerando deformação permanente e fadiga de maneira conjunta.

Para a definição dessas classes, foram utilizados os parâmetros  $FFL_{19^{\circ}C} \text{ máxPSE}$  e  $Jnr_{3,2} 64^{\circ}C$ . O FFL nesse critério foi adotado por ser um indicador amplamente estudado e defendido no meio acadêmico atualmente, além de já possuir classes definidas em estudos anteriores. Além disso, como discutido na seção 5.1.2, é um critério mais fundamentalista e que permite a separação mais precisa de ligantes modificados e não modificados, e foi adotado pela norma brasileira para o ensaio de LAS (DNIT 439/2022 - ME).

O  $Jnr$ , por outro lado, foi adotado na temperatura de  $64^{\circ}C$  pois essa é apenas uma indicação inicial para seleção de materiais, e não uma garantia exata de desempenho, e é a temperatura de PGH necessária para a maior parte do país (FACCIN et al., 2021). Além disso, ligantes comparados em uma temperatura, seguirão a mesma ordem de classificação quando caracterizados em uma segunda temperatura, ou seja, um CAP de melhor desempenho a  $64^{\circ}C$  seguirá sendo o de melhor desempenho a  $70^{\circ}C$ , por exemplo. Os limites de  $Jnr$  seguiram a recomendação da norma AASHTO M 332 (2022).

Figura 101 - Classes de ligantes asfálticos considerando deformação permanente e fadiga



Fonte: Autora.

A nomenclatura adotada seguiu a sequência numérica para o FFL e alfabética para o Jnr. Assim, as classes de fadiga variam de 1 a 5, sendo 1 a melhor classe (maior FFL) e as classes de deformação permanente variam de A até E, sendo A a melhor classe (menor Jnr). A combinação dessas classificações permite entender simultaneamente, de maneira prévia, qual será o comportamento do ligante frente aos dois defeitos. Assim, um ligante da classe 1A é o melhor para a fadiga e para deformação permanente, e um ligante da classe 5E é o pior ligante frente aos dois defeitos.

Dessa forma, com base nas premissas de projeto e nas condições onde será implantada a rodovia, pode ser escolhido um ligante adequado e que seja uma solução mais econômica. Por exemplo, para rodovias onde a fadiga é o defeito de maior probabilidade de ocorrência (temperaturas intermediárias e tráfego rápido), poderia ser selecionado um ligante da classe 1D. Por outro lado, em rodovias onde a deformação permanente é o principal defeito, poderia ser utilizado um ligante 5A. A escolha, evidentemente, deverá partir de estudos de viabilidade econômica. Por fim, a Tabela 60 ilustra os limites para cada classe e a nomenclatura final.

É válido salientar que a norma AASHTO M 332 (2022) menciona um valor de Jnr máximo de  $4,5 \text{ kPa}^{-1}$ . No entanto, ligantes com PGH 58 podem apresentar um valor superior quando caracterizados a  $64^\circ\text{C}$ . Nesses casos, para rodovias com PGH necessário mais baixo, recomenda-se que esse ligante seja caracterizado no seu PGH, antes de descartar o seu uso.

### 5.3.2 Misturas asfálticas

A classificação geral das misturas irá considerar a deformação permanente pelo parâmetro *Flow Number* e a fadiga será abordada pelas simulações de pavimentos. Este tópico ainda será dividido entre as simulações no FlexPAVE<sup>TM</sup> e no MeDiNa, para facilitar o entendimento do leitor.

#### 5.3.2.1 *Flow Number* vs. propriedades de fadiga pelo FlexPAVE<sup>TM</sup>

Seguindo o mesmo propósito de classificação geral dos ligantes asfálticos, as misturas serão observadas conjuntamente quanto à deformação permanente e fadiga. A área trincada estimada será sempre trazida no eixo y dos gráficos, para as duas funções de transferência de

Nascimento (2015 e 2021). O limite de 30% delimitado nas figuras se refere ao máximo admitido pelo método de dimensionamento brasileiro, e o limite de 10% foi adicionado como forma de isolar as misturas com comportamento superior à fadiga.

Tabela 60 - Limites para cada classe de ligante e nomenclatura final

Classes individuais		Limites da classe		Classe final
Fadiga	Deformação permanente	FFL <sub>19°C</sub> máxPSE	Jnr <sub>3,2</sub> 64°C	
1	A	> 1,57 Excelente	≤ 0,5 Extremamente Pesado	1A
	B		> 0,5 e ≤ 1,0 Muito Pesado	1B
	C		> 1,0 e ≤ 2,0 Pesado	1C
	D		> 2,0 e ≤ 4,5 Padrão	1D
	E		> 4,5 Não recomendado	1E
2	A	> 1,48 e ≤ 1,57 Superior	≤ 0,5 Extremamente Pesado	2A
	B		> 0,5 e ≤ 1,0 Muito Pesado	2B
	C		> 1,0 e ≤ 2,0 Pesado	2C
	D		> 2,0 e ≤ 4,5 Padrão	2D
	E		> 4,5 Não recomendado	2E
3	A	> 1,31 e ≤ 1,48 Mediano	≤ 0,5 Extremamente Pesado	3A
	B		> 0,5 e ≤ 1,0 Muito Pesado	3B
	C		> 1,0 e ≤ 2,0 Pesado	3C
	D		> 2,0 e ≤ 4,5 Padrão	3D
	E		> 4,5 Não recomendado	3E
4	A	> 1,22 e ≤ 1,31 Inferior	≤ 0,5 Extremamente Pesado	4A
	B		> 0,5 e ≤ 1,0 Muito Pesado	4B
	C		> 1,0 e ≤ 2,0 Pesado	4C
	D		> 2,0 e ≤ 4,5 Padrão	4D
	E		> 4,5 Não recomendado	4E
5	A	< 1,22 Pobre	≤ 0,5 Extremamente Pesado	5A
	B		> 0,5 e ≤ 1,0 Muito Pesado	5B
	C		> 1,0 e ≤ 2,0 Pesado	5C
	D		> 2,0 e ≤ 4,5 Padrão	5D
	E		> 4,5 Não recomendado	5E

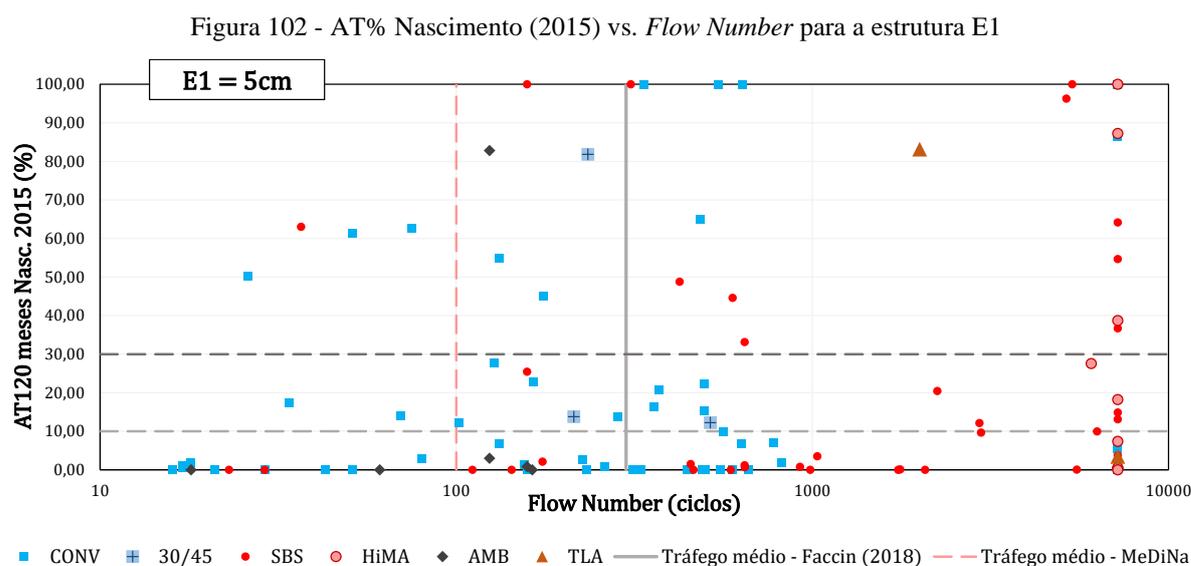
Fonte: Autora.

Vale ressaltar que limites para FN foram demarcados seguindo as recomendações de Faccin (2018). No entanto, uma vez que os gráficos de classificação geral estão divididos

entre 3 cenários de simulação de fadiga, com tráfego médio, pesado e extremamente ou muito pesado, o FN foi demarcado em cada um apenas para a condição de tráfego correspondente. Além dessas demarcações, estão apontados nas linhas tracejadas verticais os limites de FN do MeDiNa, divididos também em tráfego médio, pesado e extremamente pesado, com nomenclaturas adotadas com base nas repetições de eixo-padrão recomendadas pelo manual do programa, mas seguindo o padrão adotado nesta dissertação e na pesquisa de Faccin.

A Figura 102 mostra o cruzamento dos dados de AT% Nasc. (2015) e FN. Nesse sentido, as melhores misturas deverão estar situadas no canto inferior direito do gráfico, com maiores valores de FN e menores valores de AT. Nessa região, ficaram situadas as misturas com ligante SBS ou HiMA, com exceção de algumas misturas com CAP 50/70, mas que eram compostas por adição de RAP.

Essas misturas suportariam um tráfego extremamente pesado se a deformação permanente estivesse sendo tratada separadamente, considerando como limite para essa classe um FN de 2000 ciclos. No entanto, para efeitos de classificação geral, é possível perceber que existem diversas misturas com ligante convencional que atenderiam um projeto com tráfego médio de maneira bastante satisfatória, visto que possuem FN superior à 300 ciclos e área trincada prevista em 10 anos abaixo de 10%. Assim, para esse tipo de rodovia, é provável que a solução mais econômica seja a utilização de CAPs convencionais.



Fonte: Autora.

No outro extremo, estão as misturas com baixo FN e AT superiores a 30% ao final de 10 anos. Essas misturas, são em sua maioria, compostas por CAP convencional (50/70 ou 30/45). Como exceções, encontram-se 3 misturas com CAP modificado: U5-DNIT-FXB-60/85 de Faccin (2018), 60/85E de Possebon (2021) e ECOFLEX B 3-G de Oliveira (2019). No entanto, considerando a mistura com asfalto-borracha, é válido observar que misturas com esse tipo de ligante e que apresentam baixo FN, por vezes desempenham bem em campo, e o FN, por não ser uma propriedade do material, mas uma medida de referência para esse defeito, pode não ser preciso para essas misturas, conforme disserta Faccin (2018).

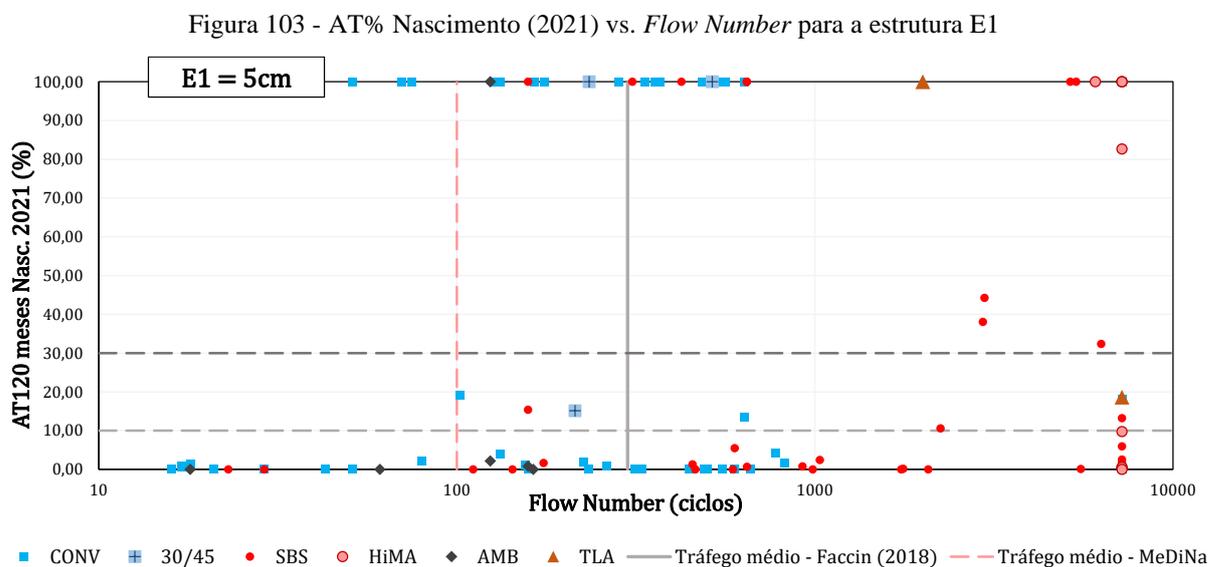
Para a faixa entre 10 e 30% de AT, muitas das misturas possuem CAP convencional. Embora também existam misturas com polímero, essas ficam situadas mais à direita do gráfico, indicando que, além de um comportamento satisfatório à fadiga, são muito superiores para a deformação permanente. Ademais, foi possível observar que todas as misturas altamente modificadas por polímero (HiMA), não atingiram a ruptura no ensaio uniaxial de cargas repetidas, embora nem todas possuam bom desempenho à fadiga. Essas observações confirmam que muitas misturas modificadas talvez não se justifiquem em um projeto para baixo volume de tráfego.

Dessa forma, parece razoável em um primeiro momento utilizar o FN com caráter eliminatório para as misturas, adequando-as ao tráfego da rodovia, uma vez que a deformação permanente está intimamente ligada às características da mistura escolhida. Em seguida, bastaria adequar a mistura escolhida à área trincada tolerada. Nas vias em que a manutenção pode provocar maiores danos ao fluxo de veículos, poderiam ser selecionadas misturas com AT máxima de 10% ao final do período de projeto, por exemplo.

Além disso, é válido considerar que o limite mínimo proposto pelo MeDiNa é de 100 ciclos para essa condição de tráfego, o que não descartaria o uso de diversas outras misturas, como as misturas com CAP borracha. Nesse sentido, é possível verificar que os limites de Faccin (2018) são mais rigorosos na aceitação do FN para evitar o ATR em campo, e caberia ao projetista, ou mesmo investigações em pesquisas futuras, analisar a viabilidade desses limites com base nas condições atuais das rodovias brasileiras.

A título de comparação, a Figura 103 ilustra o mesmo cruzamento de dados, mas com a área trincada sendo calculada pela função de transferência de Nascimento (2021). Conforme mencionado em seções anteriores, essa função estima mais valores extremos (0 ou 100%).

Assim, essa figura não foi efetiva para identificar as variações entre diferentes misturas, sendo que a maioria delas permaneceu abaixo de 10% de AT.

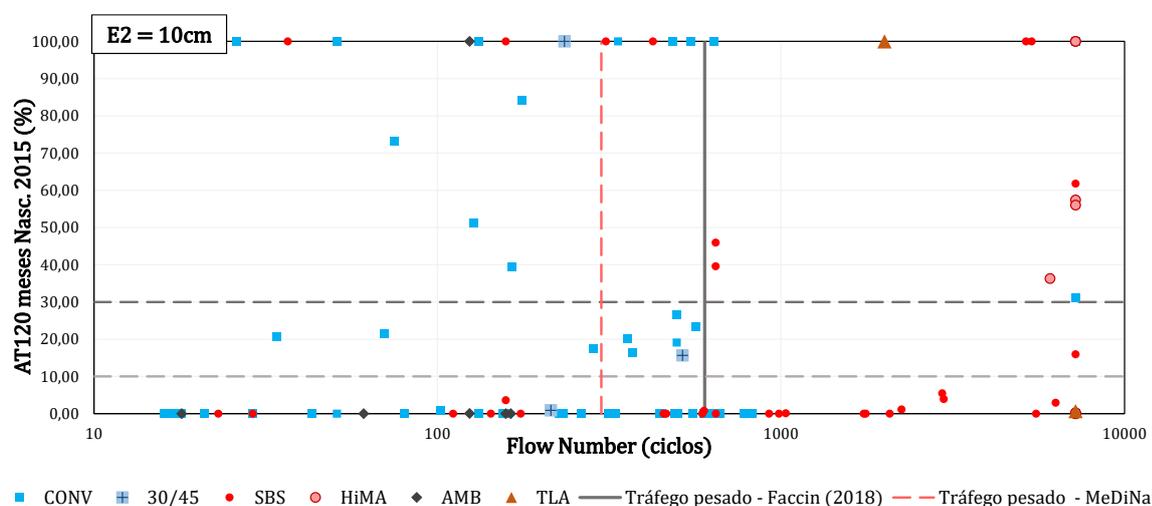


Fonte: Autora.

A inserção de 5 cm adicionais de concreto asfáltico na estrutura E2 promoveu uma redução efetiva nas deflexões do pavimento, fazendo com fossem observados menores valores de área trincada prevista (Figura 104). No entanto, foi possível observar que as misturas que já possuíam baixo desempenho à fadiga na estrutura E1, pioraram seu desempenho na segunda simulação, realizada com tráfego pesado.

Nesse caso, o limite de FN para tráfego pesado indica que a maioria das misturas que poderiam ser escolhidas são compostas por CAP modificado por polímero, das quais muitas também foram satisfatórias quanto à fadiga nessa simulação. O limite superior da classe de FN para tráfego pesado proposto por Faccin (2018) é de 2000 ciclos, indicando que nessas rodovias não seria necessário utilizar algumas misturas como as com ligante HiMA ou mesmo com TLA, ou seja, que aparecem no extremo direito do gráfico.

Em meio às poucas misturas com CAP convencional que ficam à direita da linha demarcada em FN = 600 ciclos e AT abaixo de 10%, estão a U14 – DNIT – FXC – 50/70 e U8 – DNIT – FXB – 50/70 de Faccin (2018), e a S CON FXB 50/70 de Boeira (2018). No entanto, pelo limite do MeDiNa de 300 ciclos, muitas misturas com CAP convencional poderiam ser escolhidas para o tráfego pesado, promovendo grande disparidade na seleção das misturas quando utilizados os limites de Faccin.

Figura 104 - AT% Nascimento (2015) vs. *Flow Number* para a estrutura E2

Fonte: Autora.

No caso dessa segunda simulação, a Figura 105 indica que a consideração da função de transferência de 2021 não promoveria mudanças significativas na utilização do gráfico para seleção das misturas. Isso ocorre porque, mesmo que a maioria das misturas tenha uma AT calculada inferior àquela da equação de 2015, as mudanças maiores ocorreram para as misturas com FN abaixo do limite para tráfego pesado, as quais já seriam eliminadas em primeira análise para esse tipo de rodovia.

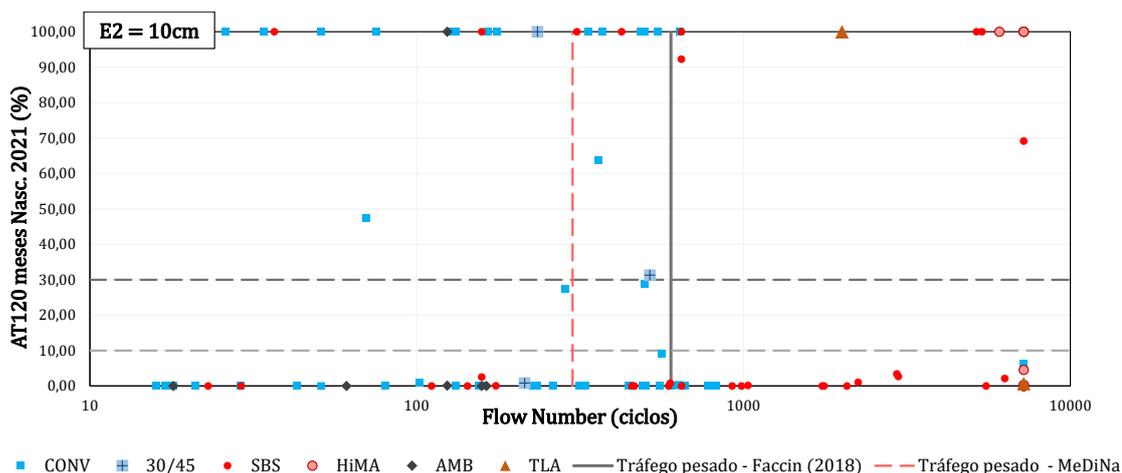
Considerando a terceira simulação de pavimentos, a Figura 106 mostra o FN *versus* a área trincada estimada pela função de transferência de 2015, para uma estrutura mais robusta e tráfego extremamente pesado. A figura mostra que, para esse tipo de rodovia, todas as misturas com CAP convencionais seriam descartadas pelo critério eliminatório de FN. São exceções as misturas com 100% RAP e agente rejuvenescedor de Almeida Jr. (2022).

Nesse caso, justifica-se com clareza a utilização de misturas com CAP polímero, HiMA e até mesmo TLA, contanto que atendam o critério de fadiga. Nesse caso, não houve nenhuma mistura acima do limite de FN que permaneceu entre 10 e 30% de AT prevista, ou seja, ou resultaram em desempenhos excelentes (abaixo de 10%) ou acima do limite de 30% do método de dimensionamento brasileiro.

Ainda, caso seja considerado o limite de 750 ciclos para seleção da mistura quanto ao FN, poderiam ser adotadas diferentes misturas com CAP polímero e algumas com CAP convencional para o tráfego extremamente pesado. As misturas com CAP 50/70 que, por esse

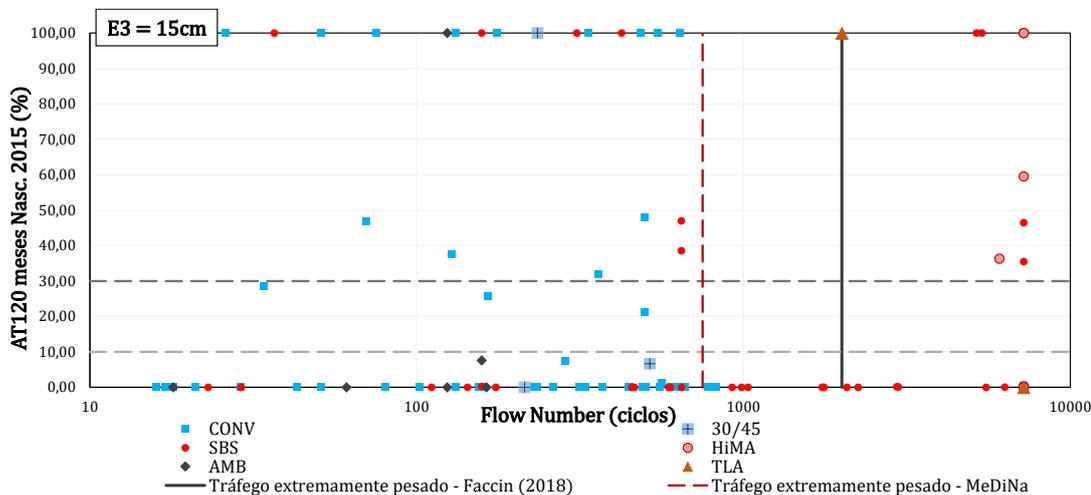
limite, suportaria um tráfego extremamente pesado, são a U8-DNIT-FXB-50/70 e a U14-DNIT-FXC-50/70 de Faccin (2018).

Figura 105 - AT% Nascimento (2021) vs. *Flow Number* para a estrutura E2



Fonte: Autora.

Figura 106 - AT% Nascimento (2015) vs. *Flow Number* para a estrutura E3



Fonte: Autora.

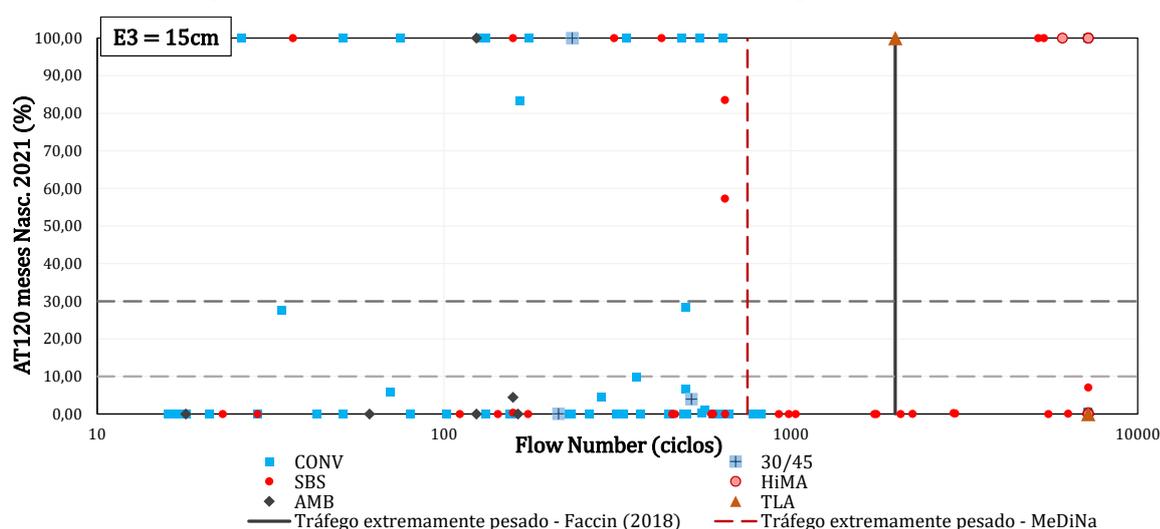
Novamente para permitir a comparação, a

Figura 107 traz os resultados utilizando a função de transferência de Nascimento (2021). Conforme observado também nas análises anteriores, as misturas que já possuíam área trincada prevista acima de 30% obtiveram valores ainda mais altos por essa equação, e misturas abaixo de 10% permaneceram com bom desempenho. Considerando as misturas que não seriam eliminadas pelo critério de FN, a única exceção para essas observações seria a

mistura RAP B 100°C de Teixeira (2017), que passou de 35,50% para 7,08% de AT prevista pelas funções de 2015 e 2021, respectivamente.

Por fim, também foi verificado que nenhuma mistura com CAP borracha e quase nenhuma mistura com CAP 30/45 seria adequada pelos critérios aqui estabelecidos. No entanto, vale destacar que as misturas com AMB muitas vezes apresentam desempenho satisfatório em campo. Além disso, é importante verificar que a função de transferência de 2021 promoveu AT superior à 30% em alguns casos de misturas com CAP 30/45, embora essas misturas ficassem entre 10 e 30% pela função de transferência de 2015. Novas investigações ainda precisam ser realizadas nesse sentido.

Figura 107 - AT% Nascimento (2021) vs. *Flow Number* para a estrutura E3



Fonte: Autora.

Com base nas avaliações anteriores, o parâmetro  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$  foi identificado como um promissor indicador de fadiga em misturas asfálticas, por melhor se correlacionar com as simulações de pavimentos. Assim, para cada simulação (estruturas E1, E2 e E3), todas as misturas foram separadas em 3 grupos, segundo a área trincada prevista ao final dos 120 meses: misturas com AT abaixo de 10%, misturas com AT entre 10 e 30% e misturas com AT acima de 30%.

É importante destacar que o limite máximo de 30% foi adotado em consonância com o manual do MeDiNa, que adota esse limiar no dimensionamento de diferentes tipos de vias, desde sistemas locais, até sistemas arteriais primários. Assim, para todas as discussões que seguirão, as classes de misturas asfálticas que não atendem ao máximo de 30% de área

trincada não necessariamente devem ser descartadas na seleção, uma vez que existem vias com baixíssimo volume de tráfego, por exemplo, que permitiriam uma flexibilização nesse valor.

Dessa forma, foi possível calcular os intervalos de confiança para o índice  $\Delta$  em cada grupo. Utilizando novamente a técnica de *Bootstrap*, foram realizadas 10000 reamostragens com repetição para cada grupo, sendo que os erros inferior e superior foram tomados para 95% de confiança. Assim, foi possível verificar, para cada nível de tráfego, qual o valor de  $\Delta$  mínimo que deveria ser atingido para garantir, a esse nível de confiança, um determinado nível de área trincada. Os resultados estão mostrados na Tabela 61.

Conforme já observado na seção anterior (avaliação entre as escalas), menores valores de  $\Delta$  indicam pior comportamento à fadiga. Essa tendência se confirma tanto observando as médias para cada grupo, quanto pelos intervalos de confiança, os quais não apresentaram nenhuma intersecção.

Tabela 61 - Intervalos de confiança para  $\Delta$  ( $G^R$  vs. Nf) com base nos grupos de AT%

ESTRUTURA 1 - Tráfego médio e 5 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)	1	-1,229	0,192	-0,044	0,042	[ -1,273 : -1,186 ]
	2	-1,593	0,322	-0,046	0,049	[ -1,442 : -1,347 ]
	3	-1,711	0,350	-0,132	0,107	[ -1,843 : -1,603 ]
ESTRUTURA 2 - Tráfego pesado e 10 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)	1	-1,230	0,184	-0,041	0,039	[ -1,271 : -1,191 ]
	2	-1,444	0,051	-0,030	0,030	[ -1,474 : -1,414 ]
	3	-1,683	0,341	-0,118	0,098	[ -1,801 : -1,585 ]
ESTRUTURA 3 - Tráfego extremamente pesado e 15 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)	1	-1,241	0,183	-0,040	0,038	[ -1,280 : -1,203 ]
	2	-1,467	0,055	-0,053	0,057	[ -1,520 : -1,410 ]
	3	-1,685	0,331	-0,115	0,095	[ -1,800 : -1,590 ]

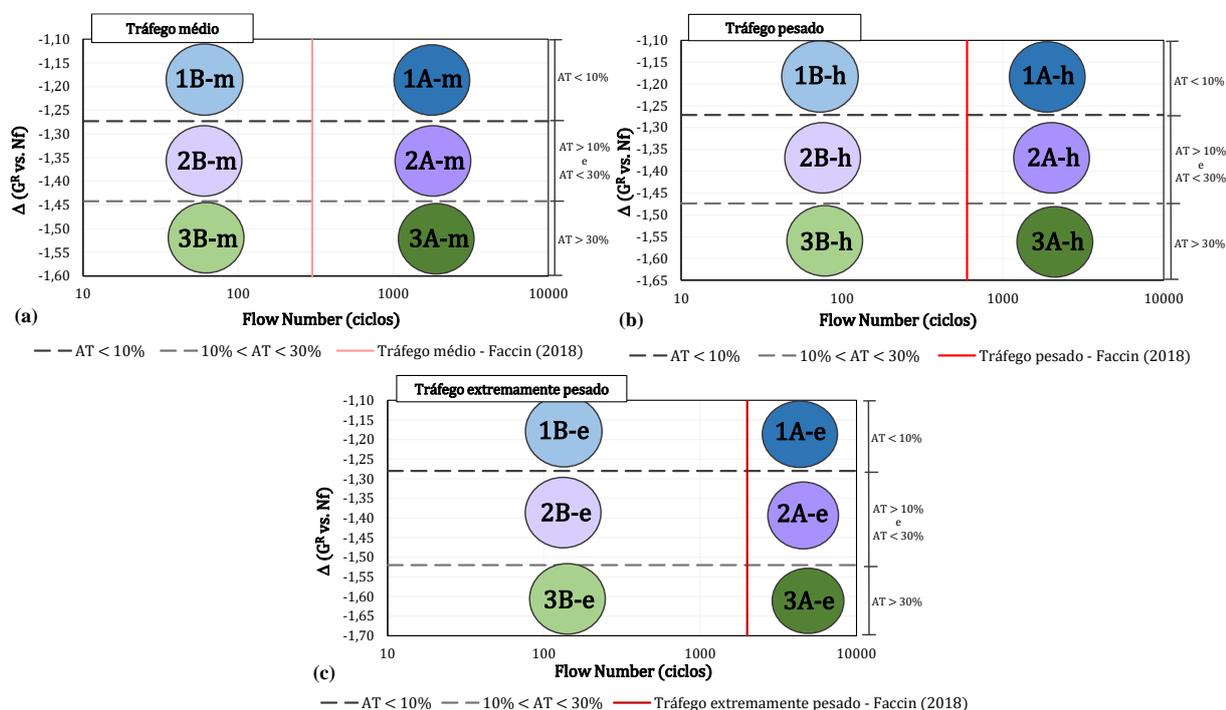
Fonte: Autora.

Em seguida, esses limites foram confrontados com os valores de FN, para cada nível de tráfego estudado. Dessa forma, foi possível definir 6 classes de misturas asfálticas, considerando conjuntamente os dois defeitos (Figura 108). Mantendo a mesma lógica da nomenclatura dos ligantes asfálticos, a fadiga foi identificada por números de 1 a 3, sendo 1 a melhor mistura (maior valor de  $\Delta$ ), e a deformação permanente pelas letras A e B, sendo A a melhor mistura (FN acima do limite mínimo aceitável para aquele tráfego).

Além das classes de fadiga e deformação permanente, a nomenclatura foi ainda complementada com a letra correspondente ao nível de tráfego utilizado nas simulações de pavimentos e para delimitar o *Flow Number* necessário. Dessa forma, as classes são seguidas pelas letras “m”, “h” e “e”, correspondentes dos tráfegos (em inglês) “*medium*”, “*heavy*” e “*extremely heavy*”, respectivamente.

Portanto, a classe 1 para a fadiga indica misturas que teriam uma área trincada prevista inferior à 10% em 10 anos; a classe 2, entre 10 e 30%; e a classe 3 superaria o limite de 30%. Além disso, vale destacar que os intervalos de confiança para  $\Delta$  não apresentaram uma sequência numérica entre os valores extremos de cada classe, ou seja, não foi possível identificar o valor exato onde uma classe termina e a outra inicia. Assim, a favor da segurança, o final da classe 2 foi levado até o início da classe 1, e a classe 3 foi definida como qualquer valor de  $\Delta$  abaixo do mínimo da classe 2.

Figura 108 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites de Faccin, 2018) e fadiga, nas simulações do FlexPAVE™



Fonte: Autora.

É importante salientar que essas classes podem servir como um critério inicial de seleção de materiais, uma vez que as próprias simulações de pavimentos consideram algumas premissas. Em um projeto real, a estrutura provavelmente não será a mesma das simulações, e

o clima considerado também poderá apresentar variações. No entanto, como as estruturas foram adequadas à ordem de grandeza do tráfego, as classes poderão servir na seleção de materiais para condições semelhantes. Dessa forma, apenas com o ensaio de *Flow Number* e de fadiga uniaxial à tração-compressão, e sabendo o nível de tráfego que atuará na rodovia, é possível ter um panorama de como a mistura ensaiada se comportará frente aos dois defeitos simultaneamente.

Essas escolhas, assim como discutido para os ligantes, dependerão de critérios técnicos e econômicos. Em rodovias onde atuará mais um defeito em detrimento ao outro, poderão ser selecionadas misturas de classes intermediárias para a fadiga. A deformação permanente, nesse caso, não possui classes intermediárias, visto que foi dividida pelo critério de FN de Faccin (2018), não sendo recomendadas misturas da classe B (FN abaixo do mínimo para aquele tipo de tráfego), a menos que haja uma justificativa técnica (como é o caso das exceções com asfalto borracha). Por fim, a Tabela 62, Tabela 63 e Tabela 64 trazem o resumo da nomenclatura adotada e os limites de cada faixa, para tráfegos médio, pesado e extremamente pesado.

Uma vez que os limites para FN em vigor no país são os propostos no novo método de dimensionamento de pavimentos, o ábaco apresentado acima foi replicado, contendo agora os limites de FN do MeDiNa. Esses limites são menos conservadores do que aqueles delimitados por Faccin (2018). As diferenças entre essas classificações podem ser discutidas de acordo com cada projeto, de modo que misturas descartadas pelos limites de Faccin podem ainda ter o respaldo do método MeDiNa. As classes, portanto, estão apresentadas na Figura 109, e os valores de cada uma estão reunidos na Tabela 65, Tabela 66 e Tabela 67.

Tabela 62 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego médio
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta$ ( $G^R$ vs. $N_f$ )	<i>Flow Number</i> Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,273$	$\geq 300$	1A - m
	B		< 300	1B - m
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,442$	$\geq 300$	2A - m
	B		< 300	2B - m
3 (AT > 30%)	A	< -1,442	$\geq 300$	3A - m
	B		< 300	3B - m

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 63 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego pesado
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta$ ( $G^R$ vs. $N_f$ )	<i>Flow Number</i> Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,271$	$\geq 600$	1A - h
	B		$< 600$	1B - h
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,474$	$\geq 600$	2A - h
	B		$< 600$	2B - h
3 (AT > 30%)	A	$< -1,474$	$\geq 600$	3A - h
	B		$< 600$	3B - h

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 64 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego ext. pesado
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta$ ( $G^R$ vs. $N_f$ )	<i>Flow Number</i> Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,280$	$\geq 2000$	1A - e
	B		$< 2000$	1B - e
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,520$	$\geq 2000$	2A - e
	B		$< 2000$	2B - e
3 (AT > 30%)	A	$< -1,520$	$\geq 2000$	3A - e
	B		$< 2000$	3B - e

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

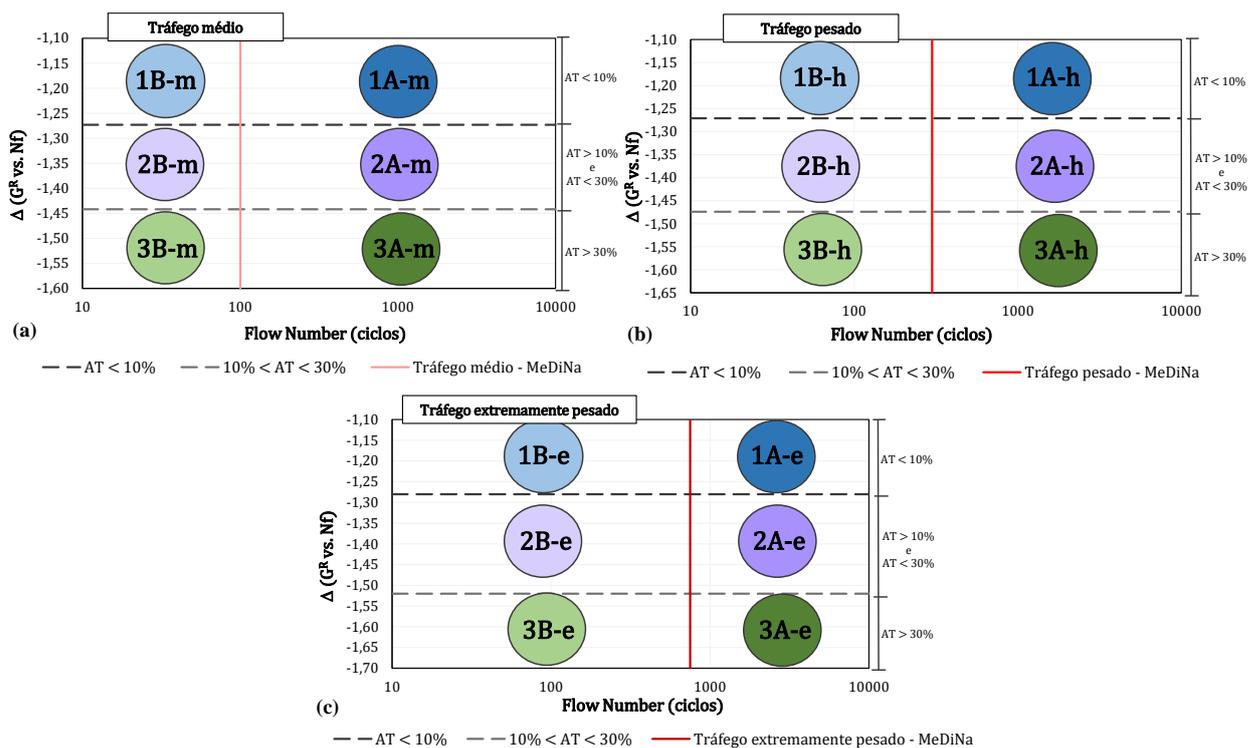
### 5.3.2.2 *Flow Number* vs. propriedades de fadiga pelo MeDiNa

Considerando que o novo método de dimensionamento brasileiro de pavimentos, o MeDiNa, possui diversas particularidades que o diferem da simulação realizada pelo FlexPAVE™, os ábacos de classificação geral das misturas também foram construídos levando em conta a área trincada estimada por essa metodologia, a qual utiliza a função de transferência adaptada de Fritzen (2016), que consta no manual do programa (FRANCO; MOTTA, 2023).

Dentre essas particularidades, pode-se citar a consideração da mistura asfáltica como um material elástico, utilizando ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral para análise das propriedades e cálculo estrutural; adoção de uma temperatura única para a simulação (ensaios a 25°C); e premissa de cargas estáticas para o tráfego. Essas e

outras diferenças podem levar a classificações bastante distintas das anteriores realizadas pela simulação no FlexPAVE™.

Figura 109 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites do MeDiNa) e fadiga, nas simulações do FlexPAVE™



Fonte: Autora.

Tabela 65 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego médio
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta (G^R \text{ vs. } N_f)$	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,273$	$\geq 100$	1A - m
	B		$< 100$	1B - m
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,442$	$\geq 100$	2A - m
	B		$< 100$	2B - m
3 (AT > 30%)	A	$< -1,442$	$\geq 100$	3A - m
	B		$< 100$	3B - m

Nota: o MeDiNa recomenda misturas com FN < 100 apenas para tráfego médio em condições normais.

Fonte: Autora.

Tabela 66 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego pesado
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,271$	$\geq 300$	1A - h
	B		$< 300$	1B - h
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,474$	$\geq 300$	2A - h
	B		$< 300$	2B - h
3 (AT > 30%)	A	$< -1,474$	$\geq 300$	3A - h
	B		$< 300$	3B - h

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 67 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do FlexPAVE™

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego ext. pesado
Fadiga	Deformação permanente	$\Delta$ ( $G^R$ vs. Nf)	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT < 10%)	A	$\geq -1,280$	$\geq 750$	1A - e
	B		$< 750$	1B - e
2 (10% < AT < 30%)	A	$\geq -1,520$	$\geq 750$	2A - e
	B		$< 750$	2B - e
3 (AT > 30%)	A	$< -1,520$	$\geq 750$	3A - e
	B		$< 750$	3B - e

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

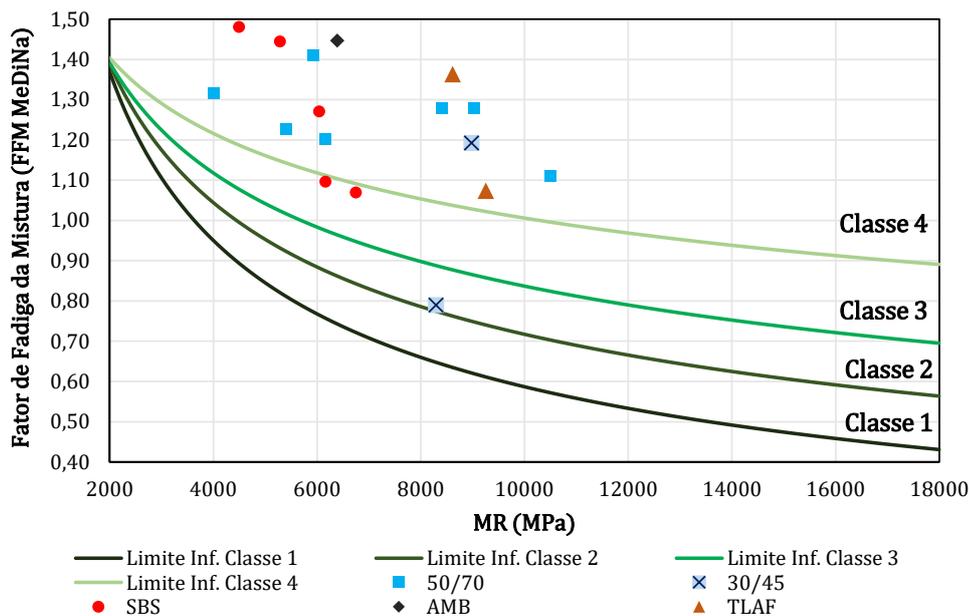
Fonte: Autora.

Para utilizar as classes do próprio MeDiNa e entender se as mesmas são capazes de discretizar adequadamente as misturas perante as simulações, a Figura 110 apresenta o ábaco de classificação do método, com as misturas do banco de dados que foram caracterizadas pelo MR e pelo ensaio de fadiga por compressão diametral. Nesse sentido, é possível observar que a grande maioria das misturas se encontram na mesma classe (classe 4), com exceção de duas misturas com ligante SBS (classe 3) e uma mistura com CAP 30/45 (classe 2).

Mesmo que haja menos pontos para essa análise, a classificação geral pelo MeDiNa será também apresentada nesta dissertação para as mesmas estruturas e tráfegos já mencionados. Da mesma forma que os ábacos anteriores, as melhores misturas são aquelas situadas no canto inferior direito. Nesse sentido, se for considerado o FN como critério eliminatório, a Figura 111 indica que todas as misturas com polímero poderiam ser utilizadas, bem como 3 misturas com CAP convencional. No entanto, considerando que esse gráfico foi

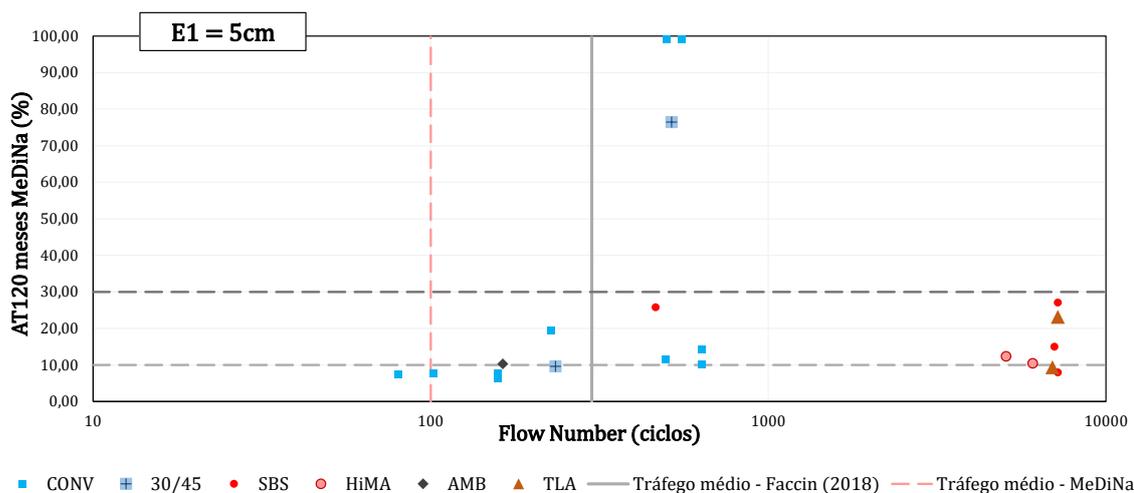
construído para uma simulação de tráfego médio, não seria justificável economicamente a seleção de misturas excelentes para a deformação permanente, visto que existem misturas convencionais que atenderiam os requisitos de projeto.

Figura 110 - Classes de fadiga para as misturas pelo MeDiNa



Fonte: Autora.

Figura 111 - AT% MeDiNa vs. Flow Number para a estrutura E1



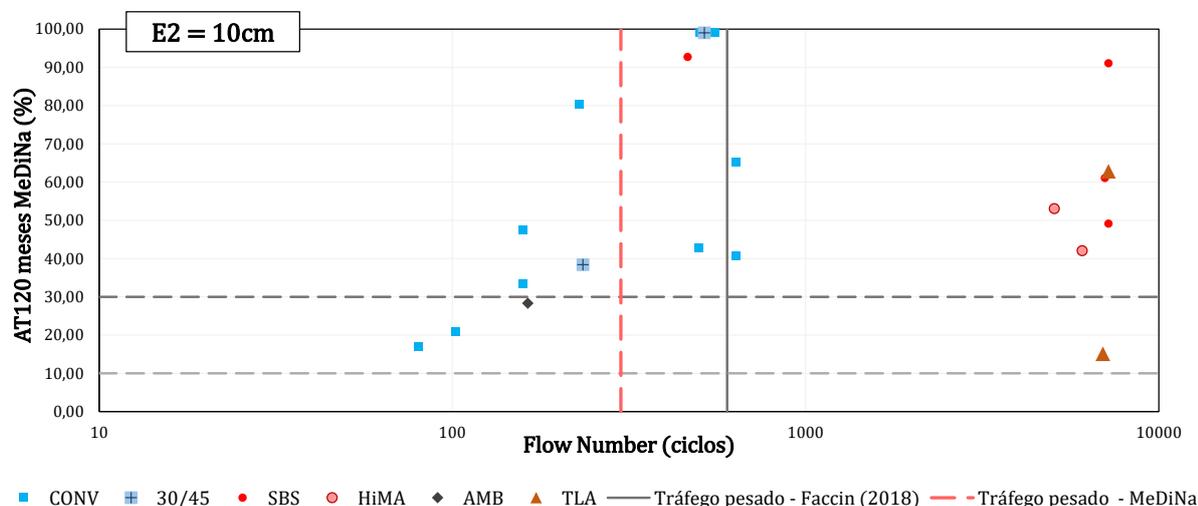
Fonte: Autora.

As misturas com CAP 50/70 que poderiam ser selecionadas pelos dois critérios (FN > 300 ciclos e AT < 30%) são a CONV de Vestena (2021), UFSM 1 - 50/70 12,5 mm de Santos

(2015) e a DERSA - FX III - 50/70 PA 85 introduzida ao banco de dados pela autora. No entanto, é importante observar que a mistura com CAP 50/70 PA 85 obteve desempenho insatisfatório quando avaliada pelo FlexPAVE<sup>TM</sup>, com área trincada estimada de 100% em 10 anos, indicando que as duas ferramentas podem chegar a resultados bastante distintos. Ainda, pelo limite de 100 ciclos de FN do MeDiNa, mais misturas deixariam de ser descartadas, incluindo uma mistura com CAP 30/45 e uma com CAP borracha.

Para a segunda simulação (tráfego pesado e 10 cm de revestimento), a Figura 112 indica que, para a estrutura proposta, apenas a mistura “TLAF lab” de Ilha (2022) poderia ser utilizada com desempenho satisfatório frente aos dois defeitos. O limite de 300 ciclos para o FN do MeDiNa permitiria incluir na seleção mais algumas misturas, mas todas ficam acima de 30% de área trincada ao final do período de projeto. Assim, mesmo que talvez essa não seja a estrutura mais adequada ao tráfego proposto, fica evidente que é primordial visualizar os dois defeitos conjuntamente na seleção de materiais.

Figura 112 - AT% MeDiNa vs. *Flow Number* para a estrutura E2

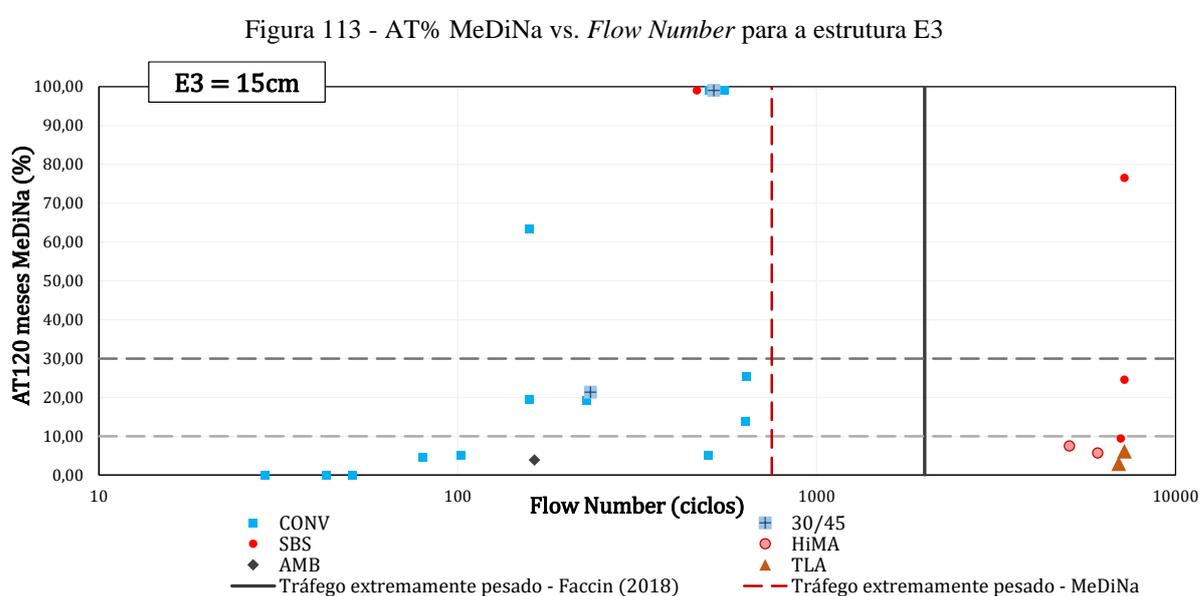


Fonte: Autora.

Por fim, para a terceira e última simulação (tráfego extremamente pesado e 15 cm de revestimento), a Figura 113 indica que, embora a grande maioria das misturas com CAP convencional tenha menos de 30% de AT prevista, nenhuma delas atenderia os critérios de deformação permanente de Faccin e do próprio MeDiNa. Nesse caso, portanto, justifica-se a utilização de ligantes modificados por SBS, HiMA ou TLA.

Apesar da maioria das misturas pertencerem à classe 4 de fadiga pelo MeDiNa, foram observados valores bastante distintos de área trincada nas simulações, sugerindo que tal classificação pode não estar discretizando adequadamente as misturas asfálticas.

Vale salientar novamente que existem misturas com bom desempenho pelo FlexPAVE™ e bom pelo MeDiNa, e vice-versa. Assim, as particularidades adotadas por cada metodologia devem ser levadas em consideração, e as discrepâncias demonstram que a adoção de premissas de cálculo impacta significativamente nas previsões.



Fonte: Autora.

Apesar de as misturas com classes inferiores de fadiga terem apresentado, de fato, as maiores áreas trincadas previstas, a maior parte desses materiais faz parte da classe 4, cujos valores de AT se mostraram bastante distintos. Para as misturas asfálticas contidas no banco de dados do GEPPASV, as classes de fadiga do MeDiNa não conseguiram prever com clareza quais os materiais superariam ou não o limite de 30% de área trincada ao final do período de projeto. Diante disso, na seção anterior foi identificado que o produto  $MR \cdot FFM$  poderia ser um bom indicador de fadiga das misturas, considerando os ensaios realizados por compressão diametral.

Assim como realizado para as simulações do FlexPAVE™, as misturas foram separadas em grupos, de acordo com diferentes níveis de área trincada: AT de até 10%, AT entre 10 e 30%, e AT maior que 30%. Apenas para a simulação com 10 cm de revestimento e tráfego pesado, nenhuma mistura obteve área trincada simulada menor que 10%, e a

separação foi realizada apenas em dois grupos. Para esses conjuntos, foram obtidos os intervalos de confiança para MR\*FFM, pela técnica *bootstrap*, com 95% de confiança e 10000 reamostragens com repetição.

A Tabela 68 indica que, apesar das médias de cada grupo indicarem que maiores valores de MR\*FFM levam a menores valores de AT, não foi possível identificar com precisão as misturas com área trincada abaixo de 10%, usando esse indicador. O mesmo ocorreu quando se realizou a tentativa de calcular os intervalos para um maior número de amostragens, ou mesmo para uma confiança de 85%. No entanto, esse índice parece separar as misturas que superam ou não o limite de área trincada de 30%.

Nesse sentido, para cada simulação, o indicador MR\*FFM foi plotado contra o FN, na tentativa de identificar classes de misturas com comportamento melhor ou pior, observando os dois defeitos. Como apenas foi possível separar os intervalos para áreas trincadas superiores ou inferiores à 30%, apenas foram identificadas 4 regiões para cada simulação. A favor da segurança, o limite de MR\*FFM para garantir uma área trincada inferior à 30% foi adotado como o limite inferior da melhor classe. Por exemplo, para a simulação com 5 cm de concreto asfáltico, o divisor das misturas quanto ao MR\*FFM foi o valor de 7307,49.

Tabela 68 - Intervalos de confiança para MR\*FFM de acordo com a área trincada do MeDiNa

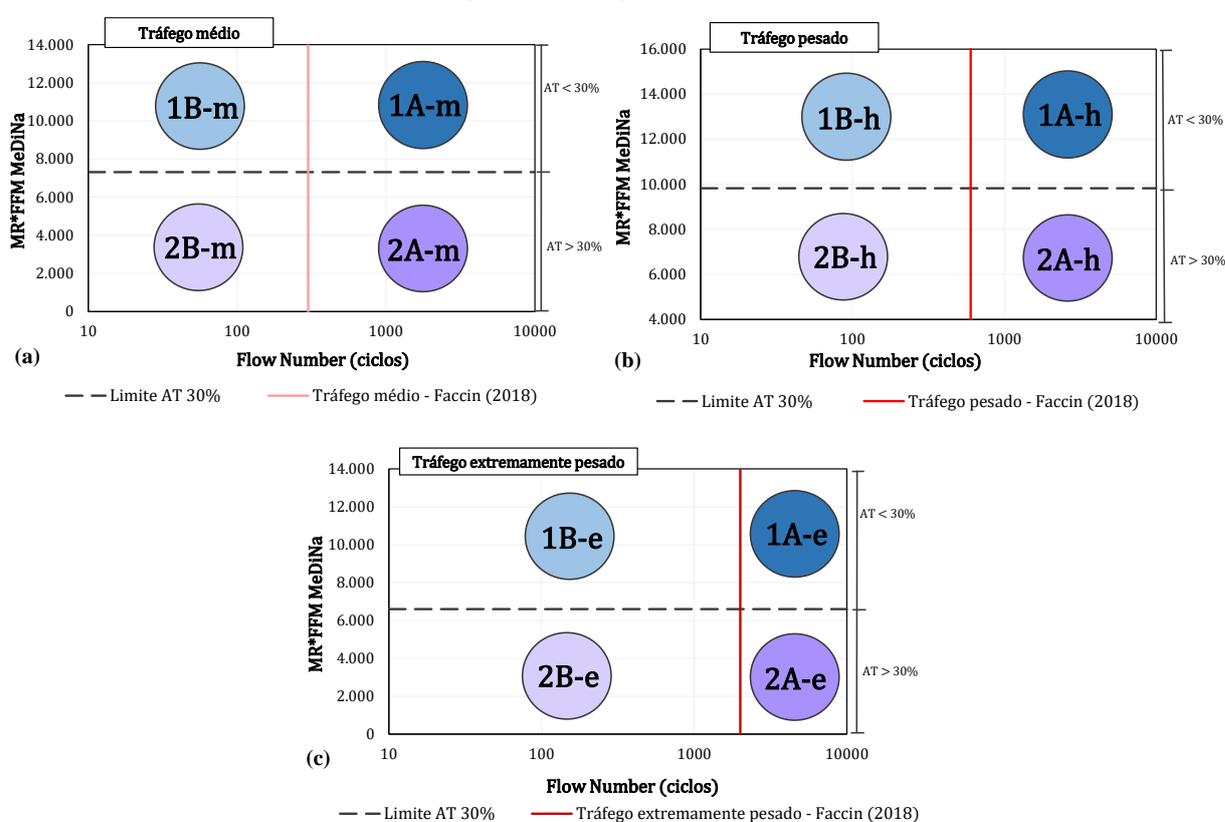
ESTRUTURA 1 - Tráfego médio e 5 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
MR*FFM	1	8895,77	3636,40	-2775,057	2419,034	[ 6120,72 - 11314,81 ]
	2	8046,92	1524,69	-739,429	875,339	[ 7307,49 - 8922,26 ]
	3	3635,57	2527,44	-1576,236	2915,221	[ 2059,33 - 6550,79 ]
ESTRUTURA 2 - Tráfego pesado e 10 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
MR*FFM	1	10827,03	1140,95	-1007,343	826,279	[ 9819,69 - 11653,31 ]
	2	6913,90	2628,25	-1258,197	1191,712	[ 5655,70 - 8105,61 ]
ESTRUTURA 3 - Tráfego extremamente pesado e 15 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior	Erro superior	Intervalo de confiança -
MR*FFM	1	9284,73	1834,87	-1165,877	1128,124	[ 8118,85 - 10412,85 ]
	2	8041,04	2286,36	-1436,275	1630,732	[ 6604,76 - 9671,77 ]
	3	4198,92	2293,69	-1790,924	1790,924	[ 2407,99 - 5989,84 ]

Fonte: Autora.

A Figura 114 traz as classes observadas considerando as 3 simulações e os limites de FN propostos em Faccin (2018), que são mais conservadores, conforme comentado anteriormente. A Tabela 69, Tabela 70, Tabela 71 trazem os valores de MR\*FFM e FN para cada classe. Assim como na seção anterior, 1 e 2 são as classes de fadiga (com 1 sendo a

melhor), e as classes A e B são para deformação permanente (com A sendo a melhor). Como os limites de FN estão adequados à cada condição de tráfego, misturas da classe B de deformação permanente não seriam recomendadas. Nesse caso, também foram utilizadas as letras “m”, “h” e “e”, indicativas dos tráfegos (em inglês) “medium”, “heavy” e “extremely heavy”, respectivamente.

Figura 114 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites de Faccin, 2018) e fadiga, nas simulações do MeDiNa



Fonte: Autora.

Tabela 69 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego médio
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 7307,49	≥ 300	1A - m
	B	≥ 7307,49	< 300	1B - m
2 (AT > 30%)	A	< 7307,49	≥ 300	2A - m
	B	< 7307,49	< 300	2B - m

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 70 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego pesado
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 9819,69	≥ 600	1A - h
	B		< 600	1B - h
2 (AT > 30%)	A	< 9819,69	≥ 600	2A - h
	B		< 600	2B - h

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 71 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN de Faccin, 2018), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego ext. pesado
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number Faccin (2018) (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 6604,76	≥ 2000	1A - e
	B		< 2000	1B - e
2 (AT > 30%)	A	< 6604,76	≥ 2000	2A - e
	B		< 2000	2B - e

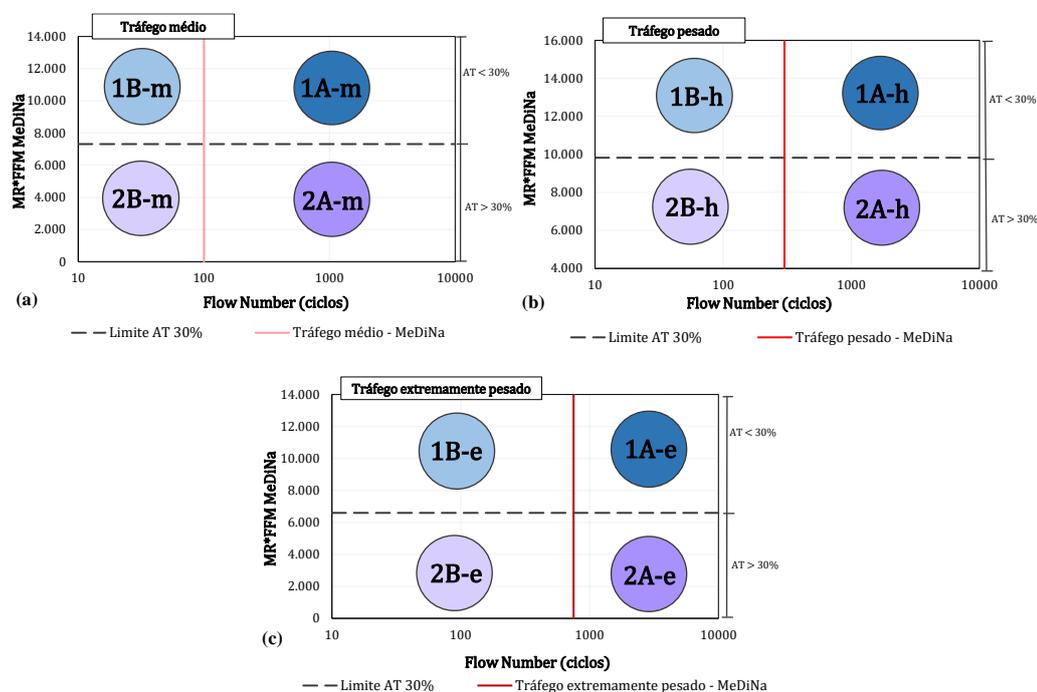
Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Além dos limites propostos por Faccin (2018) para o FN, foram considerados as classes apresentadas no MeDiNa. A separação das misturas está apresentada na Figura 115, e os limites para cada grupo na Tabela 72, Tabela 73 e Tabela 74.

É importante destacar que as misturas caracterizadas pelo ensaio de fadiga por compressão diametral, requerido pelo MeDiNa, estão em quantidade reduzida no banco de dados do GEPPASV. Assim, as classes observadas servem apenas como forma de sinalizar que o indicador MR\*FFM pode ser eficaz na separação das misturas que atendem ou não ao limite máximo de área trincada nas simulações. Ao longo do desenvolvimento de novas pesquisas, esses dados serão ampliados, e novas investigações seguirão sendo realizadas.

Figura 115 - Classes de misturas asfálticas considerando deformação permanente (limites do MeDiNa) e fadiga, nas simulações do MeDiNa



Fonte: Autora.

Tabela 72 - Limites para as classes de misturas sob tráfego médio (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego médio
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 7307,49	≥ 100	1A - m
	B		< 100	1B - m
2 (AT > 30%)	A	< 7307,49	≥ 100	2A - m
	B		< 100	2B - m

Nota: o MeDiNa recomenda misturas com FN < 100 apenas para tráfego médio em condições normais.

Fonte: Autora.

Tabela 73 - Limites para as classes de misturas sob tráfego pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego pesado
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 9819,69	≥ 300	1A - h
	B		< 300	1B - h
2 (AT > 30%)	A	< 9819,69	≥ 300	2A - h
	B		< 300	2B - h

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

Tabela 74 - Limites para as classes de misturas sob tráfego extremamente pesado (FN do MeDiNa), nas simulações do MeDiNa

Classes individuais		Limites da classe		Classe final - Tráfego ext. pesado
Fadiga	Deformação permanente	MR*FFM	Flow Number MeDiNa (ciclos)	
1 (AT ≤ 30%)	A	≥ 6604,76	≥ 750	1A - e
	B		< 750	1B - e
2 (AT > 30%)	A	< 6604,76	≥ 750	2A - e
	B		< 750	2B - e

Nota: misturas da classe B para deformação permanente não são recomendadas.

Fonte: Autora.

### 5.3.3 Conclusões parciais da seção

Assim como nas seções anteriores, esse tópico reúne algumas observações importantes observadas ao longo do item 5.3.

#### Ligantes asfálticos:

- Considerando o  $Jnr_{3,2}$  e o FFL, ligantes modificados por polímero geralmente são os melhores para a deformação permanente, mas não necessariamente são os melhores para a fadiga. Ainda assim, são considerados os mais eficientes para o enfrentamento da deformação permanente e da fadiga de maneira conjunta;
- O PGH não discretizou tão precisamente os ligantes asfálticos, para fins de seleção de material, com base nas classes de  $Jnr_{3,2}$ ;
- Existem ligantes convencionais com desempenho semelhante ao dos ligantes com polímero, podendo serem utilizados no lugar destes a fim de buscar a economia de recursos no projeto do CBUQ;
- Os ligantes com TLA estudados foram excelentes para a deformação permanente, mas nem sempre pertencem a classes superiores de fadiga, sendo mais adequados para rodovias com temperatura do ar elevada e/ou tráfegos muito pesados e lentos;
- O CAP 10/20 forneceu resultados muito satisfatórios para os dois defeitos, mas só há 1 ligante desse tipo no banco de dados.

## Simulações de pavimentos

### FlexPAVE™:

- Na região de comportamento mais satisfatório (maiores valores de FN e menores valores de AT%), ficaram situadas as misturas com ligante SBS ou HiMA, com exceção de algumas misturas com CAP 50/70, mas que eram compostas por adição de RAP;
- Existem diversas misturas com ligante convencional que atenderiam um projeto com tráfego médio de maneira bastante satisfatória, com FN superior à 300 ciclos e área trincada prevista em 10 anos abaixo de 10%;
- As piores misturas (baixo FN e AT maior que 30%) foram, em sua maioria, compostas por CAP convencional;
- Misturas com AMB não ficaram bem classificadas, mas podem apresentar um bom desempenho em campo quanto à deformação permanente;
- Todas as misturas altamente modificadas por polímero (HiMA), não atingiram a ruptura no ensaio uniaxial de cargas repetidas, embora nem todas possuam bom desempenho à fadiga;
- Muitas misturas modificadas talvez não se justifiquem em um projeto para baixo volume de tráfego, uma vez misturas com CAP convencional conseguem atender aos critérios de projeto quanto à deformação permanente e fadiga;
- Parece razoável utilizar o FN com caráter eliminatório para as misturas, e após adequar a mistura escolhida à área trincada tolerada;
- Os limites de Faccin (2018) são mais rigorosos na aceitação do FN para evitar o ATR em campo que os limites do MeDiNa, descartando quanto à deformação permanente uma série de misturas asfálticas;
- Para tráfego pesado, a maioria das misturas adequadas são compostas por CAP modificado por polímero, das quais muitas também foram satisfatórias quanto à fadiga;
- Pelo limite do MeDiNa de 300 ciclos, muitas misturas com CAP convencional poderiam ser escolhidas para o tráfego pesado quanto à deformação permanente;
- Para um cenário de tráfego extremamente pesado, todas as misturas com CAP convencional seriam descartadas pelo critério eliminatório de FN, com exceção de misturas com 100% RAP e agente rejuvenescedor de Almeida Jr. (2022);

- As médias e os intervalos de confiança indicaram com clareza que maiores valores de  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ) sinalizam melhor comportamento à fadiga, e foi o indicador de fadiga utilizado na proposta de classes das misturas;
- As classes propostas para as misturas levam em consideração as premissas das simulações, como a estrutura do pavimento e o clima utilizado, devendo ser interpretadas como critérios de seleção inicial de materiais;
- A escolha das misturas, assim como dos ligantes, dependerão de critérios técnicos e econômicos, observando o defeito com maior probabilidade de ocorrência para a rodovia projetada.
- Os limites para FN de Faccin (2018) poderão ser utilizados como um critério de seleção inicial das misturas, mas devem ser observados os limites oficiais estabelecidos pelo MeDiNa.

**MeDiNa:**

- Da mesma forma que para o FlexPAVE<sup>TM</sup>, para uma condição de tráfego médio, justifica-se o uso de misturas com ligante convencional, principalmente pensando em economia de recursos, desde que atendam os requisitos mínimos para deformação permanente e fadiga;
- O resultado de área trincada prevista pode fornecer valores bastante discrepantes para uma mesma mistura, considerando o FlexPAVE<sup>TM</sup> e o MeDiNa;
- Para a simulação com tráfego pesado, apenas uma mistura atendeu aos dois critérios, uma vez que a maioria superou a área trincada de 30% em 120 meses. Para o MeDiNa, a estrutura proposta parece não atender ao nível de tráfego pesado;
- Para a simulação com tráfego extremamente pesado, as misturas com CAP convencional atenderam somente os critérios de fadiga justificando o uso de misturas com CAP polímero ou HiMA nessa condição.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) atualmente conta com uma gama de estudos desenvolvidos ao longo de 10 anos de pesquisa, que contribuíram significativamente para o avanço no conhecimento acerca dos pavimentos asfálticos. No entanto, é importante que as informações disponíveis sejam transformadas em conhecimento para auxiliarem nas tomadas de decisão, nas fases iniciais da elaboração dos projetos de engenharia.

A partir da estruturação sistemática de um banco de dados do grupo, esta pesquisa teve como objetivo classificar os materiais asfálticos utilizando critérios de deformação permanente e fadiga, estabelecer as correlações entre escalas, além de realizar uma classificação geral dos ligantes e misturas asfálticas considerando os dois defeitos conjuntamente, propondo critérios de seleção inicial dos materiais.

A construção do banco de dados contou com pesquisas finalizadas desde 2014, totalizando 178 misturas asfálticas, incluindo as inseridas pela autora. Esses materiais são bastante diversos, incluindo diferentes agregados, granulometrias, métodos de dosagem e tipos de ligantes asfálticos, permitindo com que as análises fossem realizadas com base em uma gama extensa de misturas utilizadas nas obras de pavimentação.

Nesse banco de dados foram inseridas propriedades variadas, uma vez que cada pesquisa possuía seus objetivos e análises. Nesse sentido, foram levantadas as características gerais, propriedades dos ligantes, dos agregados e de dosagem; características de rigidez das misturas, de danificação em laboratório, de alguns levantamentos de campo e das simulações de pavimentos. Para essas simulações, foram utilizadas 3 estruturas distintas, adequadas aos tráfegos médio, pesado e muito/extremamente pesado, e 2 ferramentas de simulação, o FlexPAVE<sup>TM</sup> e o MeDiNa. A partir desses dados, buscou-se encontrar os melhores indicadores para avaliar ligantes e misturas, e permitir a proposta de classificação geral.

A seção de resultados foi dividida em três etapas de investigação: a primeira, a qual se propôs a observar e ranquear os materiais em escalas separadas (ligantes e misturas), e também dividindo os danos por deformação permanente e por fadiga; a segunda, na qual foram estudadas as relações entre escalas, tanto ligante-mistura, quanto mistura-pavimento, considerando as simulações; e a terceira, que, a partir de uma análise técnica e crítica das

seções anteriores, utilizou os melhores indicadores de deformação permanente e fadiga para propor as classes de seleção de materiais, observando os dois defeitos conjuntamente.

Da primeira parte da seção de resultados, observou-se alguns bons indicadores da deformação permanente em ligantes, como o ponto de amolecimento, a viscosidade rotacional Brookfield a 135°C, os parâmetros  $|G^*|/\text{sen}\phi$ ,  $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , o PGH contínuo e o “h” da modelagem 2s2p1d dos dados de módulo de cisalhamento dinâmico de ligantes. No entanto, o parâmetro  $J_{nr,3,2}$  do ensaio de MSCR foi considerado o indicador mais adequado para essa avaliação, e foi possível estabelecer alguns intervalos de confiança para os demais índices com base nas classes de  $J_{nr}$ , já estabelecidas em normativas internacionais.

No que diz respeito à fadiga em ligantes, não foi possível observar tendências claras a partir de dados de viscoelasticidade linear, mas o parâmetro  $\delta$  da modelagem 2s2p1d parece ser um indicador potencial. Os ciclos até a falha e o fator de fadiga do ligante ( $\text{FFL}_{19^\circ\text{C}}$ ) foram considerados os melhores indicadores de fadiga nesses materiais. Tanto para a deformação permanente, quanto para a fadiga, os ligantes modificados por polímero parecem apresentar desempenho superior aos demais, embora existam exceções.

Quanto à deformação permanente em misturas, a grande maioria dos indicadores considerados mais adequados para essa inferência (em relação ao *Flow Number*) dizem respeito à reologia da mistura como um todo, em detrimento das propriedades dos agregados individuais ou combinados em uma composição granulométrica. Nesse sentido, destacaram-se o índice de forma da fração #3/4 do agregado, os índices  $|E^*|_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$  e  $|E^*|/\text{sen}\phi_{54^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , o teor de RAP, e os parâmetros de modelagem dos dados de módulo dinâmico: “h” e E00 (2s2p1d) e “g” (sigmoidal). De forma geral, misturas mais rígidas e/ou modificadas com polímero parecem ser melhores à deformação permanente.

Finalizando a primeira parte dos resultados, a análise de fadiga em misturas asfálticas mostrou que esse é um defeito mais complexo que a deformação permanente, e descrevê-lo adequadamente utilizando variáveis isoladas, sem a consideração da estrutura de um pavimento, não é o mais adequado. No entanto, pode-se elencar alguns indicadores potenciais, como o  $|E^*|_{21^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ , o parâmetro “d” da modelagem sigmoidal, o fator de fadiga da mistura (FFM) e o índice  $\Delta$  das curvas  $G^R$  vs.  $N_f$ , provenientes da aplicação da abordagem S-VECD aos resultados do ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão. As misturas com ligante modificado parecem apresentar melhor comportamento, mas há mais exceções que na deformação permanente.

Com relação à segunda parte da seção de resultados, foi observado que existem parâmetros dos ligantes que podem fornecer indicativos do FN observado nas misturas. Os indicadores que parecem mais adequados para essa análise foram o  $Jnr_{3,2}$  do ensaio de MSCR, tanto a 64°C, quanto no PGH, a viscosidade a 135°C e o ponto de amolecimento. Os índices reológicos dos ligantes ainda carecem de dados para permitir essas inferências, mas ligantes mais rígidos e elásticos em altas temperaturas parecem ser desejáveis, o que ocorre nos ligantes com SBS e HiMA.

No caso da relação de fadiga entre ligantes e misturas, poucos índices de viscoelasticidade linear no CAP foram identificados como possíveis indicadores da fadiga em misturas, representada pelo FFM (calculado a partir da curva de Wöhler simulada pela equação de Nascimento, 2016). Da modelagem 2s2p1d, destacaram-se os parâmetros  $\delta$  e “k”, mas o melhor indicador foi o  $FFL_{19^\circ C}$  do ensaio de LAS. Em relação ao FFM do MeDiNa, os ligantes com SBS ou HiMA, que possuíam maior  $FFL_{19^\circ C}$  pelo critério da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE), também apresentaram melhor comportamento à fadiga.

Nas simulações de pavimentos, a fadiga mostrou-se intimamente ligada à condição estrutural, sendo que o FlexPAVE<sup>TM</sup> discretiza melhor as diferenças entre misturas com e sem ligante modificado, e o MeDiNa prevê, em geral, maiores valores de área trincada. Além disso, misturas com maiores valores de FFM S-VECD e de  $\Delta$  ( $G^R$  vs. Nf) promovem um melhor desempenho à fadiga, e são indicadores promissores para essa inferência com relação ao FlexPAVE<sup>TM</sup>. No MeDiNa, a relação  $MR*FFM$  forneceu melhores correlações com a área trincada, e essa tendência muda em misturas com ou sem ligante modificado.

A terceira e última parte da seção de resultados trouxe a visão geral dos materiais, considerando deformação permanente e fadiga de maneira conjunta. A proposta de classificação de ligantes foi realizada com base no  $Jnr_{3,2}$  64°C, pelos limites da norma AASHTO M 332 (2022), e a fadiga com base no  $FFL_{19^\circ C}$  máxPSE, pelos limites trazidos em Possebon (2021). Assim, as 25 classes identificam ligantes bons e ruins frente aos dois defeitos, e também os intermediários, fazendo com que a escolha seja baseada nas condições previstas para a rodovia.

Os ensaios escolhidos para a classificação de ligantes asfálticos possuem boa solidez técnica segundo a literatura científica, especialmente quando comparados aos ensaios empíricos das especificações brasileiras. Além disso, utilizam uma pequena quantidade de

amostra, e seu tempo de execução é bastante rápido. No entanto, necessitam do emprego de um equipamento mais robusto e de custo elevado. Nesse sentido, apenas com relação à deformação permanente, existem propriedades simples que podem ser utilizadas como parâmetros de controle em ligantes asfálticos, como a viscosidade rotacional a 135°C e o ponto de amolecimento.

Quanto às misturas, foram propostas 6 classes para cada cenário simulado (tráfego médio, pesado ou extremamente pesado), com base nos intervalos de  $\Delta$  ( $G^R$  vs.  $N_f$ ), adequados à área trincada prevista, e intervalos de FN de Faccin (2018) e do MeDiNa. Dessa forma, foi possível identificar misturas que seriam eliminadas pelo critério de deformação permanente, e que posteriormente podem ser selecionadas com base no nível de trincamento tolerado. Novamente, a classe intermediária, por exemplo, pode ser escolhida como uma tentativa de economia de recursos.

Da mesma maneira, foram propostas 4 classes para cada cenário simulado no MeDiNa, utilizando para a fadiga o indicador  $MR*FFM$  e para a deformação permanente o FN (limites de Faccin e do MeDiNa, novamente). Esse indicador permitiu separar as misturas que superam ou não o máximo de 30% de área trincada, uma vez que a maioria das misturas do banco de dados estava na mesma classe de fadiga, mas apresentaram valores bastante distintos de AT.

Em suma, para classificar as misturas asfálticas seriam necessários apenas 4 ensaios: *Flow Number* e fadiga à tração direta (para encontrar o índice  $\Delta$ ) na metodologia utilizando o FlexPAVE™; *Flow Number*, MR e fadiga por compressão diametral para a metodologia utilizando o MeDiNa. Assim, o FN pode ser usado como critério eliminatório para a deformação permanente (por limites mais ou menos conservadores), e os índices de fadiga ( $\Delta$  e  $MR*FFM$ ) passam a ser utilizados como sinalizadores de um determinado nível de área trincada prevista, que pode ser escolhida como sendo de até 10%, entre 10 e 30%, e eventualmente acima de 30%, em 10 anos. Apesar desses testes serem realizados em um equipamento de custo significativamente elevado, todos já fazem parte do cenário das pesquisas brasileiras, uma vez que os avanços nas formas de avaliação de misturas asfálticas foram relevantes no país nos últimos anos.

Esta pesquisa, portanto, permitiu a organização da produção científica do GEPPASV em um único lugar, o que permitiu a elaboração deste estudo, e ainda irá possibilitar diversas investigações futuras. Foi possível identificar diferentes índices capazes de inferir sobre o

desempenho dos materiais, que podem ser utilizados posteriormente como parâmetros de controle.

Por fim, acredita-se que a principal contribuição da pesquisa foi a observação dos materiais asfálticos frente aos principais defeitos das rodovias no Brasil, de maneira conjunta, uma vez que esses mecanismos de ruptura atuam simultaneamente em campo. Dessa forma, mesmo que os projetos de pavimentos não estejam exatamente nas mesmas condições simuladas neste estudo, os critérios e classes aqui expostos poderão servir como a base para a seleção de materiais, promovendo projetos mais assertivos e econômicos.

## 6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Diante dos resultados e lacunas da dissertação, são elencadas algumas sugestões para estudos futuros:

- (a) Caracterizar novas misturas asfálticas aplicadas em campo e seus respectivos ligantes, e coletar os dados das pesquisas finalizadas após esta dissertação, como forma de ampliar o banco de dados e aumentar a confiabilidade das análises, além de identificar de maneira mais precisa o potencial de índices reológicos de ligantes que ainda ficaram pendentes neste trabalho;
- (b) Realizar o monitoramento dos trechos experimentais onde as misturas asfálticas forem aplicadas, para ampliar os dados de afundamento em trilha de roda e permitir a correlação mistura-campo quanto à deformação permanente, além de auxiliar na coleta de dados para a atualização da função de transferência do MeDiNa;
- (c) Ampliar os dados do grupo referentes ao ensaio de Hamburgo para a deformação permanente e IDEAL-CT para a fadiga, e avaliar o potencial desses ensaios de caracterização;
- (d) Implantar o ensaio de *Stress Sweep Rutting* (SSR) caracterização da deformação permanente em misturas em um ensaio com confinamento, permitindo a utilização do *Shift Model* e do FlexPAVE<sup>TM</sup> para simular a deformação permanente em diferentes estruturas de pavimentos, e a coleta de dados para a futura calibração de uma função de transferência para ATR;
- (e) Aplicar as Zonas Climáticas de Pavimentação (PCZs) que estão sendo desenvolvidas na tese de doutorado de Faccin (2023) às simulações de pavimentos, como forma de

criar novas classes para seleção de misturas asfálticas e abranger todos os cenários climáticos do Brasil;

- (f) Aplicar ferramentas de *machine learning* para prever índices de desempenho a partir de propriedades individuais dos materiais estudados.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA JR., P. O. B. et al. **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Transportes, v. 26, n. 2, p. 1–15, 2018.

ALMEIDA JR., P. O. B. **Reciclagem de misturas 100% RAP: investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.

ALMEIDA JR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO 29-15: Standard Practice for Grading or Verifying the Performance Grade of an Asphalt Binder**. Washington, D.C., 2019.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 315-22: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 324: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 391: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. Washington, D.C., 2020.

\_\_\_\_\_. **AASHTO M 320-22: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO M 332-22: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO R 28-22: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 240-22: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 314-22. Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 316. Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer**. Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 322-07: Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test**

**Device.** Washington, D.C., 2007.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 342-22: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA).** Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 350-19: Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).** Washington, D.C., 2019.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 378-22: Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).** Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 400-22: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test.** Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 48-22: Standard Method of Test for Flash Point of Asphalt Binder by Cleveland Open Cup.** Washington, D.C., 2022.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP 113-15: Standard Method of Test for Determination of Asphalt Binder Resistance to Ductile Failure Using Double-Edge-Notched Tension (DENT) Test.** Washington, D.C., 2021.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP 123-16: Provisional Standard Method of Test for Measuring Asphalt Binder Yield Energy and Elastic Recovery Using the Dynamic Shear Rheometer.** Washington, D.C., 2020.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP 92-14: Standard Method of Test for Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device (ABCD).** Washington, D.C., 2018.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 313-21: Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR).** Washington, D.C. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3381/D3381M-18. Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction.** EUA, 2018.

\_\_\_\_\_. **ASTM D4402/D4402M-15. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.** EUA, 2022.

\_\_\_\_\_. **ASTM D6373-21A. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.** EUA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM D6521-22. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV).** EUA, 2022.

\_\_\_\_\_. **ASTM D6931. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures.** EUA, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7369. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test.** EUA, 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7405-20. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.** EUA, 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM D8239-21A. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test.** EUA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM D92-18. Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.** EUA, 2018.

\_\_\_\_\_. **ASTM D946/D946M. Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction.** EUA, 2020.

ANDERSON, D. A. et al. **Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization.** Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

ANDERSON, M. **Tests to Assess the Potential for Moisture Damage in Asphalt Mixtures.** Anais do Asphalt Institute Spring Meeting. Houston, Texas: 2002.

ANDERSON, R. M. et al. **Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 80, p. 615–664, 2011.

APEAGYEI, A. K. **Flow number predictive models from volumetric and binder properties.** Construction and Building Materials, v. 64, p. 240–245, 14 ago. 2014.

AREGA, Z.; BHASIN, A. **Final Report: Binder Rheology and Performance in Warm Mix Asphalt.** Austin, Texas: 2012.

ARSHAM, H. **Statistical Thinking for Managerial Decisions.** University of Baltimore, Website. 2020.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specifications and Testing (SP-1).** Asphalt Institute, 2003.

\_\_\_\_\_. **The Asphalt Handbook.** 7. ed. Asphalt Institute, 2007.

ASSAF, Y. Z. **Análise de desempenho à fadiga de misturas asfálticas por meio da simulação no software LVECD.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 1518: **Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 15785. **Misturas asfálticas a quente - Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 15087. **Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 15235. **Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 16018. **Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 16505. **Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Rio de Janeiro, 2016.

ATTIA, T. et al. **Correction to: Behaviour of an interface between pavement layers obtained using Digital Image Correlation**. *Materials and Structures*, v. 55, n. 2, p. 55–62, 2022.

BAAJ, H. **Comportement des matériaux granulaires traits aux liants hydrocarbonés**. Tese de doutorado. ENTPE-INSA, Lyon, 2002.

BAHIA, H. et al. **Field Evaluation of Wisconsin Modified Binder Selection Guidelines - Phase II**. Report n° 0092-13-02. Madison: 2013.

BAHIA, H. U. et al. **Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders**. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 68, p. 1–34, 1999.

BAHIA, H. U. et al. **Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design**. National Cooperative Highway Research Program NCHRP Report (NCHRP) Report 459. Washington, DC: 2001.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. 2007.

BARBOZA JUNIOR, V. S. **Efeito deletério da água em misturas asfálticas com adição de ligante modificado com polímero e de cal**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

BASTOS, J. B. DOS S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H. **Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo**. *Revista Transportes*, v. 25, n. 2, p. 29–40, 2017.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos**

**asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

BASTOS, J. B. S.; FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B. **Relação entre parâmetros granulométricos e características de forma na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas.** Anais da Reunião Anual De Pavimentação. Brasília, DF: ABPv/ABDER/DER-DF, 2016.

BEARSLEY, S.; GROUP, H.; BOSMA, G. **Implementation of the AASHTO Performance Graded Asphalt Binder Specification in the New Zealand Operating Environment.** 18th AAPA International Flexible Pavements, Sydney, Australia, 2019.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2a ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados.** Tese de doutorado. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

BONAQUIST, R. **Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property.** Wisconsin Highway Research Program, 2012.

BOOSHEHRIAN, A.; MOGAWER, W. S.; BONAQUIST, R. **How to Construct an Asphalt Binder Master Curve and Assess the Degree of Blending between RAP and Virgin Binders.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, 2013.

BORDIN, D. T. **Implantação, acompanhamento e análise de desempenho de trechos monitorados em santa maria - RS.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

BRENNAN, M. J.; LOHAN, G.; GOLDEN, J. M. **A laboratory study of the effects of bitumen content, bitumen grade, nominal aggregate grading and temperature on the fatigue performance of dense bitumen macadam.** Anais do Proceedings of the IVth International Rilem Symposium. Chapman & Hall, Budapest: 1990

BRONDANI, C. **Estudo laboratorial da influência da areia natural na viscoelasticidade das misturas asfálticas.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

BRONDANI, C. **Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no rio grande do sul.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

BROWN, S. F. **Achievements and challenges in asphalt pavement engineering.** ISAP - 8th

International Conference on Asphalt Pavements. Seattle: 1997.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

BUENO, L. D. **Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

BUKOWSKI, J.; YOUTCHEFF, J.; HARMAN, T. **Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure.** Office of Pavement Technology - FHWA- HIF- 11- 038, 2011.

BUTTLAR, W. G. et al. **Performance space diagram for the evaluation of high- and low-temperature asphalt mixture performance.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. sup1, p. 336–358, 2017.

CAI, X. et al. **Internal aging indexes to characterize the aging behavior of two bio-rejuvenated asphalts.** Journal of Cleaner Production, v. 220, p. 1231–1238, 20 maio 2019.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação.** ABEDA, 2015.

CHAROENTHAM, N.; KANITPONG, K. **Development of a Performance Grading System for Asphalt Binders Used in Thailand.** Asian Transport Studies, v. 2, n. 2, p. 121–138, 2012.

CHEHAB, G. R. et al. **Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 71, p. 559–593, 2002.

CHRISTENSEN, D. W.; ANDERSON, D. A.; ROWE, G. M. **Relaxation spectra of asphalt binders and the Christensen–Anderson rheological model.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. sup1, p. 382–403, 2017.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity.** 2a ed. Nova York: Academic Press Inc., 1982.

CHRISTENSEN, D. W.; TRAN, N. **Relationships Between the Fatigue Properties of**

**Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures.** Washington, DC: NCHRP Research Report 982. The National Academies Press., 2021.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

COOPER, S. B. et al. **Balanced Asphalt Mixture Design through Specification Modification: Louisiana's Experience.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2447, n. 1, p. 92–100, 2014.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

CORTÉ, J. et al. **Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration.** Transportation Research Record, v. 1436, p. 28–37, 1994.

CUNHA, M. C.; ZEGARRA, J. R. E.; FERNANDES-JR., J. L. **Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil.** Rio de Janeiro: Anais do Congresso Nacional De Pesquisa e Ensino Em Transportes (ANPET), 2007

CUSTÓDIO, D. A. DA S. **Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.

D'ANGELO, J. A. **The Relationship of the MSCR Test to Rutting.** Road materials and pavement design, v. 10 (sup1), p. 61–80, 1 jan. 2009.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model (with discussion).** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 71, 2002.

DELAPORTE, B. **Etude de la rhéologie des mastics bitumineux à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement annulaire.** Revue Européenne de Génie Civil, v. 10, n. 8, 2006.  
<http://dx.doi.org/10.1080/17747120.2006.9692880>

DELGADILLO, R. et al. **The influence of climate change in Superpave binder selection for Chile.** Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 3, p. 607–622, 2 abr. 2018.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1509803>

DELGADILLO, R.; NAM, K.; BAHIA, H. **Why do we Need to Change  $G^*/\text{Sin}\delta$  and How?** Road Materials and Pavement Design, v. 7, n. 1, p. 7–27, 1 jan. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 1981.

\_\_\_\_\_.DNER-ES 385/99. **Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero -**

**Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro/RJ, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT 168/2013-EM: **Cimento asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt) – Especificação de Material.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_.DNIT 005/2003 - TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia.** Rio de Janeiro – RJ , 2003.

\_\_\_\_\_.DNIT 031/2006 - ES. **Pavimentos flexíveis-Concreto asfáltico-Especificação de serviço.** Rio de Janeiro/RJ, 2006.

\_\_\_\_\_.DNIT 111/2009 - EM. **Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material.** Rio de Janeiro/RJ, 2009.

\_\_\_\_\_.DNIT 135/2018 - ME. **Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência-Método de ensaio.** Rio de Janeiro – RJ, 2018.

\_\_\_\_\_.DNIT 136/2018 - ME. **Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas-Determinação da resistência à tração por compressão diametral-Método de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ, 2018.

\_\_\_\_\_.DNIT 155/2010 - ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro/RJ, 2010.

\_\_\_\_\_.DNIT 178/2018 - PRO. **Pavimentação asfáltica-Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall - Procedimento.** Rio de Janeiro/RJ, 2018.

\_\_\_\_\_.DNIT 183/2018 - ME. **Pavimentação asfáltica-Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada-Método de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ, 2018.

\_\_\_\_\_.DNIT 416/2019. **Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas-Determinação do módulo dinâmico-Método de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ, 2019.

\_\_\_\_\_.DNIT 129/2011 - EM. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material.** Rio de Janeiro/RJ, 2011.

\_\_\_\_\_.DNIT 095/2006 - ME. **Cimentos asfálticos de petróleo-Especificação de material.** Rio de Janeiro/RJ, 2006.

\_\_\_\_\_.DNIT 439/2022 - ME. **Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ, 2022.

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S/A. ET-P 00/027. **Concreto Betuminoso Usinado a Quente.** São Paulo, 2005.

DI BENEDETTO, H. et al. **Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes.** Road Materials and Pavement Design, v. 5, p. 163–202, jan. 2004.

DI BENEDETTO, H. et al. **Mechanical testing of bituminous mixtures. Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials.** RILEM State-of-the-Art Reports. Springer Netherlands, 2013. v. 9p. 143–256.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; BERNUCCI, L. L. B. **Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance.** Construction and Building Materials, v. 144, p. 207–213, 30 jul. 2017.

DREESSEN, S.; PLANCHE, J. P.; GARDEL, V. **A new performance related test method for rutting prediction: MSCRT.** Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, p. 971–980, 14 maio 2009.

EFRON, B. **Bootstrap methods: Another look at the jackknife.** Annals of Statistics, v. 7, p. 1–26, 1979.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. **A introduction to the Bootstrap.** Chapman & Hall, 1993.

EPPS, J. A. et al. **Influence of mixture variables on the flexural fatigue properties of asphalt concrete.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), v. 38, p. 423–458, 1969.

ESLAMINIA, M. et al. **Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis.** Anais 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Kluwer Academic Publishers, 2012.

ESPINOZA-LUQUE, A. F.; AL-QADI, I. L.; OZER, H. **Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability.** Construction and Building Materials, v. 179, p. 642–648, 10 ago. 2018.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** Dissertação de mestrado. Santa Maria/RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

FACCIN, C. et al. **Mapas de grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil.** 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2021.

FACCIN, C. **Seleção de ligantes e dosagem balanceada de misturas asfálticas com foco em desempenho para o Brasil.** Projeto de Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

FARROKHZADE, F.; SABOURI, M.; TABATABAEE, N. **Aging characteristics of neat and modified asphalt binders based on rheological evaluations at intermediate temperatures.** Construction and Building Materials, v. 322, p. 126387, 7 mar. 2022.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers.** Physicochemical Behavior and Supramolecular Organization of Polymers. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9372-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9372-2_2)

FRANCO, F. A. C. D. P.; MOTTA, L. M. G. DA. **Manual de utilização do programa MeDiNa.** 2020.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

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 – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

FRITZEN, M. A. et al. **Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga.** Anais do Congresso Rodoviário Português. Lisboa: 2019.

GASPAR, M. S. et al. **Effect of Different Creep and Recovery Times on the MSCR Test for Highly Modified Asphalt Binder Introduction and Background.** Journal of Testing and Evaluation, v. 49, 2021.

GHUZLAN, K. A.; AL-KHATEEB, G. G. **Selection and verification of performance grading for asphalt binders produced in Jordan.** International Journal of Pavement Engineering, v. 14, n. 1–2, p. 116–124, jan. 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.650697>

GLOVER, C. J. et al. **Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation.** Report FHWA/TX-05/1872-2, 2005.

GOLALIPOUR, A. et al. **Critical Considerations toward Better Implementation of the Multiple Stress Creep and Recovery Test.** Journal of Materials and Civil Engineering, v. 29, n. 5, 2017.

GOMES, O. J. DE F.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. S. **The Effect of Mix Constituents in the Permanent Deformation Resistance of Asphalt Mixtures.** RILEM Bookseries, v. 27, p. 1791–1798, 2022.

GUNDLA, A. et al. **Implementation of the AASHTO M 332 Specification: A Case Study.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2674, n. 9, p. 959–971, 2020.

HAIJ, R. et al. **Considerations for using the 4 mm Plate Geometry in the Dynamic Shear Rheometer for Low Temperature Evaluation of Asphalt Binders.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2673, n. 11, p. 649–659, 19 jun. 2019.

HAMDOU, H. M.; ISMAEL, M. Q.; ABED, M. A. **Effect of Polymers on Permanent**

**Deformation of Flexible Pavement.** Journal of Engineering, v. 20, n. 12, 2014.

**HAMED M. H. ALANI, A. H. A. AND A. S. A. The Transition to a PG Grading System for Asphalt Cement in Iraq.** Journal of Engineering, v. 16, n. 4, 2010.

**HARVEY, J. J. et al. Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California.** Berkeley: Report No. RTA65W485-2, 1995.

**HASSANPOUR-KASANAGH, S. et al. Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS).** Construction and Building Materials, v. 230, n. 117047, 10 jan. 2020.

**HINTZ, C. et al. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification.** Transportation Research Record, v. 2207, n. 1, p. 99–106, 1 dez. 2011.

**HINTZ, C. Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue.** Tese de doutorado. Madison, Wisconsin, EUA: University of Wisconsin, 2012.

**HUANG, S.-C.; DI BENEDETTO, H. Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction.** 2015.

**HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. The Shell bitumen handbook.** 2015.

**HVEEM, F. N. Pavement deflection and fatigue failures.** Bulletin 114, p. 43–87, 1955.

**ILHA, P. S. Caracterização de rigidez, deformação permanente, fadiga e análises mecânicas de pavimentos com misturas asfálticas produzidas em campo e laboratório.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.

**JING, R. et al. Laboratory and Field Aging Effect on Bitumen Chemistry and Rheology in Porous Asphalt Mixture.** Transportation Research Record, v. 2673, n. 3, p. 365–374, 1 mar. 2019.

**JOHNSON, C.; BAHIA, H. U. Evaluation of an Accelerated Procedure for Fatigue Characterization of Asphalt Binders.** Road Materials and Pavement Design, 2010.

**JOHNSON, C. M. Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method.** PhD Thesis. University of Wisconsin, Madison, 2010.

**KATAWARE, A. V.; SINGH, D. Rheological Performance of Asphalt Binders Under Different Creep and Recovery Periods in MSCR Test.** International Journal of Pavement Research and Technology, v. 8, n. 6, p. 410–418, 2015.

**KATBEH, J. et al. A framework for the analysis of damage and healing viscoelastic behaviour of asphalt binders.** Construction and Building Materials, v. 374, p. 130908, 17 abr. 2023.

- KHALIL, N. J.; BAHIA, H. **Developing a performance grading system for asphalt binders in Lebanon.** The Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control- Mairepav6, 2009.
- KIM, S.-S. **Direct Measurement of Asphalt Binder Thermal Cracking.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 17, n. 6, p. 632–639, 2005.
- KIM, W. J. et al. **Calibration and validation of a rutting model based on shear stress to strength ratio for asphalt pavements.** Construction and Building Materials, v. 149, p. 327–337, 15 set. 2017.
- KIM, Y.-R.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. **Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 15, n. 1, p. 75–83, 2003.
- KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete.** 1o ed. McGraw-Hill Education, 2009.
- KIM, Y. R.; KIM, N.; KHOSLA, N. P. Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete. ASTM Special Technical Publication, n. 1147, p. 310–328, 1992.
- KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. **One Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete.** Journal of Engineering Mechanics, v. 116, n. 4, p. 751–772, 1990.
- KING, G. et al. **Using black space diagrams to predict Age-induced cracking.** 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, v. 4, p. 453–463, 2012.
- KRIZ, P. et al. Transition to Superpave Performance Grades in Western Canada. Canadian Technical Asphalt Association, n. October, 2012.
- KRIZ, P.; REINKE, G.; ANDERSON, M. **Asphalt Institute DSR-PAV TF Outcomes & Recommendation.** 2019.
- LEE, H.-J.; KIM, Y. R. **Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading.** Journal of Engineering Mechanics, v. 124, n. 1, p. 32–40, 1998.
- LEE, J. S. et al. **Asphalt binder performance grading of North Korea for Superpave asphalt mix-design.** International Journal of Pavement Research and Technology, v. 11, n. 6, p. 647–654, 1 nov. 2018.
- LEITE, L. F. M. **Estudos de prepare e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** Tese de doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1999.
- LEITE, L. F. M.; OSMARI, P. H.; ARAGÃO, F. T. S. **Rheological indexes for asphalt binders considering different aging conditions: Evaluation and correlations with performance.** Construction and Building Materials, v. 338, p. 127549, 4 jul. 2022.
- LEITE, L. F. M.; TONIAL, I. A. **Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as**

**especificações SHRP.** 12o Encontro do asfalto do instituto brasileiro de petróleo, 1994.

LIU, H.; LUO, R. **Development of failure criterion and fatigue model to characterize the fatigue resistance of asphalt binders under controlled-stress time sweep tests.** *Materials and Structures*, v. 53, n. 5, p. 1–12, 2020.

LOVE, A. E. H. **Treatise on mathematical theory of elasticity.** 4 ed. New York: Dover: University Press, 1944.

**LTPPBIND VERSÃO 2.1. By Pavement Systems LLC for the Federal Highway Administration.** McLean, VA: 1999.

LUZZI, F. Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

MAJIDIFARD, H. et al. **Developing a prediction model for rutting depth of asphalt mixtures using gene expression programming.** *Construction and Building Materials*, v. 267, n. 120543, p. 1–10, 2021.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** Tese de doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2014.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MCGENNIS, R. B.; SHULER, S.; BAHIA, H. U. **Background of Superpave asphalt binder test methods.** Publication No. FHWA-SA-95-003, 1995.

MEDINA, J. **Fundamentos da Mecânica de Pavimentos.** Coppe/UFRJ, 1988.

MEDINA, J. **Mecânica de Pavimentos.** 1º ed ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MICHAEL FARRAR et al. **Determining the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).** *Fundamental Properties of Asphalts and Modified Asphalts III Product.* Federal Highway Administration Contract No. DTFH61-07-D-00005, 2015.

MINER, M. A. **Cumulative Damage in Fatigue.** *Journal of Applied Mechanics*, v. 12, n. 3, p. A159–A164, 1945.

MOGAWER, W. S. et al. **Influence of asphalt binder formulation and source on the performances of binders with the same continuous PG.** *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, v. 87, p. 305–343, 2018.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOURA, E. DE. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, J. W. S. DO. **Estudo entre escalas de ligantes e misturas: investigação do comportamento viscoelástico linear e parâmetros de dano dos materiais asfálticos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

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. UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. et al. **Uso da tomografia computadorizada e de imagens digitais para o estudo de misturas asfálticas.** Anais do 18º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro: IBP: 2006.

NASCIMENTO, L. A. H. DO. **Crítérios Para Flow Number - Camada Final De Revestimento Asfáltico.** Relatório Interno, CENPES - PETROBRAS. Rio de Janeiro, RJ: 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. et al. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras.** Anais do 21o Encontro de Asfalto do IBP. 2014.

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, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. DO. **Caracterização avançada de materiais asfálticos: dano por fadiga.** Curso. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização de Ligantes Asfálticos por meio do Ensaio LAS: Processamento dos Resultados.** Apresentação no Seminário do IBP. Evento Online. 2021a.

NASCIMENTO, L. A. H. **Apresentação Petrobrás - Nova função de transferência.** Reunião do dia 16/08/2021, 2021b.

NAVARRO, R. F. **Modelos Viscoelásticos Aplicáveis a Materiais Reais: uma Revisão.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 12, n. 1, p. 1–20, 2017.

NUNES-RAMOS, V. **O uso de polietileno de alta densidade como modificador do cimento asfáltico de petróleo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS., 2022.

OLARD, F. et al. **Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at**

**Low and Intermediate Temperatures.** Road Materials and Pavement Design, v. 4, n. 1, p. 77–107, 2011. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2003.9689941>

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, v. 4, n. 2, p. 185–224, 30 jun. 2003.

OLIVEIRA, A. A. DE. **Estudo da rigidez e da resistência ao dano de misturas asfálticas com ligantes modificados por borracha e polímero.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2012.

PALMGREN, A. G. **Die Lebensdauer von Kugellagem.** Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, v. 68, p. 339–341, 1924.

PARK, H. J.; KIM, Y. R. **Primary causes of cracking of asphalt pavement in North Carolina: field study.** International Journal of Pavement Engineering, v. 16, p. 684–698, 2014.

PELL, P. S. **Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes.** International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, MI: 1962

PETERSEN, J. C. et al. **Binder Characterization and Evaluation.** Volume 1. Washington, D. C.: 1994.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** Tese de doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PIRES, D. M. **Estudo da deformação permanente de concretos asfálticos aplicados em campo.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

PIRES, D. M. et al. **Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach.** Construction and Building Materials, v. 325, n. January, p. 126763, 2022.

POSSEBON, E. P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

POSSEBON, É. P. **Advanced characterization of Brazilian bitumens and mixtures.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

PREUSSLER, E. S.; PINTO, S.; MEDINA, J. **Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos.** Anais da 16a Reunião Anual de Pavimentação da ABPv, Recife, PE: 1981.

PRONK, A. C.; HOPMAN, P. C. **Energy dissipation: the leading factor of fatigue.** Highway Research: Sharing the Benefits: Proceedings of a Conference of the United States Strategic Highway Research Program. London: Telford, 1990.

RATH, P. et al. **Performance Analysis of Asphalt Mixtures Modified with Ground Tire Rubber Modifiers and Recycled Materials.** Sustainability, v. 11, n. 6, p. 1792, 2019.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot Mix Asphalt Material Mixture Design and Construction**, 2<sup>a</sup> ed., 1996.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro., 1991.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

ROWE, G. M. **Prepared discussion for the AAPT paper by Anderson et al.: Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 80, p. 649–662, 2011.

ROWE, G. M.; KING, G.; ANDERSON, M. **The influence of binder rheology on the cracking of asphalt mixes in airport and highway projects.** Journal of Testing and Evaluation, v. 42, n. 5, 2014.

RUAN, Y.; DAVISON, R. R.; GLOVER, C. J. **An Investigation of Asphalt Durability: Relationships Between Ductility and Rheological Properties for Unmodified Asphalts.** Petroleum Science and Technology, v. 21, n. 1–2, p. 231–254, 2003.

SABOURI, M.; KIM, Y. R. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading.** Transportation Research Record, v. 2447, p. 117–125, 2014.

SAFAEI, F. et al. **Implications of Warm-Mix asphalt on long term oxidative aging and fatigue performance of asphalt binders and mixtures.** Road Materials and Pavement Design, v. 5, n. sup1, p. 45–61, 2014.

SAFAEI, F.; CASTORENA, C.; KIM, Y. R. **Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling.** Mechanics of Time-Dependent Materials, v. 20, n. 3, p. 299–323, 1 ago. 2016.

SALEH, A. M. M.; TRAD, M. A. **Generation of asphalt performance grading map for Egypt based on the SUPERPAVE™ program.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 5, p. 2248–2253, 1 maio 2011.

SANTOS, A. B. V. **Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos : Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de PósGraduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2020.

SANTOS, M. S. DOS. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria - RS.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

SCHAPERLY, R. A. **On Viscoelastic Deformation and Failure Behavior of Composite Materials with Distributed Flaws.** (S. S. Wang, W. J. Renton, Eds.). Advances in Aerospace Structures and Materials, Aerospace Structures and Materials, Vol. -AD-01. 1981.

SCHERER, R. G. **Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

SCHUSTER, S. L. **Influência da adição de areia nos parâmetros mecânicos e na resistência a. Deformação permanente de uma mistura asfáltica.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

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. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SCHUSTER, S. L. et al. **Fatigue behaviour of plant produced asphalt mixtures through viscoelastic continuum damage model.** Road Materials and Pavement Design, p. 1–27, 2021.

SCHUSTER, S. L. **Investigation of the aging phenomenon in asphalt binders and asphalt mixtures: linear viscoelastic behavior and performance properties.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

SILVA, P. F. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos.** 2. ed. São Paulo: 2008.

SOARES, J. B. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas com variação de granulometria e de CAP.** 15° Encontro de Asfalto, IBP. 2000.

SOLAIMANIAN, M. et al. **Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements.** Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements – A National Seminar. Transportation Research Board, 2003.

SOONG-DER CHEN. **A new image quality measure for assessment of histogram equalization-based contrast enhancement techniques.** Digital Signal Processing, v. 22, n. 4, p. 640–647, 2012.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

SPECHT, L. P. et al. **Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes.** *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 648–658, 15 set. 2017.

SPEIGHT, J. G. **Asphalt Materials Science and Technology.** Elsevier, 2015.

SRINIVASAN, G. **Evaluation of indirect tensile strength to identify asphalt concrete rutting potential.** Dissertação de mestrado. West Virginia University, 2004.

SUI, C. et al. **New Technique for Measuring Low-Temperature Properties of Asphalt Binders with Small Amounts of Material.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2179, n. 1, p. 23–28, 2010.

SUI, C. et al. **New Low-Temperature Performance-Grading Method.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2207, n. 1, p. 43–48, 1 jan. 2011.

TAYEBALI, A. A. et al. **Modeling Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures.** *Proceedings Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT*, v. 62.1993.

TAYEBALI, A. A. et al. **Fatigue response of asphalt aggregate mixtures.** Berkeley: SHRPA-404, 1994.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **TRB: Glossary of terms for Balanced Design of Asphalt Mixtures.** *Transportation Research Circular E-C280*, p. 1–25, 2022.

UNDERWOOD, B.; BAEK, C.; KIM, Y. **Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis.** *Transportation Research Record*, n. 2296, p. 36–45, 2012.

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

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale modeling approach for asphalt concrete and its implications on oxidative aging.** In: Shin-Che Huang And Hervé Di Benedetto (Ed.). *Advances in Asphalt Materials Road and Pavement Construction.* Woodhead Publishing, 2015. p. 273–302.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. **Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete.** 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos: 2009.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model.** International Journal of Pavement Engineering, v. 11, p. 459–476, 2010.

VESTENA, P. M. **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, Santa Maria, RS, 2018.

VESTENA, P. M. et al. **Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: Error analysis in different models and field scenarios.** Construction and Building Materials, v. 301, n. 124343, 2021.

VESTENA, P. M. **Misturas integralmente recicladas: comportamento à fadiga e Degree of Binder Activity.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

VIEIRA, R. S. **Estudo da influência da areia natural na resistência a fadiga de misturas asfálticas por meio da teoria viscoelástica do dano contínuo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

WALUBITA, L. F. et al. **Correlations and preliminary validation of the laboratory monotonic overlay test (OT) data to reflective cracking performance of in-service field highway sections.** Construction and Building Materials, v. 267, p. 121029, 18 jan. 2021.

WANG, C. et al. **Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading.** Road Materials and Pavement Design, v. 84, n. sup2, p. 269–300, 2015.

WANG, Y. D. et al. **Development of a Performance-Volumetric Relationship for Asphalt Mixtures.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2673, n. 6, p. 416–430, 2019.

WASAGE, T. L. J.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. **Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test.** International Journal of Pavement Engineering, v. 12, n. 6, p. 561–568, 2011.

WHITE, G. **Grading highly modified binders by multiple stress creep recovery.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. 6, p. 1322–1337, 2 nov. 2016.

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, v. 77, n. 14, p. 3701–3707, 1955.

WITCZAK, M. W. et al. **Simple performance test for Superpave mix design.** Washington, D. C., EUA: 2002.

WÖHLER, A. **Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl.** Zeitschrift für Bauwesen, v. 20, 1870.

XU, J. et al. **Predicting the low-temperature performance of asphalt binder based on rheological model.** Construction and Building Materials, v. 302, p. 124401, 4 out. 2021.

YANG, K. et al. **Correlation of asphalt binder linear viscoelasticity (LVE) parameters and the ranking consistency related to fatigue cracking resistance.** Construction and Building Materials, v. 322, p. 126450, 7 mar. 2022a.

YANG, K. et al. **Effect of laboratory oxidative aging on dynamic shear rheometer measures of asphalt binder fatigue cracking resistance.** Construction and Building Materials, v. 337, p. 127566, 27 jun. 2022.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** 2a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975.

YOUSEFI, A. A. et al. **Performance of warm asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, an anti-stripping agent, and recycling agents: A study using a balanced mix design approach.** Construction and Building Materials, v. 363, n. 129633, 11 jan. 2023.

YUSOFF, N. I. M.; SHAW, M. T.; AIREY, G. D. **Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 5, p. 2171-2189, 2011.

ZEIADA, W. et al. **Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization.** Construction and Building Materials, v. 319, p. 126063, 14 fev. 2022.

ZHANG, H. et al. **Study of the high and low-temperature behavior of asphalt based on a performance grading system in Northeast China.** Construction and Building Materials, v. 254, 2020.

ZHANG, J. et al. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading.** Road Materials and Pavement Design, v. 14, n. May, p. 1–15, 2013.

ZHANG, J. et al. **Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study.** Construction and Building Materials, v. 94, p. 218–227, 30 set. 2015.

ZHANG, R. et al. **Evaluation of the correlations between laboratory measured material properties with field cracking performance for asphalt pavement.** Construction and Building Materials, v. 301, p. 124126, 27 set. 2021.

ZHOU, F. et al. **High RAP mixes design methodology with balanced performance.** Report n° FHWA/TX-11/0-6092-2. Federal Highway Administration. United States: 2011.

ZHOU, F.; HU, S.; SCULLION, T. **Balanced RAP/RAS mix design and performance evaluation system for project-specific service conditions.** Report n° FHWA/TX-13/0-6092-

3. Dept. of Transportation. Research and Technology Implementation Office. Texas: 2012.

**APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE  
CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (VIRGEM)**

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 30/45 B VG</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	27962519	41,74
5	0,127	31343681	40,75
5	0,161	34976552	39,76
5	0,204	38911761	38,81
5	0,259	43120712	37,86
5	0,328	47628896	36,96
5	0,416	52490773	36,07
5	0,528	57717542	35,2
5	0,669	63314087	34,33
5	0,849	69279309	33,48
5	1,08	75637846	32,65
5	1,37	82395815	31,82
5	1,73	89531007	31,01
5	2,2	97068947	30,2
5	2,79	105000287	29,4
5	3,53	113373290	28,61
5	4,48	122164458	27,83
5	5,68	131351296	27,05
5	7,21	140947913	26,27
5	9,14	150956295	25,49
5	11,6	161344440	24,72
5	14,7	172115473	23,94
5	18,7	183266172	23,17
5	23,7	194747370	22,39
5	30	206615328	21,62
15	0,1	4292352	57,04
15	0,127	5041863	55,91
15	0,161	5887034	54,73
15	0,204	6839577	53,64
15	0,259	7904657	52,54
15	0,328	9097929	51,44
15	0,416	10431664	50,39
15	0,528	11921068	49,34
15	0,669	13582019	48,31
15	0,849	15428916	47,3
15	1,08	17475808	46,3
15	1,37	19737477	45,32
15	1,73	22230018	44,36
15	2,2	24970206	43,41
15	2,79	27978911	42,47
15	3,53	31274204	41,54
15	4,48	34873794	40,62
15	5,68	38794019	39,71
15	7,21	43051345	38,8
15	9,14	47661421	37,9
15	11,6	52642802	37
15	14,7	58018374	36,11
15	18,7	63810758	35,21
15	23,7	70032442	34,31
15	30	76729565	33,41

25	0,1	452245	69,72
25	0,127	548184	69,02
25	0,161	661486	68,34
25	0,204	795984	67,53
25	0,259	954962	66,79
25	0,328	1141638	65,98
25	0,416	1361666	65,13
25	0,528	1618394	64,24
25	0,669	1920102	63,32
25	0,849	2271601	62,39
25	1,08	2679703	61,43
25	1,37	3152310	60,44
25	1,73	3697614	59,44
25	2,2	4324951	58,43
25	2,79	5044028	57,4
25	3,53	5865830	56,37
25	4,48	6802024	55,33
25	5,68	7865837	54,28
25	7,21	9071199	53,24
25	9,14	10433644	52,19
25	11,6	11971661	51,13
25	14,7	13705880	50,08
25	18,7	15657244	49,02
25	23,7	17853300	47,99
25	30	20340462	46,95
35	0,1	29468	79,51
35	0,127	36567	79,08
35	0,161	45240	78,56
35	0,204	55854	78,05
35	0,259	68760	77,53
35	0,328	84469	77,01
35	0,416	103594	76,48
35	0,528	126846	75,94
35	0,669	155116	75,34
35	0,849	189425	74,79
35	1,08	230919	74,15
35	1,37	281028	73,57
35	1,73	341298	72,9
35	2,2	413797	72,23
35	2,79	500755	71,53
35	3,53	604752	70,79
35	4,48	728715	70,02
35	5,68	876140	69,21
35	7,21	1050775	68,36
35	9,14	1256947	67,47
35	11,6	1499937	66,53
35	14,7	1784830	65,55
35	18,7	2117291	64,54
35	23,7	2503868	63,46
35	30	2950759	62,34
45	0,1	4403	83,96
45	0,127	5498	83,67
45	0,161	6855	83,29
45	0,204	8537	82,9
45	0,259	10626	82,5
45	0,328	13218	82,08

45	0,416	16419	81,66
45	0,528	20366	81,23
45	0,669	25231	80,79
45	0,849	31217	80,34
45	1,08	38573	79,89
45	1,37	47604	79,43
45	1,73	58681	78,95
45	2,2	72252	78,46
45	2,79	88856	77,97
45	3,53	109131	77,46
45	4,48	133843	76,94
45	5,68	163904	76,4
45	7,21	200432	75,85
45	9,14	244703	75,27
45	11,6	298267	74,66
45	14,7	362909	74,04
45	18,7	440745	73,38
45	23,7	534297	72,69
45	30	646452	71,98
55	0,1	760	86,86
55	0,127	956	86,71
55	0,161	1201	86,45
55	0,204	1509	86,2
55	0,259	1896	85,91
55	0,328	2379	85,62
55	0,416	2982	85,3
55	0,528	3735	84,98
55	0,669	4673	84,65
55	0,849	5841	84,3
55	1,08	7297	83,95
55	1,37	9106	83,58
55	1,73	11355	83,21
55	2,2	14143	82,82
55	2,79	17600	82,43
55	3,53	21879	82,03
55	4,48	27166	81,61
55	5,68	33689	81,19
55	7,21	41733	80,76
55	9,14	51627	80,3
55	11,6	63818	79,84
55	14,7	78828	79,39
55	18,7	97244	78,91
55	23,7	119734	78,52
55	30	147362	78,06
65	0,1	163	88,31
65	0,127	206	88,23
65	0,161	260	88,09
65	0,204	328	87,97
65	0,259	415	87,87
65	0,328	524	87,69
65	0,416	660	87,45
65	0,528	832	87,31
65	0,669	1048	87,08
65	0,849	1319	86,85
65	1,08	1658	86,61
65	1,37	2084	86,36

65	1,73	2618	86,09
65	2,2	3286	85,82
65	2,79	4121	85,55
65	3,53	5165	85,26
65	4,48	6467	84,98
65	5,68	8092	84,7
65	7,21	10117	84,43
65	9,14	12638	84,18
65	11,6	15775	83,95
65	14,7	19682	83,74
65	18,7	24551	83,58
65	23,7	30646	83,35
65	30	38053	83,7

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 50/70 PA 85 VG**

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	36275319	45,19
5	0,127	40823695	43,83
5	0,161	45792917	42,46
5	0,204	51111008	41,15
5	0,259	56906113	39,83
5	0,328	63148490	38,53
5	0,416	69771240	37,28
5	0,528	76836929	36,05
5	0,669	84272139	34,85
5	0,849	92203166	33,67
5	1,08	100574065	32,52
5	1,37	109389390	31,39
5	1,73	118578164	30,29
5	2,2	128149927	29,21
5	2,79	138110700	28,15
5	3,53	148425130	27,13
5	4,48	159033659	26,13
5	5,68	169968553	25,15
5	7,21	181204178	24,19
5	9,14	192685342	23,25
5	11,6	204395449	22,33
5	14,7	216337020	21,43
5	18,7	228441862	20,56
5	23,7	240649042	19,69
5	30	252968177	18,85
15	0,1	4791190	63,95
15	0,127	5700671	62,68
15	0,161	6746921	61,35
15	0,204	7945015	60,02
15	0,259	9317255	58,68
15	0,328	10878386	57,3
15	0,416	12650751	55,94
15	0,528	14657344	54,57
15	0,669	16911286	53,2
15	0,849	19441700	51,83
15	1,08	22263396	50,47
15	1,37	25394054	49,11
15	1,73	28859387	47,76
15	2,2	32680205	46,41
15	2,79	36878128	45,08

15	3,53	41464422	43,76
15	4,48	46454294	42,46
15	5,68	51863297	41,16
15	7,21	57693927	39,88
15	9,14	63974210	38,65
15	11,6	70691486	37,41
15	14,7	77858052	36,18
15	18,7	85472106	34,97
15	23,7	93528938	33,78
15	30	102018606	32,62
25	0,1	501184	75,06
25	0,127	615125	74,6
25	0,161	751365	73,98
25	0,204	917446	73,31
25	0,259	1116763	72,54
25	0,328	1355656	71,76
25	0,416	1641890	70,87
25	0,528	1983113	69,93
25	0,669	2389085	68,92
25	0,849	2869584	67,85
25	1,08	3435412	66,74
25	1,37	4099807	65,58
25	1,73	4875952	64,37
25	2,2	5778563	63,13
25	2,79	6823949	61,86
25	3,53	8029514	60,57
25	4,48	9413269	59,26
25	5,68	10995714	57,94
25	7,21	12797722	56,6
25	9,14	14839011	55,26
25	11,6	17143789	53,91
25	14,7	19732820	52,57
25	18,7	22629065	51,23
25	23,7	25864882	49,92
25	30	29460941	48,66
35	0,1	63198	74,5
35	0,127	76947	74,95
35	0,161	93917	75,19
35	0,204	114695	75,33
35	0,259	140078	75,4
35	0,328	171055	75,4
35	0,416	208961	75,34
35	0,528	255225	75,19
35	0,669	311602	75,02
35	0,849	380039	74,76
35	1,08	463364	74,42
35	1,37	564048	74
35	1,73	685960	73,49
35	2,2	832951	72,92
35	2,79	1009368	72,27
35	3,53	1220229	71,52
35	4,48	1470853	70,66
35	5,68	1767434	69,68
35	7,21	2117425	68,59
35	9,14	2528211	67,41
35	11,6	3007134	66,13

35	14,7	3562171	64,76
35	18,7	4198180	63,32
35	23,7	4923166	61,81
35	30	5775293	60,35
45	0,1	11876	70,2
45	0,127	14240	71,21
45	0,161	17167	71,97
45	0,204	20739	72,65
45	0,259	25111	73,25
45	0,328	30475	73,79
45	0,416	37046	74,27
45	0,528	45080	74,68
45	0,669	54921	75,04
45	0,849	66975	75,33
45	1,08	81730	75,54
45	1,37	99795	75,72
45	1,73	121929	75,84
45	2,2	149071	75,89
45	2,79	182306	75,87
45	3,53	222872	75,79
45	4,48	272451	75,65
45	5,68	332895	75,43
45	7,21	406443	75,14
45	9,14	495764	74,78
45	11,6	603970	74,35
45	14,7	734655	73,85
45	18,7	891970	73,27
45	23,7	1080921	72,6
45	30	1306279	71,85
55	0,1	3066	63,76
55	0,127	3596	65,29
55	0,161	4246	66,54
55	0,204	5036	67,66
55	0,259	5999	68,7
55	0,328	7170	69,66
55	0,416	8594	70,54
55	0,528	10329	71,36
55	0,669	12443	72,11
55	0,849	15032	72,81
55	1,08	18200	73,45
55	1,37	22080	74,03
55	1,73	26837	74,55
55	2,2	32673	75,02
55	2,79	39829	75,43
55	3,53	48618	75,78
55	4,48	59408	76,07
55	5,68	72651	76,3
55	7,21	88925	76,48
55	9,14	108883	76,6
55	11,6	133328	76,72
55	14,7	163323	76,73
55	18,7	200036	76,68
55	23,7	244951	76,58
55	30	299781	76,42
65	0,1	1100	56,87

65	0,127	1248	58,72
65	0,161	1433	60,3
65	0,204	1660	61,79
65	0,259	1932	63,17
65	0,328	2260	64,47
65	0,416	2657	65,7
65	0,528	3136	66,84
65	0,669	3718	67,94
65	0,849	4426	68,96
65	1,08	5285	69,9
65	1,37	6331	70,79
65	1,73	7606	71,62
65	2,2	9163	72,4
65	2,79	11065	73,11
65	3,53	13395	73,76
65	4,48	16248	74,37
65	5,68	19748	74,94
65	7,21	24047	75,45
65	9,14	29332	75,92
65	11,6	35836	76,34
65	14,7	43846	76,71
65	18,7	53719	77
65	23,7	65926	77,33
65	30	80687	77,85

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 A VG**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\varphi$ (°)
5	0,1	14138056	51,85
5	0,127	16310334	50,58
5	0,161	18697424	49,25
5	0,204	21336764	47,98
5	0,259	24248809	46,73
5	0,328	27436182	45,5
5	0,416	30906355	44,3
5	0,528	34697657	43,11
5	0,669	38836981	41,95
5	0,849	43327776	40,79
5	1,08	48191590	39,65
5	1,37	53443727	38,53
5	1,73	59092025	37,43
5	2,2	65138757	36,34
5	2,79	71590222	35,27
5	3,53	78440120	34,21
5	4,48	85716339	33,17
5	5,68	93403732	32,15
5	7,21	101494418	31,14
5	9,14	109994305	30,14
5	11,6	118912244	29,16
5	14,7	128234364	28,18
5	18,7	137915554	27,22
5	23,7	148026254	26,26
5	30	158481588	25,31
15	0,1	1554047	67,67
15	0,127	1880442	66,81
15	0,161	2264378	65,86
15	0,204	2712889	64,86

15	0,259	3235507	63,78
15	0,328	3841482	62,72
15	0,416	4544632	61,59
15	0,528	5357466	60,45
15	0,669	6292083	59,28
15	0,849	7362986	58,09
15	1,08	8587074	56,88
15	1,37	9977860	55,66
15	1,73	11553516	54,44
15	2,2	13329452	53,21
15	2,79	15325852	51,98
15	3,53	17561683	50,76
15	4,48	20057631	49,53
15	5,68	22834230	48,31
15	7,21	25910759	47,09
15	9,14	29304219	45,88
15	11,6	33032940	44,67
15	14,7	37124221	43,46
15	18,7	41599415	42,26
15	23,7	46473609	41,08
15	30	51786298	39,91
25	0,1	141593	73,38
25	0,127	173816	73,43
25	0,161	212931	73,52
25	0,204	260868	73,39
25	0,259	318706	73,23
25	0,328	387909	72,87
25	0,416	472834	72,62
25	0,528	574078	72,26
25	0,669	698328	71,77
25	0,849	846392	71,25
25	1,08	1024879	70,65
25	1,37	1238520	69,99
25	1,73	1493619	69,26
25	2,2	1796832	68,46
25	2,79	2157302	67,58
25	3,53	2583627	66,65
25	4,48	3085661	65,66
25	5,68	3675514	64,6
25	7,21	4365839	63,47
25	9,14	5172318	62,3
25	11,6	6111517	61,07
25	14,7	7202440	59,79
25	18,7	8469424	58,46
25	23,7	9945873	57,06
25	30	11675255	55,59
35	0,1	17855	72,73
35	0,127	21706	73,11
35	0,161	26411	73,41
35	0,204	32133	73,7
35	0,259	39109	73,97
35	0,328	47641	74,2
35	0,416	58079	74,41
35	0,528	70835	74,59
35	0,669	86430	74,73
35	0,849	105500	74,8

35	1,08	128807	74,88
35	1,37	157288	74,88
35	1,73	192059	74,83
35	2,2	234494	74,71
35	2,79	286240	74,56
35	3,53	349238	74,33
35	4,48	425814	74,03
35	5,68	518669	73,67
35	7,21	631065	73,24
35	9,14	766706	72,73
35	11,6	929936	72,15
35	14,7	1125491	71,48
35	18,7	1357709	70,68
35	23,7	1633541	69,75
35	30	1960451	68,75
45	0,1	3923	69,71
45	0,127	4721	70,17
45	0,161	5690	70,58
45	0,204	6861	70,97
45	0,259	8280	71,36
45	0,328	10005	71,75
45	0,416	12106	72,13
45	0,528	14660	72,5
45	0,669	17769	72,86
45	0,849	21558	73,21
45	1,08	26179	73,55
45	1,37	31823	73,88
45	1,73	38719	74,18
45	2,2	47158	74,46
45	2,79	57482	74,71
45	3,53	70129	74,92
45	4,48	85615	75,1
45	5,68	104599	75,24
45	7,21	127855	75,32
45	9,14	156337	75,36
45	11,6	191172	75,34
45	14,7	233759	75,26
45	18,7	285784	75,12
45	23,7	349267	74,91
45	30	426615	74,65
55	0,1	1088	66,23
55	0,127	1300	66,99
55	0,161	1557	67,61
55	0,204	1866	68,17
55	0,259	2240	68,69
55	0,328	2690	69,15
55	0,416	3234	69,61
55	0,528	3892	70,03
55	0,669	4689	70,43
55	0,849	5655	70,83
55	1,08	6822	71,23
55	1,37	8240	71,62
55	1,73	9962	72,01
55	2,2	12055	72,41
55	2,79	14603	72,8
55	3,53	17709	73,18

55	4,48	21501	73,56
55	5,68	26133	73,93
55	7,21	31800	74,29
55	9,14	38735	74,63
55	11,6	47234	74,93
55	14,7	57673	75,23
55	18,7	70510	75,5
55	23,7	86317	75,78
55	30	105846	76,09
65	0,1	373	61,23
65	0,127	440	62,36
65	0,161	521	63,41
65	0,204	619	64,46
65	0,259	737	65,35
65	0,328	879	66,18
65	0,416	1051	66,88
65	0,528	1258	67,55
65	0,669	1509	68,16
65	0,849	1812	68,69
65	1,08	2177	69,19
65	1,37	2620	69,63
65	1,73	3153	70,05
65	2,2	3797	70,45
65	2,79	4576	70,85
65	3,53	5521	71,25
65	4,48	6665	71,65
65	5,68	8055	72,07
65	7,21	9746	72,51
65	9,14	11807	72,97
65	11,6	14322	73,49
65	14,7	17405	74,03
65	18,7	21204	74,6
65	23,7	25916	75,21
65	30	31841	76,06

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 B VG**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	3893436	44,63
5	0,127	4407628	44,12
5	0,161	4973060	43,58
5	0,204	5590438	43,06
5	0,259	6273337	42,55
5	0,328	7032308	42,04
5	0,416	7871212	41,55
5	0,528	8793495	41,06
5	0,669	9804441	40,58
5	0,849	10915442	40,12
5	1,08	12135186	39,63
5	1,37	13469613	39,17
5	1,73	14939201	38,7
5	2,2	16548357	38,24
5	2,79	18308360	37,78
5	3,53	20229454	37,31
5	4,48	22326031	36,85
5	5,68	24601687	36,39
5	7,21	27087307	35,92

5	9,14	29790280	35,45
5	11,6	32735209	34,97
5	14,7	35935593	34,48
5	18,7	39420682	33,97
5	23,7	43222170	33,46
5	30	47374018	32,96
15	0,1	688546	51,77
15	0,127	795258	51,51
15	0,161	914828	51,12
15	0,204	1051106	50,81
15	0,259	1204473	50,42
15	0,328	1379191	50,07
15	0,416	1575727	49,68
15	0,528	1798100	49,3
15	0,669	2049575	48,9
15	0,849	2333484	48,48
15	1,08	2653956	48,07
15	1,37	3014439	47,64
15	1,73	3420286	47,19
15	2,2	3874800	46,75
15	2,79	4385065	46,3
15	3,53	4956931	45,83
15	4,48	5596056	45,36
15	5,68	6310654	44,87
15	7,21	7109044	44,37
15	9,14	8002267	43,85
15	11,6	9002330	43,32
15	14,7	10121840	42,77
15	18,7	11378927	42,21
15	23,7	12804319	41,62
15	30	14440964	40,98
25	0,1	113600	55,58
25	0,127	133492	55,55
25	0,161	155733	55,45
25	0,204	181021	55,53
25	0,259	209554	55,41
25	0,328	243556	55,48
25	0,416	282258	55,35
25	0,528	326766	55,26
25	0,669	379371	55,12
25	0,849	439723	54,98
25	1,08	508700	54,79
25	1,37	588437	54,6
25	1,73	681044	54,38
25	2,2	787149	54,11
25	2,79	909764	53,81
25	3,53	1050609	53,48
25	4,48	1212956	53,13
25	5,68	1400130	52,69
25	7,21	1615957	52,21
25	9,14	1865622	51,64
25	11,6	2154696	51,04
25	14,7	2492971	50,31
25	18,7	2894387	49,54
25	23,7	3377932	48,6
25	30	3993956	47,33

35	0,1	20755	56,18
35	0,127	24151	56,43
35	0,161	28102	56,63
35	0,204	32691	56,83
35	0,259	38035	57,03
35	0,328	44266	57,21
35	0,416	51535	57,39
35	0,528	60015	57,56
35	0,669	69914	57,71
35	0,849	81464	57,84
35	1,08	94949	57,95
35	1,37	110673	58,04
35	1,73	129031	58,12
35	2,2	150437	58,17
35	2,79	175417	58,19
35	3,53	204465	58,2
35	4,48	238320	58,17
35	5,68	277715	58,12
35	7,21	323496	58,03
35	9,14	376612	57,92
35	11,6	438190	57,77
35	14,7	509458	57,59
35	18,7	591808	57,38
35	23,7	686942	57,13
35	30	796616	56,85
45	0,1	5942	55,06
45	0,127	6874	55,32
45	0,161	7954	55,55
45	0,204	9210	55,8
45	0,259	10675	56,06
45	0,328	12381	56,33
45	0,416	14369	56,6
45	0,528	16687	56,89
45	0,669	19392	57,17
45	0,849	22555	57,46
45	1,08	26259	57,75
45	1,37	30595	58,03
45	1,73	35676	58,31
45	2,2	41632	58,58
45	2,79	48618	58,84
45	3,53	56816	59,09
45	4,48	66440	59,33
45	5,68	77734	59,54
45	7,21	91006	59,74
45	9,14	106581	59,92
45	11,6	124880	60,08
45	14,7	146345	60,22
45	18,7	171542	60,34
45	23,7	201181	60,45
45	30	235994	60,56
55	0,1	1820	55,47
55	0,127	2108	55,62
55	0,161	2440	55,74
55	0,204	2825	55,89
55	0,259	3273	56,05

55	0,328	3795	56,23
55	0,416	4402	56,43
55	0,528	5108	56,64
55	0,669	5931	56,87
55	0,849	6890	57,12
55	1,08	8009	57,38
55	1,37	9317	57,65
55	1,73	10849	57,95
55	2,2	12643	58,25
55	2,79	14745	58,56
55	3,53	17214	58,89
55	4,48	20114	59,22
55	5,68	23524	59,56
55	7,21	27538	59,9
55	9,14	32271	60,25
55	11,6	37858	60,6
55	14,7	44458	60,97
55	18,7	52278	61,36
55	23,7	61562	61,76
55	30	72634	62,24
65	0,1	620	58,6
65	0,127	723	58,47
65	0,161	842	58,35
65	0,204	981	58,26
65	0,259	1144	58,21
65	0,328	1333	58,18
65	0,416	1552	58,18
65	0,528	1808	58,22
65	0,669	2107	58,26
65	0,849	2455	58,33
65	1,08	2863	58,44
65	1,37	3338	58,56
65	1,73	3895	58,69
65	2,2	4546	58,87
65	2,79	5307	59,05
65	3,53	6199	59,28
65	4,48	7245	59,52
65	5,68	8473	59,79
65	7,21	9917	60,1
65	9,14	11618	60,45
65	11,6	13623	60,88
65	14,7	15997	61,36
65	18,7	18820	61,92
65	23,7	22217	62,61
65	30	26370	63,55

---



---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 10/20 VG**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	37032048	35,17
5	0,127	40783613	34,59
5	0,161	44805222	33,95
5	0,204	49099425	33,36
5	0,259	53660859	32,77
5	0,328	58529222	32,18
5	0,416	63747717	31,59

5	0,528	69313918	31,01
5	0,669	75238243	30,43
5	0,849	81505606	29,84
5	1,08	88185609	29,26
5	1,37	95255088	28,67
5	1,73	102688802	28,08
5	2,2	110558860	27,48
5	2,79	118824946	26,87
5	3,53	127508301	26,27
5	4,48	136585412	25,66
5	5,68	146051580	25,04
5	7,21	155917509	24,42
5	9,14	166161523	23,79
5	11,6	176781587	23,15
5	14,7	187762155	22,5
5	18,7	199090442	21,85
5	23,7	210702047	21,19
5	30	222610473	20,53
15	0,1	8318555	43,37
15	0,127	9393444	42,81
15	0,161	10574326	42,28
15	0,204	11863956	41,74
15	0,259	13277893	41,21
15	0,328	14830061	40,68
15	0,416	16530552	40,18
15	0,528	18398303	39,66
15	0,669	20442474	39,14
15	0,849	22677540	38,62
15	1,08	25119037	38,1
15	1,37	27785210	37,57
15	1,73	30685320	37,04
15	2,2	33842709	36,51
15	2,79	37269167	35,97
15	3,53	40982996	35,43
15	4,48	45001221	34,87
15	5,68	49334437	34,31
15	7,21	54002918	33,74
15	9,14	59006866	33,17
15	11,6	64378120	32,58
15	14,7	70130619	31,98
15	18,7	76267810	31,38
15	23,7	82788191	30,77
15	30	89702751	30,17
25	0,1	1522457	50,11
25	0,127	1750770	49,86
25	0,161	2007028	49,57
25	0,204	2295082	49,27
25	0,259	2621341	48,97
25	0,328	2990601	48,61
25	0,416	3406027	48,27
25	0,528	3873592	47,9
25	0,669	4402031	47,52
25	0,849	4994822	47,12
25	1,08	5661449	46,71
25	1,37	6409019	46,28
25	1,73	7245022	45,83

25	2,2	8180349	45,37
25	2,79	9223635	44,91
25	3,53	10385462	44,43
25	4,48	11677350	43,94
25	5,68	13110761	43,45
25	7,21	14699576	42,95
25	9,14	16455045	42,44
25	11,6	18389878	41,93
25	14,7	20522249	41,44
25	18,7	22860953	40,96
25	23,7	25420914	40,52
25	30	28204904	40,17
35	0,1	221384	53,78
35	0,127	256439	53,79
35	0,161	296460	53,77
35	0,204	342265	53,76
35	0,259	395024	53,74
35	0,328	455895	53,73
35	0,416	525775	53,7
35	0,528	606133	53,64
35	0,669	698460	53,58
35	0,849	804485	53,5
35	1,08	926251	53,39
35	1,37	1065905	53,24
35	1,73	1225951	53,08
35	2,2	1408850	52,88
35	2,79	1617549	52,64
35	3,53	1855043	52,36
35	4,48	2124915	52,04
35	5,68	2431223	51,68
35	7,21	2777964	51,27
35	9,14	3169757	50,82
35	11,6	3611301	50,31
35	14,7	4107161	49,76
35	18,7	4661139	49,18
35	23,7	5291259	48,59
35	30	6015972	47,89
45	0,1	53232	55,62
45	0,127	61609	55,51
45	0,161	71235	55,4
45	0,204	82346	55,33
45	0,259	95223	55,3
45	0,328	110109	55,29
45	0,416	127293	55,33
45	0,528	147175	55,38
45	0,669	170212	55,43
45	0,849	196920	55,5
45	1,08	227883	55,58
45	1,37	263845	55,67
45	1,73	305578	55,75
45	2,2	354043	55,82
45	2,79	410281	55,87
45	3,53	475537	55,9
45	4,48	551159	55,91
45	5,68	638804	55,89
45	7,21	740202	55,84

45	9,14	857481	55,76
45	11,6	993041	55,65
45	14,7	1149361	55,49
45	18,7	1329216	55,29
45	23,7	1536325	55,06
45	30	1773526	54,77
55	0,1	13812	60,28
55	0,127	16178	59,73
55	0,161	18886	59,2
55	0,204	22005	58,75
55	0,259	25629	58,37
55	0,328	29840	58,06
55	0,416	34719	57,81
55	0,528	40359	57,63
55	0,669	46893	57,5
55	0,849	54469	57,41
55	1,08	63274	57,37
55	1,37	73526	57,38
55	1,73	85455	57,41
55	2,2	99351	57,48
55	2,79	115541	57,56
55	3,53	134429	57,67
55	4,48	156467	57,79
55	5,68	182193	57,91
55	7,21	212230	58,03
55	9,14	247308	58,14
55	11,6	288331	58,24
55	14,7	336253	58,32
55	18,7	392285	58,38
55	23,7	457773	58,42
55	30	534332	58,43
65	0,1	3561	68,15
65	0,127	4258	67,17
65	0,161	5069	66,2
65	0,204	6024	65,27
65	0,259	7134	64,42
65	0,328	8429	63,64
65	0,416	9936	62,94
65	0,528	11693	62,31
65	0,669	13742	61,76
65	0,849	16128	61,28
65	1,08	18908	60,88
65	1,37	22144	60,55
65	1,73	25915	60,29
65	2,2	30311	60,09
65	2,79	35438	59,95
65	3,53	41427	59,86
65	4,48	48429	59,83
65	5,68	56618	59,84
65	7,21	66211	59,88
65	9,14	77470	59,96
65	11,6	90683	60,06
65	14,7	106209	60,18
65	18,7	124473	60,32
65	23,7	145890	60,56

65	30	171204	60,75
<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP TLA VG</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	53753285	38,93
5	0,127	59658406	37,86
5	0,161	65976316	36,82
5	0,204	72715705	35,77
5	0,259	79804117	34,79
5	0,328	87398269	33,83
5	0,416	95478567	32,87
5	0,528	104040281	31,92
5	0,669	113068558	31
5	0,849	122583691	30,11
5	1,08	132503806	29,23
5	1,37	142928526	28,36
5	1,73	153815887	27,5
5	2,2	165157845	26,66
5	2,79	176926261	25,84
5	3,53	189155364	25,02
5	4,48	201748417	24,22
5	5,68	214732709	23,44
5	7,21	228052194	22,66
5	9,14	241649952	21,9
5	11,6	255586361	21,14
5	14,7	269733634	20,39
5	18,7	284085429	19,65
5	23,7	298630375	18,91
5	30	313329584	18,19
15	0,1	8880037	55,09
15	0,127	10344480	53,92
15	0,161	11979293	52,74
15	0,204	13813640	51,58
15	0,259	15865087	50,43
15	0,328	18139567	49,31
15	0,416	20671641	48,2
15	0,528	23473857	47,09
15	0,669	26570364	46
15	0,849	29989721	44,92
15	1,08	33741474	43,85
15	1,37	37854655	42,79
15	1,73	42343625	41,74
15	2,2	47237961	40,71
15	2,79	52548028	39,68
15	3,53	58286889	38,66
15	4,48	64481451	37,65
15	5,68	71143380	36,65
15	7,21	78283308	35,65
15	9,14	85922817	34,67
15	11,6	94072179	33,69
15	14,7	102743636	32,7
15	18,7	111933986	31,73
15	23,7	121653630	30,76
15	30	131942258	29,79
25	0,1	1010463	68,43

25	0,127	1218662	67,68
25	0,161	1465453	66,84
25	0,204	1753635	66,02
25	0,259	2093621	65,2
25	0,328	2490995	64,29
25	0,416	2956308	63,37
25	0,528	3498567	62,42
25	0,669	4129037	61,45
25	0,849	4858517	60,45
25	1,08	5700091	59,42
25	1,37	6668342	58,39
25	1,73	7778132	57,33
25	2,2	9046297	56,26
25	2,79	10489442	55,18
25	3,53	12125522	54,08
25	4,48	13975103	52,98
25	5,68	16060541	51,87
25	7,21	18404678	50,76
25	9,14	21028926	49,63
25	11,6	23962637	48,5
25	14,7	27230539	47,36
25	18,7	30867600	46,21
25	23,7	34912019	45,05
25	30	39411869	43,9
35	0,1	72537	78,21
35	0,127	89363	77,77
35	0,161	110004	77,26
35	0,204	135067	76,75
35	0,259	165507	76,23
35	0,328	202445	75,71
35	0,416	247227	75,15
35	0,528	301538	74,59
35	0,669	367278	74,02
35	0,849	446459	73,45
35	1,08	541631	72,79
35	1,37	655706	72,17
35	1,73	792270	71,48
35	2,2	955322	70,77
35	2,79	1149477	70,02
35	3,53	1379617	69,2
35	4,48	1651475	68,33
35	5,68	1971493	67,4
35	7,21	2346680	66,4
35	9,14	2784003	65,34
35	11,6	3291131	64,19
35	14,7	3876321	62,94
35	18,7	4546673	61,63
35	23,7	5319080	60,35
35	30	6244921	59,09
45	0,1	10345	83,09
45	0,127	12865	82,75
45	0,161	15976	82,33
45	0,204	19849	81,9
45	0,259	24644	81,46
45	0,328	30531	81,02
45	0,416	37772	80,57

45	0,528	46678	80,13
45	0,669	57621	79,67
45	0,849	71060	79,19
45	1,08	87555	78,72
45	1,37	107733	78,24
45	1,73	132395	77,76
45	2,2	162495	77,26
45	2,79	199145	76,76
45	3,53	243696	76,24
45	4,48	297777	75,7
45	5,68	363352	75,14
45	7,21	442602	74,55
45	9,14	538219	73,94
45	11,6	653378	73,3
45	14,7	791625	72,62
45	18,7	957103	71,9
45	23,7	1154691	71,14
45	30	1389494	70,32
55	0,1	1705	86,59
55	0,127	2143	86,35
55	0,161	2692	86,01
55	0,204	3376	85,67
55	0,259	4231	85,31
55	0,328	5300	84,95
55	0,416	6635	84,58
55	0,528	8298	84,21
55	0,669	10377	83,82
55	0,849	12965	83,44
55	1,08	16173	83,04
55	1,37	20140	82,63
55	1,73	25035	82,22
55	2,2	31074	81,81
55	2,79	38520	81,39
55	3,53	47690	80,96
55	4,48	58985	80,52
55	5,68	72918	80,07
55	7,21	90105	79,62
55	9,14	111200	79,15
55	11,6	136998	78,67
55	14,7	168480	78,18
55	18,7	206830	77,69
55	23,7	253565	77,17
55	30	310475	76,65
65	0,1	343	88,52
65	0,127	433	88,44
65	0,161	548	88,27
65	0,204	692	88,03
65	0,259	873	87,84
65	0,328	1102	87,58
65	0,416	1389	87,3
65	0,528	1750	87,04
65	0,669	2201	86,73
65	0,849	2768	86,41
65	1,08	3478	86,09
65	1,37	4366	85,77
65	1,73	5475	85,43

65	2,2	6857	85,09
65	2,79	8582	84,74
65	3,53	10731	84,38
65	4,48	13405	84,01
65	5,68	16734	83,64
65	7,21	20867	83,25
65	9,14	25995	82,86
65	11,6	32357	82,45
65	14,7	40238	82,03
65	18,7	49998	81,56
65	23,7	62134	81,17
65	30	77274	80,87

---

**APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE  
CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (RTFOT)**

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 30/45 A RT</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	34636895	39,49
5	0,127	38544009	38,58
5	0,161	42717402	37,64
5	0,204	47179999	36,73
5	0,259	51970742	35,84
5	0,328	57096624	34,96
5	0,416	62579189	34,09
5	0,528	68437530	33,25
5	0,669	74658859	32,41
5	0,849	81265750	31,58
5	1,08	88272218	30,76
5	1,37	95680828	29,95
5	1,73	103478008	29,13
5	2,2	111640534	28,33
5	2,79	120186558	27,54
5	3,53	129105739	26,75
5	4,48	138400654	25,96
5	5,68	148078311	25,18
5	7,21	158105223	24,4
5	9,14	168477128	23,63
5	11,6	179178219	22,85
5	14,7	190195876	22,08
5	18,7	201510388	21,31
5	23,7	213072794	20,54
5	30	224922357	19,78
15	0,1	5748523	53,83
15	0,127	6678126	52,78
15	0,161	7717916	51,72
15	0,204	8873926	50,67
15	0,259	10164384	49,68
15	0,328	11604454	48,67
15	0,416	13206827	47,71
15	0,528	14983395	46,76
15	0,669	16949324	45,81
15	0,849	19121091	44,88
15	1,08	21516176	43,97
15	1,37	24151695	43,06
15	1,73	27040923	42,16
15	2,2	30202425	41,28
15	2,79	33660499	40,39
15	3,53	37433181	39,51
15	4,48	41528391	38,63
15	5,68	45965714	37,76
15	7,21	50759673	36,88
15	9,14	55926620	36
15	11,6	61480492	35,12
15	14,7	67438039	34,23
15	18,7	73824343	33,34
15	23,7	80644201	32,43
15	30	87936148	31,54

25	0,1	662307	66,87
25	0,127	798271	66,17
25	0,161	958584	65,38
25	0,204	1145090	64,55
25	0,259	1363259	63,69
25	0,328	1617333	62,86
25	0,416	1913543	61,97
25	0,528	2257295	61,09
25	0,669	2655715	60,16
25	0,849	3114953	59,24
25	1,08	3643898	58,31
25	1,37	4251730	57,36
25	1,73	4946287	56,4
25	2,2	5738556	55,43
25	2,79	6640029	54,46
25	3,53	7662662	53,49
25	4,48	8819759	52,52
25	5,68	10125999	51,55
25	7,21	11595658	50,57
25	9,14	13247424	49,58
25	11,6	15100527	48,59
25	14,7	17175019	47,59
25	18,7	19499284	46,59
25	23,7	22099452	45,58
25	30	25017860	44,59
35	0,1	57939	76,21
35	0,127	71220	75,73
35	0,161	87278	75,2
35	0,204	106727	74,67
35	0,259	130175	74,14
35	0,328	158445	73,6
35	0,416	192618	73,06
35	0,528	233845	72,48
35	0,669	283368	71,93
35	0,849	342854	71,29
35	1,08	414000	70,68
35	1,37	499101	70,06
35	1,73	600483	69,36
35	2,2	721005	68,66
35	2,79	863741	67,91
35	3,53	1032436	67,13
35	4,48	1230581	66,29
35	5,68	1462865	65,41
35	7,21	1734714	64,47
35	9,14	2051272	63,48
35	11,6	2418147	62,43
35	14,7	2841275	61,33
35	18,7	3326443	60,16
35	23,7	3880786	58,93
35	30	4508236	57,66
45	0,1	8298	81,68
45	0,127	10294	81,26
45	0,161	12748	80,77
45	0,204	15759	80,28
45	0,259	19466	79,79
45	0,328	24021	79,31

45	0,416	29599	78,83
45	0,528	36417	78,35
45	0,669	44748	77,88
45	0,849	54918	77,41
45	1,08	67312	76,92
45	1,37	82409	76,45
45	1,73	100792	75,97
45	2,2	123127	75,49
45	2,79	150248	75,01
45	3,53	183133	74,5
45	4,48	222904	73,97
45	5,68	270917	73,43
45	7,21	328807	72,86
45	9,14	398429	72,27
45	11,6	481972	71,65
45	14,7	582002	71
45	18,7	701359	70,31
45	23,7	843570	69,57
45	30	1012595	68,8
55	0,1	1376	85,78
55	0,127	1724	85,44
55	0,161	2162	85,05
55	0,204	2706	84,64
55	0,259	3379	84,23
55	0,328	4218	83,82
55	0,416	5262	83,38
55	0,528	6557	82,95
55	0,669	8162	82,52
55	0,849	10143	82,08
55	1,08	12592	81,64
55	1,37	15613	81,2
55	1,73	19333	80,75
55	2,2	23911	80,31
55	2,79	29540	79,87
55	3,53	36452	79,43
55	4,48	44937	78,99
55	5,68	55329	78,54
55	7,21	68047	78,09
55	9,14	83639	77,64
55	11,6	102685	77,17
55	14,7	125929	76,69
55	18,7	154219	76,23
55	23,7	188709	75,73
55	30	230697	75,21
65	0,1	275	88,42
65	0,127	348	88,24
65	0,161	439	87,91
65	0,204	554	87,7
65	0,259	698	87,31
65	0,328	879	86,97
65	0,416	1106	86,6
65	0,528	1390	86,27
65	0,669	1747	85,92
65	0,849	2192	85,56
65	1,08	2747	85,19
65	1,37	3439	84,81

65	1,73	4301	84,44
65	2,2	5374	84,06
65	2,79	6706	83,67
65	3,53	8359	83,29
65	4,48	10410	82,9
65	5,68	12951	82,52
65	7,21	16095	82,13
65	9,14	19987	81,75
65	11,6	24801	81,39
65	14,7	30756	81,04
65	18,7	38123	80,66
65	23,7	47246	80,24
65	30	58502	80,24

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 30/45 B RT**

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	34850953	36,59
5	0,127	38511395	35,78
5	0,161	42415931	34,97
5	0,204	46602393	34,18
5	0,259	51026803	33,42
5	0,328	55731781	32,69
5	0,416	60744961	31,96
5	0,528	66087520	31,25
5	0,669	71762330	30,56
5	0,849	77771851	29,87
5	1,08	84127281	29,19
5	1,37	90836159	28,52
5	1,73	97901921	27,85
5	2,2	105304758	27,2
5	2,79	113068918	26,55
5	3,53	121189664	25,9
5	4,48	129647299	25,26
5	5,68	138484854	24,62
5	7,21	147680720	23,99
5	9,14	157217803	23,35
5	11,6	167109018	22,72
5	14,7	177297066	22,09
5	18,7	187802864	21,46
5	23,7	198594669	20,83
5	30	209636605	20,2
15	0,1	6742473	49,19
15	0,127	7747307	48,23
15	0,161	8851581	47,26
15	0,204	10069739	46,33
15	0,259	11409332	45,44
15	0,328	12884787	44,57
15	0,416	14506914	43,72
15	0,528	16287831	42,87
15	0,669	18244034	42,05
15	0,849	20387113	41,25
15	1,08	22726031	40,45
15	1,37	25280590	39,67
15	1,73	28056683	38,91
15	2,2	31071446	38,15
15	2,79	34345848	37,4

15	3,53	37890857	36,66
15	4,48	41724667	35,92
15	5,68	45854398	35,19
15	7,21	50292677	34,46
15	9,14	55057253	33,74
15	11,6	60161547	33,02
15	14,7	65603574	32,37
15	18,7	71409568	31,67
15	23,7	77583625	30,96
15	30	84134870	30,27
25	0,1	876327	61,8
25	0,127	1041575	61,02
25	0,161	1232535	60,28
25	0,204	1453141	59,49
25	0,259	1706325	58,7
25	0,328	1997778	57,92
25	0,416	2332723	57,09
25	0,528	2715404	56,27
25	0,669	3153220	55,44
25	0,849	3652550	54,6
25	1,08	4220117	53,75
25	1,37	4864717	52,89
25	1,73	5592857	52,03
25	2,2	6414935	51,18
25	2,79	7339110	50,31
25	3,53	8377182	49,45
25	4,48	9538822	48,6
25	5,68	10836480	47,75
25	7,21	12282040	46,9
25	9,14	13889544	46,05
25	11,6	15674390	45,21
25	14,7	17652161	44,38
25	18,7	19840355	43,56
25	23,7	22258950	42,78
25	30	24932193	42,04
35	0,1	67253	72,76
35	0,127	81892	72,2
35	0,161	99406	71,59
35	0,204	120384	70,98
35	0,259	145401	70,39
35	0,328	175277	69,79
35	0,416	210951	69,2
35	0,528	253438	68,56
35	0,669	304012	67,97
35	0,849	363896	67,32
35	1,08	434711	66,68
35	1,37	518373	66,01
35	1,73	616765	65,3
35	2,2	732480	64,59
35	2,79	868247	63,85
35	3,53	1026876	63,08
35	4,48	1211879	62,27
35	5,68	1427098	61,43
35	7,21	1676697	60,56
35	9,14	1964889	59,65
35	11,6	2296410	58,7

35	14,7	2676038	57,7
35	18,7	3108636	56,68
35	23,7	3598250	55,56
35	30	4147684	54,42
45	0,1	9952	79,29
45	0,127	12268	78,78
45	0,161	15080	78,2
45	0,204	18510	77,62
45	0,259	22703	77,04
45	0,328	27815	76,47
45	0,416	34012	75,9
45	0,528	41518	75,35
45	0,669	50607	74,8
45	0,849	61583	74,25
45	1,08	74829	73,7
45	1,37	90807	73,16
45	1,73	110058	72,63
45	2,2	133223	72,1
45	2,79	161069	71,57
45	3,53	194480	71,01
45	4,48	234454	70,45
45	5,68	282262	69,88
45	7,21	339279	69,29
45	9,14	407183	68,68
45	11,6	487905	68,04
45	14,7	583625	67,38
45	18,7	696785	66,69
45	23,7	830535	65,97
45	30	988047	65,21
55	0,1	1679	84,39
55	0,127	2098	83,99
55	0,161	2618	83,51
55	0,204	3263	83,01
55	0,259	4063	82,5
55	0,328	5049	81,98
55	0,416	6264	81,46
55	0,528	7760	80,93
55	0,669	9601	80,41
55	0,849	11862	79,87
55	1,08	14636	79,34
55	1,37	18034	78,81
55	1,73	22191	78,29
55	2,2	27266	77,77
55	2,79	33453	77,25
55	3,53	40990	76,74
55	4,48	50153	76,23
55	5,68	61276	75,72
55	7,21	74785	75,22
55	9,14	91172	74,71
55	11,6	111000	74,21
55	14,7	134917	73,75
55	18,7	163822	73,24
55	23,7	198713	72,73
55	30	240737	72,22
65	0,1	332	87,43

65	0,127	419	87,21
65	0,161	528	86,96
65	0,204	665	86,59
65	0,259	836	86,23
65	0,328	1049	85,82
65	0,416	1317	85,46
65	0,528	1649	85,04
65	0,669	2064	84,59
65	0,849	2581	84,16
65	1,08	3223	83,71
65	1,37	4021	83,24
65	1,73	5008	82,78
65	2,2	6229	82,3
65	2,79	7739	81,82
65	3,53	9600	81,34
65	4,48	11894	80,85
65	5,68	14718	80,36
65	7,21	18191	79,88
65	9,14	22458	79,38
65	11,6	27698	78,89
65	14,7	34130	78,4
65	18,7	42033	77,91
65	23,7	51764	77,35
65	30	63508	77,16

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 50/70 PA 85 RT**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	52369819	36,81
5	0,127	57746102	35,81
5	0,161	63469232	34,79
5	0,204	69524170	33,8
5	0,259	75912535	32,84
5	0,328	82696865	31,89
5	0,416	89827087	30,96
5	0,528	97341389	30,05
5	0,669	105258991	29,16
5	0,849	113562482	28,28
5	1,08	122242956	27,42
5	1,37	131268912	26,57
5	1,73	140621631	25,74
5	2,2	150304143	24,92
5	2,79	160269677	24,12
5	3,53	170534733	23,33
5	4,48	181110968	22,55
5	5,68	191960792	21,78
5	7,21	203059003	21,02
5	9,14	214359132	20,27
5	11,6	225841957	19,53
5	14,7	237510588	18,79
5	18,7	249322182	18,07
5	23,7	261195962	17,34
5	30	273128279	16,63
15	0,1	10045423	52,14
15	0,127	11564570	50,95
15	0,161	13245339	49,77
15	0,204	15110965	48,58

15	0,259	17170416	47,43
15	0,328	19442702	46,29
15	0,416	21949970	45,19
15	0,528	24699388	44,1
15	0,669	27716881	43,03
15	0,849	31003163	41,98
15	1,08	34585143	40,95
15	1,37	38480373	39,94
15	1,73	42696332	38,94
15	2,2	47253408	37,95
15	2,79	52164181	36,97
15	3,53	57429777	36
15	4,48	63082590	35,05
15	5,68	69108292	34,1
15	7,21	75529164	33,16
15	9,14	82344041	32,23
15	11,6	89538076	31,3
15	14,7	97144587	30,38
15	18,7	105131683	29,46
15	23,7	113501793	28,55
15	30	122242321	27,66
25	0,1	1423201	65,7
25	0,127	1699655	64,9
25	0,161	2024863	63,98
25	0,204	2401851	63,04
25	0,259	2841563	62,03
25	0,328	3351383	61
25	0,416	3939881	59,91
25	0,528	4616089	58,81
25	0,669	5390863	57,69
25	0,849	6274864	56,54
25	1,08	7278952	55,38
25	1,37	8415682	54,22
25	1,73	9698847	53,06
25	2,2	11140382	51,9
25	2,79	12755216	50,76
25	3,53	14558993	49,63
25	4,48	16568188	48,51
25	5,68	18798765	47,41
25	7,21	21267727	46,32
25	9,14	23991598	45,24
25	11,6	26991698	44,18
25	14,7	30283006	43,13
25	18,7	33883737	42,1
25	23,7	37818103	41,09
25	30	42101258	40,13
35	0,1	182881	69,07
35	0,127	219556	69,12
35	0,161	263636	69,03
35	0,204	316485	68,86
35	0,259	379560	68,64
35	0,328	454871	68,34
35	0,416	544787	67,97
35	0,528	651698	67,59
35	0,669	778385	67,07
35	0,849	927849	66,55

35	1,08	1104400	65,97
35	1,37	1312512	65,25
35	1,73	1556719	64,49
35	2,2	1841672	63,64
35	2,79	2172903	62,71
35	3,53	2556055	61,7
35	4,48	2997525	60,62
35	5,68	3503702	59,46
35	7,21	4081477	58,21
35	9,14	4737562	56,89
35	11,6	5498095	55,49
35	14,7	6371592	53,98
35	18,7	7353843	52,43
35	23,7	8465366	50,79
35	30	9701431	49,12
45	0,1	34432	67,63
45	0,127	41068	68,3
45	0,161	49143	68,75
45	0,204	58951	69,1
45	0,259	70719	69,38
45	0,328	84895	69,59
45	0,416	101950	69,75
45	0,528	122518	69,86
45	0,669	147280	69,87
45	0,849	177041	69,89
45	1,08	212775	69,84
45	1,37	255630	69,72
45	1,73	307108	69,56
45	2,2	368660	69,35
45	2,79	442277	69,08
45	3,53	530278	68,75
45	4,48	635243	68,36
45	5,68	760191	67,9
45	7,21	908458	67,38
45	9,14	1083933	66,78
45	11,6	1290673	66,1
45	14,7	1533303	65,34
45	18,7	1816658	64,49
45	23,7	2146775	63,53
45	30	2529154	62,5
55	0,1	8363	61,85
55	0,127	9799	63,26
55	0,161	11542	64,43
55	0,204	13648	65,46
55	0,259	16206	66,38
55	0,328	19298	67,21
55	0,416	23028	67,93
55	0,528	27533	68,56
55	0,669	32973	69,12
55	0,849	39547	69,58
55	1,08	47487	69,97
55	1,37	57091	70,29
55	1,73	68705	70,54
55	2,2	82733	70,74
55	2,79	99688	70,88
55	3,53	120159	70,95

55	4,48	144837	70,98
55	5,68	174571	70,96
55	7,21	210397	70,89
55	9,14	253484	70,78
55	11,6	305282	70,61
55	14,7	367502	70,38
55	18,7	442067	70,1
55	23,7	531468	69,76
55	30	638292	69,36
65	0,1	2893	52,91
65	0,127	3282	54,84
65	0,161	3756	56,57
65	0,204	4329	58,22
65	0,259	5021	59,77
65	0,328	5852	61,23
65	0,416	6851	62,58
65	0,528	8054	63,84
65	0,669	9505	64,99
65	0,849	11259	66,04
65	1,08	13383	66,99
65	1,37	15953	67,85
65	1,73	19065	68,61
65	2,2	22835	69,28
65	2,79	27401	69,86
65	3,53	32934	70,37
65	4,48	39639	70,8
65	5,68	47763	71,15
65	7,21	57600	71,45
65	9,14	69524	71,68
65	11,6	83981	71,87
65	14,7	101482	72,01
65	18,7	122676	72,1
65	23,7	148364	72,18
65	30	179495	72,22

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 A RT**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\varphi$ (°)
5	0,1	19593605	46,52
5	0,127	22251446	45,4
5	0,161	25109094	44,26
5	0,204	28246913	43,15
5	0,259	31656035	42,05
5	0,328	35383541	40,98
5	0,416	39406028	39,93
5	0,528	43730701	38,9
5	0,669	48394922	37,89
5	0,849	53418018	36,89
5	1,08	58797816	35,91
5	1,37	64579259	34,94
5	1,73	70748106	33,99
5	2,2	77306222	33,04
5	2,79	84270207	32,11
5	3,53	91635164	31,2
5	4,48	99362959	30,3
5	5,68	107505758	29,41
5	7,21	116035338	28,53

5	9,14	124953296	27,66
5	11,6	134249672	26,8
5	14,7	143934851	25,95
5	18,7	153936326	25,11
5	23,7	164304070	24,27
5	30	174978447	23,44
15	0,1	2750959	61,59
15	0,127	3267677	60,61
15	0,161	3860549	59,56
15	0,204	4540017	58,5
15	0,259	5315055	57,45
15	0,328	6198541	56,36
15	0,416	7205823	55,26
15	0,528	8344195	54,17
15	0,669	9629732	53,06
15	0,849	11076841	51,96
15	1,08	12699912	50,85
15	1,37	14516174	49,76
15	1,73	16542259	48,66
15	2,2	18790860	47,57
15	2,79	21284461	46,49
15	3,53	24039346	45,41
15	4,48	27072943	44,34
15	5,68	30401620	43,28
15	7,21	34043880	42,22
15	9,14	38010144	41,17
15	11,6	42323296	40,14
15	14,7	46998756	39,11
15	18,7	52042514	38,09
15	23,7	57486300	37,08
15	30	63324439	36,1
25	0,1	307095	70
25	0,127	372630	69,74
25	0,161	450704	69,39
25	0,204	544493	68,99
25	0,259	656774	68,55
25	0,328	790324	68,03
25	0,416	948106	67,45
25	0,528	1136208	66,84
25	0,669	1358194	66,16
25	0,849	1620968	65,43
25	1,08	1930079	64,65
25	1,37	2292619	63,83
25	1,73	2716427	62,95
25	2,2	3210145	62,04
25	2,79	3783458	61,09
25	3,53	4447194	60,11
25	4,48	5211848	59,1
25	5,68	6090531	58,07
25	7,21	7096817	57,01
25	9,14	8244801	55,94
25	11,6	9550774	54,86
25	14,7	11032730	53,78
25	18,7	12705943	52,73
25	23,7	14597303	51,7
25	30	16734137	50,72

35	0,1	37297	71,36
35	0,127	45176	71,55
35	0,161	54720	71,68
35	0,204	66253	71,78
35	0,259	80231	71,85
35	0,328	97184	71,9
35	0,416	117731	71,92
35	0,528	142622	71,89
35	0,669	172774	71,8
35	0,849	209281	71,71
35	1,08	253458	71,51
35	1,37	306748	71,3
35	1,73	370967	70,99
35	2,2	448232	70,65
35	2,79	540991	70,24
35	3,53	652113	69,76
35	4,48	784868	69,2
35	5,68	943052	68,58
35	7,21	1130984	67,89
35	9,14	1353668	67,11
35	11,6	1615942	66,26
35	14,7	1923691	65,31
35	18,7	2283371	64,28
35	23,7	2702236	63,14
35	30	3186281	61,93
45	0,1	7720	70,29
45	0,127	9286	70,45
45	0,161	11181	70,58
45	0,204	13461	70,73
45	0,259	16218	70,89
45	0,328	19560	71,07
45	0,416	23605	71,26
45	0,528	28501	71,45
45	0,669	34429	71,65
45	0,849	41618	71,83
45	1,08	50340	72,01
45	1,37	60934	72,17
45	1,73	73805	72,3
45	2,2	89442	72,41
45	2,79	108455	72,49
45	3,53	131540	72,53
45	4,48	159623	72,52
45	5,68	193695	72,46
45	7,21	235017	72,35
45	9,14	285083	72,18
45	11,6	345659	71,94
45	14,7	418829	71,64
45	18,7	507021	71,27
45	23,7	613183	70,82
45	30	740649	70,3
55	0,1	1921	70,74
55	0,127	2315	70,73
55	0,161	2787	70,68
55	0,204	3356	70,64
55	0,259	4041	70,63

55	0,328	4866	70,65
55	0,416	5858	70,69
55	0,528	7053	70,76
55	0,669	8495	70,87
55	0,849	10234	71
55	1,08	12335	71,15
55	1,37	14880	71,33
55	1,73	17961	71,52
55	2,2	21697	71,73
55	2,79	26229	71,95
55	3,53	31732	72,17
55	4,48	38415	72,39
55	5,68	46545	72,59
55	7,21	56436	72,79
55	9,14	68487	72,96
55	11,6	83205	73,11
55	14,7	101140	73,21
55	18,7	123023	73,28
55	23,7	149699	73,35
55	30	182356	73,34
65	0,1	553	72,31
65	0,127	670	72,28
65	0,161	811	72,2
65	0,204	981	72,09
65	0,259	1188	71,98
65	0,328	1437	71,86
65	0,416	1737	71,73
65	0,528	2097	71,6
65	0,669	2531	71,51
65	0,849	3054	71,42
65	1,08	3683	71,36
65	1,37	4441	71,34
65	1,73	5355	71,35
65	2,2	6457	71,4
65	2,79	7787	71,48
65	3,53	9394	71,61
65	4,48	11339	71,77
65	5,68	13694	71,95
65	7,21	16552	72,18
65	9,14	20024	72,43
65	11,6	24251	72,72
65	14,7	29408	73,03
65	18,7	35716	73,35
65	23,7	43479	73,64
65	30	52973	74,2

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 B RT**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	φ (°)
5	0,1	7065485	37,84
5	0,127	7846050	37,39
5	0,161	8695223	36,89
5	0,204	9611651	36,42
5	0,259	10594844	36
5	0,328	11661456	35,58
5	0,416	12817142	35,18
5	0,528	14069251	34,78

5	0,669	15420363	34,4
5	0,849	16885383	34,02
5	1,08	18470262	33,65
5	1,37	20186248	33,29
5	1,73	22040373	32,94
5	2,2	24037144	32,59
5	2,79	26191608	32,25
5	3,53	28517726	31,91
5	4,48	31015750	31,57
5	5,68	33696406	31,23
5	7,21	36573964	30,9
5	9,14	39652717	30,58
5	11,6	42950877	30,25
5	14,7	46464467	29,93
5	18,7	50205281	29,63
5	23,7	54166793	29,35
5	30	58318426	29,12
15	0,1	1609449	44,85
15	0,127	1822238	44,42
15	0,161	2054236	43,95
15	0,204	2312460	43,51
15	0,259	2597144	43,06
15	0,328	2913230	42,64
15	0,416	3262405	42,21
15	0,528	3647335	41,8
15	0,669	4072841	41,39
15	0,849	4542635	40,99
15	1,08	5061395	40,59
15	1,37	5632344	40,2
15	1,73	6261300	39,82
15	2,2	6952764	39,44
15	2,79	7710970	39,07
15	3,53	8542149	38,71
15	4,48	9452527	38,35
15	5,68	10447049	38,01
15	7,21	11532843	37,68
15	9,14	12715584	37,37
15	11,6	14000600	37,09
15	14,7	15390799	36,85
15	18,7	16880954	36,7
15	23,7	18471846	36,65
15	30	20153868	36,76
25	0,1	321247	50,44
25	0,127	368858	50,19
25	0,161	422413	50,01
25	0,204	483416	49,67
25	0,259	551960	49,39
25	0,328	630220	49,12
25	0,416	717807	48,84
25	0,528	817537	48,55
25	0,669	929781	48,28
25	0,849	1056472	47,95
25	1,08	1199082	47,63
25	1,37	1359571	47,33
25	1,73	1540004	47,01
25	2,2	1742425	46,7

25	2,79	1969603	46,39
25	3,53	2223360	46,1
25	4,48	2506598	45,82
25	5,68	2821602	45,58
25	7,21	3170822	45,37
25	9,14	3555857	45,24
25	11,6	3977944	45,23
25	14,7	4435876	45,38
25	18,7	4929396	45,79
25	23,7	5452030	46,59
25	30	6023003	47,8
35	0,1	65482	52,92
35	0,127	75495	52,93
35	0,161	86989	52,9
35	0,204	100128	52,87
35	0,259	115175	52,82
35	0,328	132425	52,78
35	0,416	152222	52,72
35	0,528	174882	52,66
35	0,669	200839	52,57
35	0,849	230511	52,48
35	1,08	264479	52,4
35	1,37	303283	52,28
35	1,73	347492	52,17
35	2,2	397956	52,04
35	2,79	455494	51,9
35	3,53	521056	51,74
35	4,48	595649	51,57
35	5,68	680432	51,39
35	7,21	776672	51,19
35	9,14	885725	50,97
35	11,6	1009095	50,74
35	14,7	1148465	50,48
35	18,7	1305503	50,21
35	23,7	1482658	49,9
35	30	1682209	49,56
45	0,1	17180	52,98
45	0,127	19777	53,14
45	0,161	22768	53,25
45	0,204	26209	53,36
45	0,259	30180	53,48
45	0,328	34774	53,61
45	0,416	40071	53,72
45	0,528	46180	53,84
45	0,669	53238	53,95
45	0,849	61386	54,06
45	1,08	70796	54,16
45	1,37	81666	54,25
45	1,73	94228	54,33
45	2,2	108741	54,4
45	2,79	125506	54,45
45	3,53	144868	54,5
45	4,48	167206	54,53
45	5,68	192991	54,55
45	7,21	222737	54,55
45	9,14	257014	54,54

45	11,6	296509	54,51
45	14,7	341987	54,45
45	18,7	394318	54,38
45	23,7	454521	54,29
45	30	523768	54,19
55	0,1	4938	53,36
55	0,127	5686	53,46
55	0,161	6545	53,54
55	0,204	7536	53,65
55	0,259	8684	53,76
55	0,328	10010	53,9
55	0,416	11542	54,06
55	0,528	13309	54,22
55	0,669	15356	54,39
55	0,849	17724	54,57
55	1,08	20472	54,76
55	1,37	23662	54,95
55	1,73	27362	55,14
55	2,2	31661	55,34
55	2,79	36652	55,53
55	3,53	42452	55,72
55	4,48	49193	55,91
55	5,68	57028	56,09
55	7,21	66142	56,26
55	9,14	76757	56,42
55	11,6	89123	56,58
55	14,7	103517	56,73
55	18,7	120294	56,86
55	23,7	139882	57
55	30	162715	57,2
65	0,1	1482	56,84
65	0,127	1725	56,66
65	0,161	2004	56,49
65	0,204	2325	56,36
65	0,259	2698	56,28
65	0,328	3129	56,23
65	0,416	3629	56,2
65	0,528	4208	56,21
65	0,669	4878	56,25
65	0,849	5656	56,31
65	1,08	6559	56,4
65	1,37	7609	56,51
65	1,73	8830	56,63
65	2,2	10250	56,78
65	2,79	11905	56,94
65	3,53	13837	57,12
65	4,48	16089	57,31
65	5,68	18720	57,5
65	7,21	21797	57,71
65	9,14	25401	57,93
65	11,6	29624	58,15
65	14,7	34579	58,4
65	18,7	40415	58,67
65	23,7	47335	58,92
65	30	55573	59,21

---

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 10/20 RT</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	45541475	32,25
5	0,127	49772396	31,8
5	0,161	54302560	31,31
5	0,204	59071376	30,83
5	0,259	64143087	30,36
5	0,328	69528982	29,89
5	0,416	75272379	29,41
5	0,528	81378676	28,93
5	0,669	87874188	28,45
5	0,849	94755161	27,96
5	1,08	102027309	27,47
5	1,37	109658132	26,97
5	1,73	117705523	26,46
5	2,2	126191999	25,95
5	2,79	135079629	25,43
5	3,53	144402244	24,9
5	4,48	154145401	24,36
5	5,68	164283434	23,82
5	7,21	174823868	23,27
5	9,14	185745385	22,71
5	11,6	197019067	22,15
5	14,7	208667956	21,58
5	18,7	220649536	21,01
5	23,7	232890430	20,43
5	30	245354151	19,85
15	0,1	11686390	38,48
15	0,127	13014090	38,12
15	0,161	14458520	37,73
15	0,204	16025404	37,36
15	0,259	17727106	36,98
15	0,328	19575029	36,61
15	0,416	21587287	36,24
15	0,528	23775314	35,88
15	0,669	26151443	35,5
15	0,849	28740056	35,12
15	1,08	31547482	34,74
15	1,37	34590916	34,36
15	1,73	37885043	33,96
15	2,2	41447247	33,56
15	2,79	45296620	33,15
15	3,53	49449642	32,73
15	4,48	53916168	32,3
15	5,68	58716286	31,89
15	7,21	63865202	31,45
15	9,14	69367279	30,99
15	11,6	75242957	30,53
15	14,7	81496849	30,05
15	18,7	88134634	29,57
15	23,7	95143126	29,09
15	30	102500543	28,61
25	0,1	2559804	43,87
25	0,127	2892204	43,66
25	0,161	3258286	43,44
25	0,204	3665735	43,2

25	0,259	4118488	42,98
25	0,328	4622680	42,75
25	0,416	5183415	42,51
25	0,528	5806744	42,25
25	0,669	6498697	42
25	0,849	7267427	41,73
25	1,08	8120341	41,46
25	1,37	9065201	41,17
25	1,73	10111452	40,88
25	2,2	11268286	40,57
25	2,79	12545301	40,26
25	3,53	13954368	39,94
25	4,48	15505690	39,62
25	5,68	17212775	39,28
25	7,21	19087195	38,94
25	9,14	21139901	38,6
25	11,6	23383206	38,26
25	14,7	25828865	37,92
25	18,7	28486287	37,61
25	23,7	31357057	37,34
25	30	34424047	37,17
35	0,1	426833	46,06
35	0,127	483242	46,17
35	0,161	546767	46,26
35	0,204	618517	46,34
35	0,259	699194	46,4
35	0,328	790161	46,46
35	0,416	893001	46,51
35	0,528	1008953	46,55
35	0,669	1139827	46,55
35	0,849	1286799	46,54
35	1,08	1452009	46,5
35	1,37	1637613	46,43
35	1,73	1845763	46,31
35	2,2	2079558	46,15
35	2,79	2341723	45,96
35	3,53	2635144	45,73
35	4,48	2963141	45,47
35	5,68	3328930	45,16
35	7,21	3736002	44,82
35	9,14	4188221	44,44
35	11,6	4688342	44,02
35	14,7	5248985	43,57
35	18,7	5891520	43
35	23,7	6605189	42,36
35	30	7392592	41,69
45	0,1	122063	45,92
45	0,127	137696	46,07
45	0,161	155457	46,24
45	0,204	175610	46,42
45	0,259	198366	46,62
45	0,328	224172	46,83
45	0,416	253507	47,05
45	0,528	286890	47,29
45	0,669	324934	47,5
45	0,849	368141	47,73

45	1,08	417307	47,94
45	1,37	473360	48,16
45	1,73	537210	48,35
45	2,2	610039	48,53
45	2,79	693049	48,68
45	3,53	787647	48,81
45	4,48	895285	48,91
45	5,68	1017694	48,99
45	7,21	1156730	49,03
45	9,14	1314508	49,04
45	11,6	1493339	49,02
45	14,7	1695294	48,94
45	18,7	1922883	48,81
45	23,7	2179978	48,62
45	30	2469903	48,41
55	0,1	38708	47,18
55	0,127	43776	47,09
55	0,161	49482	47,02
55	0,204	55941	47,01
55	0,259	63221	47,05
55	0,328	71482	47,14
55	0,416	80867	47,28
55	0,528	91541	47,45
55	0,669	103668	47,66
55	0,849	117475	47,9
55	1,08	133197	48,15
55	1,37	151144	48,43
55	1,73	171652	48,72
55	2,2	195133	49,02
55	2,79	222037	49,32
55	3,53	252875	49,63
55	4,48	288254	49,92
55	5,68	328893	50,21
55	7,21	375515	50,48
55	9,14	429032	50,74
55	11,6	490480	50,97
55	14,7	561022	51,18
55	18,7	641957	51,36
55	23,7	734802	51,51
55	30	841405	51,62
65	0,1	12699	51,58
65	0,127	14507	51,01
65	0,161	16559	50,48
65	0,204	18859	50,05
65	0,259	21468	49,69
65	0,328	24416	49,41
65	0,416	27744	49,21
65	0,528	31501	49,08
65	0,669	35764	49,02
65	0,849	40601	49,02
65	1,08	46112	49,08
65	1,37	52393	49,19
65	1,73	59572	49,35
65	2,2	67778	49,56
65	2,79	77173	49,8
65	3,53	87942	50,07

65	4,48	100299	50,37
65	5,68	114515	50,69
65	7,21	130840	51,05
65	9,14	149675	51,4
65	11,6	171404	51,75
65	14,7	196467	52,11
65	18,7	225443	52,46
65	23,7	258960	52,81
65	30	297802	53,16

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP TLA RT</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	73960503	32,45
5	0,127	80674429	31,63
5	0,161	87786606	30,82
5	0,204	95169810	30,01
5	0,259	103002361	29,25
5	0,328	111210945	28,5
5	0,416	119824916	27,77
5	0,528	128806516	27,03
5	0,669	138173720	26,33
5	0,849	147950962	25,63
5	1,08	158102753	24,95
5	1,37	168687285	24,27
5	1,73	179649725	23,61
5	2,2	190998704	22,95
5	2,79	202670963	22,3
5	3,53	214690572	21,66
5	4,48	227005333	21,03
5	5,68	239634440	20,4
5	7,21	252512058	19,79
5	9,14	265660287	19,18
5	11,6	279023719	18,58
5	14,7	292619382	17,98
5	18,7	306320843	17,39
5	23,7	320255272	16,8
5	30	334282024	16,23
15	0,1	16254475	45,32
15	0,127	18415638	44,37
15	0,161	20773578	43,42
15	0,204	23344482	42,48
15	0,259	26143298	41,57
15	0,328	29188569	40,69
15	0,416	32495739	39,81
15	0,528	36085859	38,96
15	0,669	39974524	38,12
15	0,849	44182258	37,29
15	1,08	48718274	36,47
15	1,37	53604164	35,66
15	1,73	58854935	34,88
15	2,2	64487550	34,09
15	2,79	70501502	33,31
15	3,53	76909471	32,54
15	4,48	83726999	31,77
15	5,68	90969019	31,02
15	7,21	98636734	30,27

15	9,14	106736172	29,52
15	11,6	115280403	28,78
15	14,7	124258805	28,04
15	18,7	133682888	27,31
15	23,7	143543458	26,58
15	30	153829165	25,86
25	0,1	2486240	58,15
25	0,127	2923893	57,34
25	0,161	3418964	56,48
25	0,204	3983598	55,62
25	0,259	4625015	54,76
25	0,328	5354714	53,9
25	0,416	6180981	53,03
25	0,528	7113390	52,16
25	0,669	8166144	51,28
25	0,849	9348846	50,39
25	1,08	10677330	49,51
25	1,37	12163754	48,62
25	1,73	13824213	47,74
25	2,2	15671503	46,85
25	2,79	17722546	45,96
25	3,53	19995016	45,08
25	4,48	22505219	44,2
25	5,68	25271161	43,32
25	7,21	28309845	42,44
25	9,14	31636905	41,57
25	11,6	35280427	40,7
25	14,7	39251818	39,83
25	18,7	43569328	38,97
25	23,7	48271548	38,11
25	30	53370710	37,28
35	0,1	262499	67,99
35	0,127	314971	67,46
35	0,161	376948	66,89
35	0,204	450058	66,33
35	0,259	536680	65,72
35	0,328	638346	65,09
35	0,416	757378	64,43
35	0,528	896774	63,78
35	0,669	1058935	63,13
35	0,849	1248000	62,4
35	1,08	1467872	61,62
35	1,37	1722775	60,82
35	1,73	2017304	59,98
35	2,2	2355809	59,08
35	2,79	2743486	58,13
35	3,53	3185268	57,14
35	4,48	3686425	56,08
35	5,68	4251049	54,95
35	7,21	4879641	53,75
35	9,14	5618154	52,43
35	11,6	6457126	51,01
35	14,7	7393434	49,5
35	18,7	8424023	47,97
35	23,7	9568968	46,29
35	30	10809828	44,62

45	0,1	40263	74,22
45	0,127	48897	73,73
45	0,161	59392	73,2
45	0,204	71983	72,69
45	0,259	87088	72,18
45	0,328	105209	71,69
45	0,416	126923	71,2
45	0,528	152950	70,71
45	0,669	184077	70,2
45	0,849	221326	69,75
45	1,08	265875	69,23
45	1,37	318993	68,72
45	1,73	382139	68,21
45	2,2	457011	67,68
45	2,79	545716	67,13
45	3,53	650554	66,55
45	4,48	774249	65,93
45	5,68	919712	65,29
45	7,21	1090352	64,62
45	9,14	1290053	63,9
45	11,6	1522888	63,13
45	14,7	1793467	62,32
45	18,7	2106555	61,45
45	23,7	2468690	60,52
45	30	2884547	59,55
55	0,1	6687	80,11
55	0,127	8274	79,6
55	0,161	10200	79,04
55	0,204	12552	78,48
55	0,259	15420	77,92
55	0,328	18925	77,38
55	0,416	23205	76,84
55	0,528	28404	76,32
55	0,669	34710	75,8
55	0,849	42355	75,3
55	1,08	51616	74,81
55	1,37	62810	74,32
55	1,73	76336	73,84
55	2,2	92651	73,38
55	2,79	112324	72,92
55	3,53	136014	72,47
55	4,48	164500	72,01
55	5,68	198716	71,55
55	7,21	239758	71,08
55	9,14	288960	70,59
55	11,6	347856	70,09
55	14,7	418221	69,58
55	18,7	502180	69,03
55	23,7	602161	68,46
55	30	721003	67,86
65	0,1	1255	84,88
65	0,127	1569	84,48
65	0,161	1961	83,95
65	0,204	2451	83,45
65	0,259	3056	82,93

65	0,328	3801	82,4
65	0,416	4719	81,87
65	0,528	5852	81,33
65	0,669	7244	80,81
65	0,849	8956	80,29
65	1,08	11060	79,77
65	1,37	13637	79,26
65	1,73	16795	78,75
65	2,2	20659	78,25
65	2,79	25383	77,75
65	3,53	31142	77,26
65	4,48	38156	76,78
65	5,68	46689	76,31
65	7,21	57058	75,83
65	9,14	69671	75,37
65	11,6	84979	74,9
65	14,7	103536	74,43
65	18,7	126034	73,96
65	23,7	153080	73,6
65	30	185937	73,14

---

**APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO DE  
CISALHAMENTO DINÂMICO DOS LIGANTES (PAV)**

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 30/45 A PAV</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	43697558	33,43
5	0,127	47822885	32,73
5	0,161	52192783	31,99
5	0,204	56833066	31,3
5	0,259	61735038	30,61
5	0,328	66892936	29,93
5	0,416	72367693	29,26
5	0,528	78153862	28,6
5	0,669	84237602	27,95
5	0,849	90628841	27,3
5	1,08	97345956	26,67
5	1,37	104377214	26,02
5	1,73	111725435	25,39
5	2,2	119372826	24,76
5	2,79	127328011	24,14
5	3,53	135593401	23,51
5	4,48	144143406	22,89
5	5,68	152949779	22,27
5	7,21	162065414	21,64
5	9,14	171442871	21,02
5	11,6	181068865	20,39
5	14,7	190940976	19,76
5	18,7	201019124	19,13
5	23,7	211321683	18,5
5	30	221752917	17,87
15	0,1	9833709	44,54
15	0,127	11121597	43,69
15	0,161	12526557	42,84
15	0,204	14059346	42,02
15	0,259	15733304	41,24
15	0,328	17566151	40,47
15	0,416	19555611	39,72
15	0,528	21719591	39
15	0,669	24069234	38,29
15	0,849	26618455	37,58
15	1,08	29379833	36,89
15	1,37	32373114	36,21
15	1,73	35604706	35,53
15	2,2	39091588	34,86
15	2,79	42841591	34,19
15	3,53	46868862	33,52
15	4,48	51189196	32,85
15	5,68	55807277	32,19
15	7,21	60734850	31,51
15	9,14	65973886	30,84
15	11,6	71532556	30,16
15	14,7	77419859	29,48
15	18,7	83648052	28,79
15	23,7	90207683	28,11
15	30	97112870	27,44

25	0,1	1583095	57,11
25	0,127	1859403	56,21
25	0,161	2171570	55,31
25	0,204	2525188	54,42
25	0,259	2924948	53,54
25	0,328	3375207	52,67
25	0,416	3884272	51,82
25	0,528	4456179	50,97
25	0,669	5099615	50,13
25	0,849	5821313	49,3
25	1,08	6628866	48,48
25	1,37	7530814	47,68
25	1,73	8536548	46,88
25	2,2	9655379	46,1
25	2,79	10896932	45,33
25	3,53	12272484	44,57
25	4,48	13793181	43,82
25	5,68	15472157	43,07
25	7,21	17320323	42,34
25	9,14	19351667	41,61
25	11,6	21579450	40,88
25	14,7	24016695	40,16
25	18,7	26684339	39,47
25	23,7	29589357	38,79
25	30	32747601	38,18
35	0,1	155879	69,58
35	0,127	188301	68,99
35	0,161	226605	68,35
35	0,204	271966	67,72
35	0,259	325731	67,09
35	0,328	389336	66,43
35	0,416	464336	65,73
35	0,528	552632	65,08
35	0,669	656020	64,41
35	0,849	777600	63,68
35	1,08	919782	62,95
35	1,37	1085029	62,15
35	1,73	1277046	61,34
35	2,2	1499680	60,5
35	2,79	1756771	59,62
35	3,53	2052340	58,71
35	4,48	2390717	57,76
35	5,68	2775051	56,77
35	7,21	3204884	55,73
35	9,14	3624937	54,54
35	11,6	4041957	53,25
35	14,7	4456699	52,23
35	18,7	4931351	51,5
35	23,7	5659160	50,12
35	30	6472313	48,85
45	0,1	23316	76,37
45	0,127	28510	75,82
45	0,161	34815	75,21
45	0,204	42423	74,62
45	0,259	51600	74,03
45	0,328	62679	73,46

45	0,416	76045	72,9
45	0,528	92120	72,35
45	0,669	111418	71,77
45	0,849	134554	71,21
45	1,08	162263	70,69
45	1,37	195374	70,13
45	1,73	234896	69,56
45	2,2	282075	69,01
45	2,79	338201	68,43
45	3,53	405003	67,84
45	4,48	484265	67,23
45	5,68	578076	66,6
45	7,21	688844	65,94
45	9,14	819323	65,26
45	11,6	972374	64,54
45	14,7	1150993	63,76
45	18,7	1359321	62,9
45	23,7	1602426	62,01
45	30	1884626	61,1
55	0,1	3843	82,28
55	0,127	4780	81,77
55	0,161	5929	81,2
55	0,204	7339	80,63
55	0,259	9075	80,04
55	0,328	11210	79,46
55	0,416	13817	78,88
55	0,528	16999	78,32
55	0,669	20882	77,75
55	0,849	25610	77,19
55	1,08	31359	76,64
55	1,37	38347	76,1
55	1,73	46833	75,57
55	2,2	57127	75,04
55	2,79	69586	74,52
55	3,53	84660	74,01
55	4,48	102852	73,49
55	5,68	124823	72,97
55	7,21	151275	72,45
55	9,14	183077	71,92
55	11,6	221275	71,39
55	14,7	267059	70,84
55	18,7	321900	70,27
55	23,7	387473	69,69
55	30	465732	69,09
65	0,1	718	86,4
65	0,127	904	86,07
65	0,161	1134	85,59
65	0,204	1422	85,17
65	0,259	1781	84,67
65	0,328	2229	84,2
65	0,416	2785	83,69
65	0,528	3473	83,2
65	0,669	4324	82,68
65	0,849	5376	82,16
65	1,08	6673	81,63
65	1,37	8273	81,11

65	1,73	10242	80,58
65	2,2	12663	80,06
65	2,79	15634	79,53
65	3,53	19278	79,01
65	4,48	23737	78,49
65	5,68	29189	77,98
65	7,21	35845	77,47
65	9,14	43953	76,94
65	11,6	53845	76,43
65	14,7	65897	75,92
65	18,7	80592	75,42
65	23,7	98481	74,9
65	30	120326	74,44

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 30/45 B PAV**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	41603371	31,56
5	0,127	45344915	30,94
5	0,161	49363075	30,31
5	0,204	53544550	29,69
5	0,259	57949831	29,1
5	0,328	62577141	28,54
5	0,416	67483835	27,95
5	0,528	72652238	27,38
5	0,669	78051145	26,85
5	0,849	83758882	26,31
5	1,08	89758926	25,78
5	1,37	96030965	25,25
5	1,73	102595650	24,72
5	2,2	109448308	24,2
5	2,79	116631976	23,68
5	3,53	124136844	23,17
5	4,48	131902069	22,65
5	5,68	139942964	22,13
5	7,21	148307713	21,61
5	9,14	156921878	21,09
5	11,6	165838077	20,56
5	14,7	175014971	20,03
5	18,7	184445217	19,49
5	23,7	194159601	18,94
5	30	204122419	18,38
15	0,1	10492504	41,31
15	0,127	11780765	40,49
15	0,161	13160194	39,71
15	0,204	14658058	38,97
15	0,259	16280997	38,28
15	0,328	18037243	37,61
15	0,416	19925913	36,94
15	0,528	21974628	36,31
15	0,669	24187181	35,69
15	0,849	26577730	35,08
15	1,08	29150171	34,49
15	1,37	31921013	33,9
15	1,73	34903278	33,33
15	2,2	38100302	32,76
15	2,79	41530487	32,2

15	3,53	45206219	31,63
15	4,48	49128655	31,08
15	5,68	53309704	30,52
15	7,21	57761186	29,97
15	9,14	62495377	29,4
15	11,6	67524308	28,84
15	14,7	72855117	28,28
15	18,7	78494278	27,71
15	23,7	84456221	27,14
15	30	90759475	26,58
25	0,1	1923395	52,51
25	0,127	2231465	51,71
25	0,161	2575205	50,86
25	0,204	2958135	50,06
25	0,259	3386338	49,28
25	0,328	3864174	48,5
25	0,416	4397129	47,74
25	0,528	4990699	46,98
25	0,669	5650737	46,23
25	0,849	6383926	45,49
25	1,08	7196625	44,77
25	1,37	8097207	44,06
25	1,73	9091808	43,36
25	2,2	10187770	42,67
25	2,79	11393801	42
25	3,53	12721487	41,33
25	4,48	14178224	40,68
25	5,68	15775623	40,03
25	7,21	17524059	39,4
25	9,14	19430905	38,77
25	11,6	21513479	38,14
25	14,7	23782502	37,53
25	18,7	26255884	36,92
25	23,7	28950313	36,35
25	30	31881256	35,81
35	0,1	206831	64,54
35	0,127	246368	63,91
35	0,161	292332	63,26
35	0,204	346078	62,61
35	0,259	408638	61,97
35	0,328	481433	61,33
35	0,416	565923	60,67
35	0,528	663569	60,03
35	0,669	776824	59,36
35	0,849	907775	58,68
35	1,08	1058299	57,97
35	1,37	1230695	57,24
35	1,73	1427659	56,5
35	2,2	1652032	55,72
35	2,79	1907298	54,91
35	3,53	2196336	54,08
35	4,48	2522704	53,22
35	5,68	2889729	52,33
35	7,21	3300932	51,41
35	9,14	3760019	50,46
35	11,6	4267993	49,49

35	14,7	4812917	48,52
35	18,7	5449408	47,46
35	23,7	6160856	46,32
35	30	6940949	45,18
45	0,1	33523	72,06
45	0,127	40464	71,44
45	0,161	48793	70,78
45	0,204	58777	70,12
45	0,259	70650	69,48
45	0,328	84745	68,86
45	0,416	101491	68,26
45	0,528	121333	67,67
45	0,669	144831	67,06
45	0,849	172619	66,5
45	1,08	205474	65,94
45	1,37	244210	65,35
45	1,73	289841	64,78
45	2,2	343511	64,22
45	2,79	406485	63,65
45	3,53	480294	63,06
45	4,48	566620	62,47
45	5,68	667269	61,86
45	7,21	784362	61,24
45	9,14	920281	60,6
45	11,6	1077528	59,94
45	14,7	1258873	59,25
45	18,7	1466987	58,52
45	23,7	1705016	57,74
45	30	1977299	56,91
55	0,1	5701	79,3
55	0,127	7027	78,68
55	0,161	8642	77,97
55	0,204	10603	77,28
55	0,259	12983	76,58
55	0,328	15875	75,89
55	0,416	19380	75,21
55	0,528	23612	74,55
55	0,669	28707	73,89
55	0,849	34843	73,25
55	1,08	42216	72,62
55	1,37	51064	72,02
55	1,73	61668	71,42
55	2,2	74348	70,83
55	2,79	89522	70,26
55	3,53	107641	69,7
55	4,48	129212	69,16
55	5,68	154943	68,62
55	7,21	185534	68,07
55	9,14	221870	67,53
55	11,6	264965	66,99
55	14,7	316025	66,43
55	18,7	376387	65,87
55	23,7	447657	65,3
55	30	531700	64,71
65	0,1	1073	84,5

65	0,127	1341	84,04
65	0,161	1674	83,51
65	0,204	2087	82,95
65	0,259	2600	82,33
65	0,328	3233	81,76
65	0,416	4011	81,13
65	0,528	4966	80,5
65	0,669	6138	79,86
65	0,849	7571	79,23
65	1,08	9322	78,6
65	1,37	11460	77,96
65	1,73	14066	77,33
65	2,2	17237	76,71
65	2,79	21085	76,09
65	3,53	25748	75,49
65	4,48	31391	74,9
65	5,68	38210	74,32
65	7,21	46433	73,74
65	9,14	56349	73,18
65	11,6	68309	72,64
65	14,7	82707	72,1
65	18,7	100023	71,58
65	23,7	120673	71,17
65	30	145565	70,71

---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 50/70 PA 85 PAV**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	66031036	32,79
5	0,127	72056266	31,88
5	0,161	78350615	30,97
5	0,204	84973145	30,09
5	0,259	91893492	29,25
5	0,328	99135386	28,41
5	0,416	106741777	27,6
5	0,528	114696706	26,81
5	0,669	122954606	26,03
5	0,849	131556138	25,27
5	1,08	140446680	24,52
5	1,37	149591600	23,79
5	1,73	159060640	23,08
5	2,2	168845400	22,37
5	2,79	178874881	21,68
5	3,53	189136714	21
5	4,48	199665315	20,33
5	5,68	210380533	19,68
5	7,21	221324509	19,03
5	9,14	232417171	18,39
5	11,6	243665123	17,76
5	14,7	255073125	17,14
5	18,7	266570360	16,53
5	23,7	278165057	15,92
5	30	289891215	15,32
15	0,1	15z408264	46,49
15	0,127	17456258	45,38
15	0,161	19686640	44,29
15	0,204	22128619	43,22

15	0,259	24797972	42,17
15	0,328	27691579	41,15
15	0,416	30831291	40,16
15	0,528	34240749	39,18
15	0,669	37920644	38,22
15	0,849	41893959	37,28
15	1,08	46167648	36,35
15	1,37	50753988	35,44
15	1,73	55655037	34,55
15	2,2	60894404	33,68
15	2,79	66470784	32,82
15	3,53	72383559	31,96
15	4,48	78662372	31,12
15	5,68	85282134	30,29
15	7,21	92264536	29,47
15	9,14	99618029	28,66
15	11,6	107333992	27,86
15	14,7	115396367	27,06
15	18,7	123812857	26,27
15	23,7	132618239	25,49
15	30	141777910	24,71
25	0,1	2645750	60,26
25	0,127	3114641	59,31
25	0,161	3650012	58,24
25	0,204	4264325	57,18
25	0,259	4962694	56,09
25	0,328	5754801	55,01
25	0,416	6652185	53,91
25	0,528	7665001	52,81
25	0,669	8804692	51,71
25	0,849	10082101	50,62
25	1,08	11508751	49,53
25	1,37	13098779	48,45
25	1,73	14864370	47,38
25	2,2	16819116	46,33
25	2,79	18978653	45,29
25	3,53	21352066	44,27
25	4,48	23960746	43,25
25	5,68	26820526	42,25
25	7,21	29939143	41,26
25	9,14	33338236	40,29
25	11,6	37036138	39,32
25	14,7	41046897	38,35
25	18,7	45384348	37,4
25	23,7	50088310	36,45
25	30	55174897	35,53
35	0,1	335667	69,61
35	0,127	403473	69,12
35	0,161	484130	68,53
35	0,204	579832	67,89
35	0,259	693389	67,17
35	0,328	827302	66,4
35	0,416	984978	65,62
35	0,528	1169215	64,73
35	0,669	1384409	63,81
35	0,849	1634523	62,8

35	1,08	1922112	61,7
35	1,37	2235177	60,49
35	1,73	2353408	59,62
35	2,2	2412361	60,09
35	2,79	2545091	60,49
35	3,53	2789660	60,61
35	4,48	3121349	60,41
35	5,68	3551698	59,78
35	7,21	4576547	55,81
35	9,14	6145594	49,63
35	11,6	7149074	47,68
35	14,7	8146237	46,02
35	18,7	9195386	44,38
35	23,7	10285821	42,7
35	30	11421179	41,1
45	0,1	52881	74,53
45	0,127	64187	74,34
45	0,161	77988	74,02
45	0,204	94639	73,67
45	0,259	114784	73,28
45	0,328	139093	72,87
45	0,416	168396	72,45
45	0,528	203576	71,97
45	0,669	245651	71,51
45	0,849	296037	71
45	1,08	356424	70,48
45	1,37	428605	69,9
45	1,73	514684	69,31
45	2,2	617025	68,68
45	2,79	738258	68
45	3,53	881581	67,26
45	4,48	1050243	66,46
45	5,68	1248148	65,6
45	7,21	1479684	64,66
45	9,14	1748238	63,63
45	11,6	2059317	62,52
45	14,7	2417122	61,34
45	18,7	2824716	60,05
45	23,7	3281016	58,59
45	30	3716333	56,93
55	0,1	9719	75,63
55	0,127	11828	75,92
55	0,161	14411	76,03
55	0,204	17587	76,08
55	0,259	21470	76,06
55	0,328	26198	75,99
55	0,416	31952	75,87
55	0,528	38961	75,71
55	0,669	47499	75,49
55	0,849	57880	75,25
55	1,08	70492	74,95
55	1,37	85795	74,64
55	1,73	104324	74,3
55	2,2	126732	73,94
55	2,79	153783	73,54
55	3,53	186397	73,13

55	4,48	225625	72,68
55	5,68	272823	72,21
55	7,21	329464	71,71
55	9,14	397364	71,18
55	11,6	478513	70,61
55	14,7	575311	70
55	18,7	690469	69,34
55	23,7	827002	68,62
55	30	988375	67,83
65	0,1	2487	71,82
65	0,127	2986	72,54
65	0,161	3604	73,11
65	0,204	4356	73,64
65	0,259	5270	74,1
65	0,328	6385	74,52
65	0,416	7749	74,88
65	0,528	9419	75,19
65	0,669	11464	75,45
65	0,849	13962	75,65
65	1,08	17014	75,79
65	1,37	20741	75,88
65	1,73	25293	75,92
65	2,2	30844	75,9
65	2,79	37617	75,83
65	3,53	45862	75,71
65	4,48	55898	75,55
65	5,68	68113	75,35
65	7,21	82953	75,12
65	9,14	100956	74,86
65	11,6	122763	74,57
65	14,7	149147	74,25
65	18,7	181101	73,91
65	23,7	219740	73,54
65	30	266404	73,16

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 A PAV**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	31681056	39,76
5	0,127	35271949	38,76
5	0,161	39111794	37,77
5	0,204	43215733	36,84
5	0,259	47631168	35,92
5	0,328	52305166	35,02
5	0,416	57325649	34,15
5	0,528	62657732	33,29
5	0,669	68335642	32,45
5	0,849	74371290	31,62
5	1,08	80775391	30,82
5	1,37	87537819	30,02
5	1,73	94647720	29,24
5	2,2	102145497	28,47
5	2,79	109990382	27,71
5	3,53	118208834	26,96
5	4,48	126784607	26,23
5	5,68	135705163	25,51
5	7,21	144981168	24,79

5	9,14	154612678	24,08
5	11,6	164581976	23,38
5	14,7	174901334	22,68
5	18,7	185516330	21,98
5	23,7	196529251	21,29
5	30	207866184	20,6
15	0,1	5839111	53,8
15	0,127	6776702	52,77
15	0,161	7826857	51,7
15	0,204	8995457	50,63
15	0,259	10296520	49,59
15	0,328	11742787	48,56
15	0,416	13353956	47,54
15	0,528	15133612	46,53
15	0,669	17103470	45,53
15	0,849	19275908	44,53
15	1,08	21662474	43,56
15	1,37	24277818	42,59
15	1,73	27137689	41,64
15	2,2	30256610	40,7
15	2,79	33651338	39,77
15	3,53	37338018	38,85
15	4,48	41325150	37,95
15	5,68	45629865	37,05
15	7,21	50269686	36,16
15	9,14	55249254	35,28
15	11,6	60591077	34,41
15	14,7	66306071	33,59
15	18,7	72419495	32,74
15	23,7	78942293	31,88
15	30	85914951	31,03
25	0,1	809043	64,74
25	0,127	966379	64,18
25	0,161	1152188	63,48
25	0,204	1368168	62,76
25	0,259	1620878	62,04
25	0,328	1913925	61,28
25	0,416	2255512	60,45
25	0,528	2649182	59,64
25	0,669	3103913	58,77
25	0,849	3627258	57,87
25	1,08	4228014	56,97
25	1,37	4915059	56,04
25	1,73	5698682	55,09
25	2,2	6589488	54,12
25	2,79	7598521	53,14
25	3,53	8738354	52,15
25	4,48	10022991	51,15
25	5,68	11464908	50,14
25	7,21	13080820	49,13
25	9,14	14887334	48,11
25	11,6	16901777	47,07
25	14,7	19144361	46,03
25	18,7	21639402	44,98
25	23,7	24422135	43,92
25	30	27523699	42,89

35	0,1	90523	69,61
35	0,127	109242	69,52
35	0,161	131599	69,34
35	0,204	158408	69,14
35	0,259	190525	68,9
35	0,328	228924	68,64
35	0,416	274840	68,31
35	0,528	329764	67,93
35	0,669	395236	67,54
35	0,849	473015	67,09
35	1,08	565385	66,6
35	1,37	674710	66,02
35	1,73	803872	65,39
35	2,2	955984	64,72
35	2,79	1134510	63,98
35	3,53	1343640	63,18
35	4,48	1587630	62,32
35	5,68	1870965	61,39
35	7,21	2198603	60,39
35	9,14	2575513	59,32
35	11,6	3006743	58,16
35	14,7	3496402	56,91
35	18,7	4045405	55,56
35	23,7	4639985	54,06
35	30	5265229	52,58
45	0,1	17338	70,08
45	0,127	20857	70,15
45	0,161	25104	70,16
45	0,204	30200	70,19
45	0,259	36345	70,21
45	0,328	43773	70,23
45	0,416	52730	70,23
45	0,528	63530	70,23
45	0,669	76543	70,21
45	0,849	92217	70,14
45	1,08	111097	70,06
45	1,37	133820	69,96
45	1,73	161163	69,82
45	2,2	194044	69,65
45	2,79	233546	69,43
45	3,53	280915	69,17
45	4,48	337651	68,85
45	5,68	405491	68,48
45	7,21	486462	68,06
45	9,14	582905	67,57
45	11,6	697551	67,03
45	14,7	833481	66,42
45	18,7	994114	65,74
45	23,7	1183438	64,98
45	30	1405945	64,16
55	0,1	3949	71,32
55	0,127	4756	71,15
55	0,161	5731	70,97
55	0,204	6901	70,83
55	0,259	8306	70,73

55	0,328	9999	70,67
55	0,416	12039	70,64
55	0,528	14498	70,64
55	0,669	17460	70,67
55	0,849	21030	70,71
55	1,08	25338	70,76
55	1,37	30538	70,82
55	1,73	36814	70,89
55	2,2	44400	70,94
55	2,79	53567	70,99
55	3,53	64649	71,03
55	4,48	78031	71,04
55	5,68	94219	71,04
55	7,21	113798	71
55	9,14	137424	70,94
55	11,6	165932	70,83
55	14,7	200370	70,69
55	18,7	241900	70,49
55	23,7	291991	70,25
55	30	352354	69,97
65	0,1	1023	74,97
65	0,127	1245	74,54
65	0,161	1514	74,06
65	0,204	1836	73,6
65	0,259	2228	73,19
65	0,328	2699	72,8
65	0,416	3265	72,46
65	0,528	3946	72,16
65	0,669	4763	71,92
65	0,849	5748	71,72
65	1,08	6932	71,56
65	1,37	8358	71,46
65	1,73	10076	71,39
65	2,2	12148	71,36
65	2,79	14649	71,36
65	3,53	17670	71,4
65	4,48	21320	71,45
65	5,68	25739	71,52
65	7,21	31089	71,59
65	9,14	37571	71,66
65	11,6	45433	71,72
65	14,7	54994	71,78
65	18,7	66628	71,82
65	23,7	80828	71,88
65	30	98165	71,98

---



---

**Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico AMP 60/85 B PAV**

---

Temperatura (°C)	f (Hz)	G*  (Pa)	$\phi$ (°)
5	0,1	14214225	31,03
5	0,127	15473229	30,61
5	0,161	16825051	30,24
5	0,204	18248343	29,87
5	0,259	19765277	29,52
5	0,328	21376318	29,18
5	0,416	23095167	28,85
5	0,528	24928471	28,54

5	0,669	26878683	28,25
5	0,849	28959998	27,96
5	1,08	31177138	27,68
5	1,37	33536565	27,4
5	1,73	36046453	27,14
5	2,2	38717271	26,88
5	2,79	41555409	26,62
5	3,53	44568904	26,37
5	4,48	47765517	26,13
5	5,68	51167801	25,88
5	7,21	54761874	25,64
5	9,14	58572784	25,4
5	11,6	62600495	25,21
5	14,7	66862179	24,99
5	18,7	71345913	24,77
5	23,7	76057815	24,55
5	30	80970709	24,36
15	0,1	4225285	36,9
15	0,127	4672116	36,47
15	0,161	5152238	36
15	0,204	5675715	35,58
15	0,259	6237947	35,17
15	0,328	6844301	34,77
15	0,416	7501673	34,39
15	0,528	8212755	34,03
15	0,669	8983349	33,68
15	0,849	9816918	33,33
15	1,08	10715461	33
15	1,37	11685225	32,68
15	1,73	12732587	32,38
15	2,2	13861618	32,08
15	2,79	15077639	31,79
15	3,53	16388931	31,51
15	4,48	17800033	31,24
15	5,68	19317310	30,97
15	7,21	20947966	30,72
15	9,14	22695180	30,47
15	11,6	24568683	30,24
15	14,7	26571426	30,02
15	18,7	28707687	29,83
15	23,7	30971323	29,7
15	30	33353347	29,65
25	0,1	1083211	43,11
25	0,127	1217484	42,68
25	0,161	1364558	42,26
25	0,204	1528557	41,8
25	0,259	1707855	41,42
25	0,328	1905676	41
25	0,416	2123378	40,61
25	0,528	2363834	40,21
25	0,669	2628020	39,82
25	0,849	2918427	39,45
25	1,08	3238217	39,09
25	1,37	3588102	38,72
25	1,73	3972032	38,37
25	2,2	4393090	38,04

25	2,79	4853144	37,7
25	3,53	5356595	37,39
25	4,48	5906216	37,08
25	5,68	6505043	36,79
25	7,21	7157060	36,52
25	9,14	7865437	36,27
25	11,6	8632773	36,08
25	14,7	9459586	35,94
25	18,7	10345363	35,88
25	23,7	11290469	35,96
25	30	12292732	36,27
35	0,1	221600	48,8
35	0,127	252171	48,49
35	0,161	286354	48,16
35	0,204	324800	47,83
35	0,259	367956	47,51
35	0,328	416341	47,18
35	0,416	470471	46,86
35	0,528	530938	46,55
35	0,669	598420	46,21
35	0,849	673368	45,9
35	1,08	756914	45,59
35	1,37	850014	45,29
35	1,73	953699	44,98
35	2,2	1069014	44,67
35	2,79	1197062	44,36
35	3,53	1338973	44,05
35	4,48	1496225	43,73
35	5,68	1670259	43,41
35	7,21	1862714	43,08
35	9,14	2075641	42,74
35	11,6	2310189	42,38
35	14,7	2567841	42,01
35	18,7	2850062	41,63
35	23,7	3159352	41,22
35	30	3496184	40,79
45	0,1	54772	51,57
45	0,127	62739	51,44
45	0,161	71847	51,25
45	0,204	82253	51,08
45	0,259	94075	50,9
45	0,328	107534	50,72
45	0,416	122872	50,55
45	0,528	140333	50,37
45	0,669	160127	50,19
45	0,849	182608	50
45	1,08	208089	49,82
45	1,37	236970	49,63
45	1,73	269688	49,43
45	2,2	306679	49,25
45	2,79	348507	49,05
45	3,53	395754	48,85
45	4,48	449090	48,64
45	5,68	509222	48,43
45	7,21	576922	48,22
45	9,14	653190	47,99

45	11,6	738949	47,76
45	14,7	835359	47,52
45	18,7	943631	47,26
45	23,7	1065314	47
45	30	1201842	46,72
55	0,1	14532	53,45
55	0,127	16742	53,35
55	0,161	19291	53,23
55	0,204	22210	53,12
55	0,259	25555	53,03
55	0,328	29399	52,94
55	0,416	33824	52,86
55	0,528	38898	52,79
55	0,669	44716	52,72
55	0,849	51386	52,65
55	1,08	59038	52,58
55	1,37	67805	52,51
55	1,73	77857	52,45
55	2,2	89381	52,38
55	2,79	102589	52,3
55	3,53	117708	52,22
55	4,48	135030	52,13
55	5,68	154849	52,04
55	7,21	177513	51,95
55	9,14	203455	51,84
55	11,6	233107	51,73
55	14,7	267017	51,6
55	18,7	305758	51,46
55	23,7	350071	51,32
55	30	400784	51,17
65	0,1	4432	55,96
65	0,127	5136	55,75
65	0,161	5946	55,52
65	0,204	6881	55,32
65	0,259	7956	55,17
65	0,328	9192	55,02
65	0,416	10622	54,91
65	0,528	12277	54,82
65	0,669	14185	54,75
65	0,849	16389	54,69
65	1,08	18929	54,64
65	1,37	21860	54,61
65	1,73	25242	54,59
65	2,2	29148	54,58
65	2,79	33657	54,57
65	3,53	38863	54,57
65	4,48	44875	54,57
65	5,68	51817	54,57
65	7,21	59836	54,57
65	9,14	69101	54,57
65	11,6	79814	54,56
65	14,7	92200	54,56
65	18,7	106539	54,56
65	23,7	123151	54,57
65	30	142435	54,63

---

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP 10/20 PAV</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	47262192	27,95
5	0,127	51045771	27,61
5	0,161	55031742	27,25
5	0,204	59207647	26,91
5	0,259	63682052	26,58
5	0,328	68384109	26,23
5	0,416	73340819	25,88
5	0,528	78575763	25,53
5	0,669	84068736	25,17
5	0,849	89876259	24,82
5	1,08	95995262	24,45
5	1,37	102411628	24,08
5	1,73	109178295	23,7
5	2,2	116254348	23,31
5	2,79	123661027	22,91
5	3,53	131369351	22,5
5	4,48	139407938	22,09
5	5,68	147776588	21,66
5	7,21	156449358	21,22
5	9,14	165429003	20,77
5	11,6	174724257	20,3
5	14,7	184304211	19,83
5	18,7	194131176	19,34
5	23,7	204181511	18,85
5	30	214450865	18,35
15	0,1	14961545	32,2
15	0,127	16378764	31,96
15	0,161	17882856	31,68
15	0,204	19499461	31,43
15	0,259	21228885	31,18
15	0,328	23081676	30,94
15	0,416	25073396	30,7
15	0,528	27216075	30,47
15	0,669	29516880	30,23
15	0,849	31992026	29,99
15	1,08	34654060	29,75
15	1,37	37507349	29,5
15	1,73	40564568	29,24
15	2,2	43842836	28,98
15	2,79	47343770	28,71
15	3,53	51094576	28,43
15	4,48	55095138	28,14
15	5,68	59356494	27,84
15	7,21	63906333	27,52
15	9,14	68740678	27,19
15	11,6	73865710	26,85
15	14,7	79295439	26,49
15	18,7	85024693	26,12
15	23,7	91069388	25,74
15	30	97408356	25,37
25	0,1	4260142	36,11
25	0,127	4712272	35,93
25	0,161	5202702	35,73

25	0,204	5733785	35,54
25	0,259	6311607	35,36
25	0,328	6939919	35,18
25	0,416	7624682	35,02
25	0,528	8371829	34,85
25	0,669	9186313	34,68
25	0,849	10073690	34,52
25	1,08	11040709	34,35
25	1,37	12094932	34,18
25	1,73	13242209	34
25	2,2	14492370	33,83
25	2,79	15850070	33,65
25	3,53	17326995	33,46
25	4,48	18930929	33,28
25	5,68	20671801	33,08
25	7,21	22559760	32,88
25	9,14	24604110	32,67
25	11,6	26813607	32,45
25	14,7	29201116	32,24
25	18,7	31767529	32,04
25	23,7	34530460	31,86
25	30	37478760	31,74
35	0,1	1046728	39,46
35	0,127	1162596	39,36
35	0,161	1289949	39,26
35	0,204	1430568	39,16
35	0,259	1585202	39,06
35	0,328	1755284	38,97
35	0,416	1942366	38,9
35	0,528	2148585	38,8
35	0,669	2375180	38,69
35	0,849	2623969	38,58
35	1,08	2896152	38,46
35	1,37	3193530	38,31
35	1,73	3517767	38,14
35	2,2	3869126	37,96
35	2,79	4241693	37,76
35	3,53	4621358	37,59
35	4,48	5000125	37,53
35	5,68	5502591	37,24
35	7,21	6078206	36,88
35	9,14	6701673	36,49
35	11,6	7370800	36,05
35	14,7	8090694	35,6
35	18,7	8872184	35,16
35	23,7	9709558	34,61
35	30	10614948	34,07
45	0,1	319727	40,91
45	0,127	355582	40,92
45	0,161	395737	40,92
45	0,204	440350	40,94
45	0,259	489777	40,98
45	0,328	544874	41,03
45	0,416	606288	41,09
45	0,528	674672	41,15
45	0,669	751057	41,23

45	0,849	835962	41,29
45	1,08	930686	41,37
45	1,37	1036278	41,44
45	1,73	1154209	41,52
45	2,2	1285569	41,57
45	2,79	1431907	41,61
45	3,53	1594744	41,64
45	4,48	1775475	41,64
45	5,68	1976101	41,61
45	7,21	2200076	41,56
45	9,14	2448799	41,49
45	11,6	2724352	41,39
45	14,7	3028759	41,26
45	18,7	3364495	41,11
45	23,7	3732599	40,88
45	30	4134099	40,62
55	0,1	101504	42,78
55	0,127	113510	42,65
55	0,161	126760	42,54
55	0,204	141611	42,47
55	0,259	158165	42,44
55	0,328	176645	42,45
55	0,416	197307	42,49
55	0,528	220434	42,56
55	0,669	246373	42,66
55	0,849	275453	42,77
55	1,08	308092	42,89
55	1,37	344720	43,04
55	1,73	385800	43,2
55	2,2	431936	43,37
55	2,79	483799	43,53
55	3,53	542154	43,7
55	4,48	607732	43,86
55	5,68	681592	44,02
55	7,21	764742	44,18
55	9,14	858374	44,31
55	11,6	963838	44,44
55	14,7	1082639	44,54
55	18,7	1216263	44,63
55	23,7	1366304	44,67
55	30	1534079	44,67
65	0,1	33237	46,67
65	0,127	37510	46,19
65	0,161	42282	45,74
65	0,204	47638	45,36
65	0,259	53589	45,05
65	0,328	60219	44,81
65	0,416	67618	44,63
65	0,528	75911	44,51
65	0,669	85228	44,44
65	0,849	95692	44,42
65	1,08	107432	44,45
65	1,37	120616	44,52
65	1,73	135461	44,62
65	2,2	152177	44,75
65	2,79	171040	44,91

65	3,53	192355	45,1
65	4,48	216462	45,3
65	5,68	243731	45,52
65	7,21	274651	45,74
65	9,14	309709	45,97
65	11,6	349529	46,2
65	14,7	394757	46,43
65	18,7	446211	46,65
65	23,7	504777	46,85
65	30	571409	47,06

<b>Dados experimentais - módulo de cisalhamento dinâmico CAP TLA PAV</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> G*  (Pa)</b>	<b>φ (°)</b>
5	0,1	89224263	27,4
5	0,127	96108699	26,75
5	0,161	103160250	26,14
5	0,204	110486958	25,55
5	0,259	118190167	24,95
5	0,328	126195170	24,38
5	0,416	134540103	23,81
5	0,528	143136627	23,27
5	0,669	152050786	22,73
5	0,849	161302344	22,2
5	1,08	170869498	21,67
5	1,37	180772696	21,15
5	1,73	190982965	20,63
5	2,2	201479354	20,12
5	2,79	212261772	19,62
5	3,53	223288006	19,12
5	4,48	234574449	18,62
5	5,68	246076026	18,12
5	7,21	257800140	17,62
5	9,14	269697223	17,12
5	11,6	281792392	16,62
5	14,7	294061097	16,12
5	18,7	306475439	15,62
5	23,7	319019022	15,1
5	30	331697862	14,59
15	0,1	25664126	37,02
15	0,127	28399523	36,26
15	0,161	31333918	35,52
15	0,204	34472765	34,81
15	0,259	37813028	34,13
15	0,328	41387364	33,46
15	0,416	45194507	32,8
15	0,528	49269455	32,17
15	0,669	53613164	31,54
15	0,849	58237566	30,93
15	1,08	63159791	30,32
15	1,37	68386478	29,73
15	1,73	73926379	29,15
15	2,2	79789548	28,56
15	2,79	85980991	27,99
15	3,53	92512912	27,42
15	4,48	99383582	26,85
15	5,68	106602519	26,29

15	7,21	114176418	25,72
15	9,14	122112404	25,16
15	11,6	130413345	24,59
15	14,7	139080432	24,02
15	18,7	148109749	23,44
15	23,7	157487639	22,86
15	30	167235709	22,28
25	0,1	5476320	47,88
25	0,127	6253044	47,09
25	0,161	7108929	46,28
25	0,204	8056093	45,49
25	0,259	9102075	44,72
25	0,328	10253982	43,96
25	0,416	11520258	43,21
25	0,528	12915408	42,49
25	0,669	14447151	41,76
25	0,849	16125681	41,04
25	1,08	17963508	40,33
25	1,37	19970906	39,64
25	1,73	22161354	38,95
25	2,2	24543652	38,27
25	2,79	27132258	37,59
25	3,53	29941901	36,93
25	4,48	32984170	36,27
25	5,68	36270525	35,62
25	7,21	39812940	34,97
25	9,14	43630745	34,33
25	11,6	47734531	33,69
25	14,7	52138813	33,05
25	18,7	56860640	32,42
25	23,7	61914452	31,78
25	30	67315554	31,18
35	0,1	757408	58,18
35	0,127	884393	57,53
35	0,161	1029632	56,85
35	0,204	1195539	56,16
35	0,259	1384647	55,44
35	0,328	1599583	54,75
35	0,416	1843663	54
35	0,528	2119870	53,25
35	0,669	2431143	52,48
35	0,849	2780261	51,69
35	1,08	3169135	50,86
35	1,37	3598568	49,99
35	1,73	4061578	49,06
35	2,2	4532792	48,08
35	2,79	5003643	47,19
35	3,53	5633702	46,22
35	4,48	6346062	45,2
35	5,68	7129371	44,15
35	7,21	7980027	43,08
35	9,14	8900357	41,99
35	11,6	9890826	40,88
35	14,7	10953137	39,74
35	18,7	12094943	38,6
35	23,7	13300463	37,35

35	30	14575909	36,13
45	0,1	134369	65,14
45	0,127	159324	64,64
45	0,161	188701	64,09
45	0,204	223233	63,55
45	0,259	263609	63,02
45	0,328	310736	62,51
45	0,416	365733	61,98
45	0,528	430083	61,43
45	0,669	505096	60,9
45	0,849	592254	60,4
45	1,08	693073	59,86
45	1,37	809800	59,28
45	1,73	944555	58,72
45	2,2	1099875	58,14
45	2,79	1278304	57,53
45	3,53	1482785	56,89
45	4,48	1716479	56,21
45	5,68	1983295	55,5
45	7,21	2286484	54,76
45	9,14	2630121	53,99
45	11,6	3018090	53,17
45	14,7	3452605	52,3
45	18,7	3935396	51,38
45	23,7	4463817	50,34
45	30	4964974	49,27
55	0,1	24315	72,03
55	0,127	29403	71,42
55	0,161	35462	70,77
55	0,204	42656	70,14
55	0,259	51261	69,54
55	0,328	61539	68,95
55	0,416	73727	68,39
55	0,528	88191	67,85
55	0,669	105322	67,33
55	0,849	125602	66,79
55	1,08	149590	66,3
55	1,37	177948	65,81
55	1,73	211449	65,33
55	2,2	250950	64,85
55	2,79	297421	64,37
55	3,53	351982	63,89
55	4,48	415971	63,4
55	5,68	490888	62,91
55	7,21	578475	62,4
55	9,14	680696	61,88
55	11,6	799701	61,33
55	14,7	937997	60,77
55	18,7	1098179	60,18
55	23,7	1283304	59,55
55	30	1495914	58,87
65	0,1	4581	78,83
65	0,127	5634	78,18
65	0,161	6915	77,48
65	0,204	8484	76,77

65	0,259	10388	76,07
65	0,328	12684	75,39
65	0,416	15456	74,72
65	0,528	18795	74,07
65	0,669	22818	73,44
65	0,849	27663	72,82
65	1,08	33483	72,23
65	1,37	40465	71,66
65	1,73	48826	71,1
65	2,2	58817	70,57
65	2,79	70753	70,05
65	3,53	84991	69,55
65	4,48	101972	69,06
65	5,68	122191	68,58
65	7,21	146235	68,11
65	9,14	174799	67,64
65	11,6	208695	67,18
65	14,7	248893	66,72
65	18,7	296500	66,25
65	23,7	352871	65,78
65	30	419493	65,3

---

## APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MÓDULO COMPLEXO DAS MISTURAS

Dados do ensaio de módulo complexo para a mistura DERSA - FX III - 30/45 A

Temperatura (°C)	f (Hz)	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)
-10	0,1	28359	4,09
-10	0,5	30339	3,20
-10	1	31103	2,88
-10	5	32625	2,23
-10	10	33178	2,01
-10	25	33799	1,72
4	0,1	17847	10,06
4	0,5	20891	8,08
4	1	22160	7,34
4	5	24896	5,85
4	10	25965	5,27
4	25	27249	4,57
20	0,1	5837	25,67
20	0,5	8611	21,06
20	1	9953	19,35
20	5	13409	15,32
20	10	15000	13,88
20	25	17087	12,07
40	0,1	326	39,34
40	0,5	716	38,69
40	1	999	37,61
40	5	2094	37,12
40	10	2774	35,43
40	25	3916	33,96
54	0,1	66	49,66
54	0,5	138	40,46
54	1	196	39,84
54	5	461	37,79
54	10	691	34,34
54	25	1167	22,22

Dados do ensaio de módulo complexo para a mistura DERSA - FX III - 30/45 B

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b> E*  (MPa)</b>	<b><math>\varphi</math>(°)</b>
4	0,1	16662	9,54
4	0,5	19332	7,87
4	1	20476	7,23
4	5	23011	5,97
4	10	24043	5,50
4	25	25369	4,97
20	0,1	6551	22,42
20	0,5	9251	18,22
20	1	10505	16,78
20	5	13624	13,37
20	10	14984	12,16
20	25	16727	10,73
40	0,1	422	36,41
40	0,5	860	35,60
40	1	1150	34,76
40	5	2229	34,49
40	10	2884	33,70
40	25	3974	31,54

Dados do ensaio de módulo complexo para a mistura DERSA - FX III - 50/70 PA 85

Temperatura (°C)	f (Hz)	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)
-10	0,1	26063,5	4,175
-10	0,5	27775,5	3,32
-10	1	28452	2,99
-10	5	29888	2,33
-10	10	30415,5	2,095
-10	25	31016	1,84
4	0,1	15432	11,375
4	0,5	18191,5	8,815
4	1	19350,5	7,92
4	5	21838	6,155
4	10	22782	5,515
4	25	23822	4,85
20	0,1	5610	27,215
20	0,5	8456	21,51
20	1	9809	19,405
20	5	13099,5	14,78
20	10	14560	13,19
20	25	16439,5	11,295
40	0,1	435,8	39,47
40	0,5	1006,7	39,145
40	1	1409	37,95
40	5	2892	36,31
40	10	3772,5	34,38
40	25	5176,5	31,06
54	0,1	95,1	41,055
54	0,5	175,6	40,795
54	1	243,4	39,13
54	5	598,15	38,6
54	10	897,65	35,035
54	25	1508	22,42

Dados do ensaio de módulo complexo para a mistura DERSA - FX III - 60/85E A

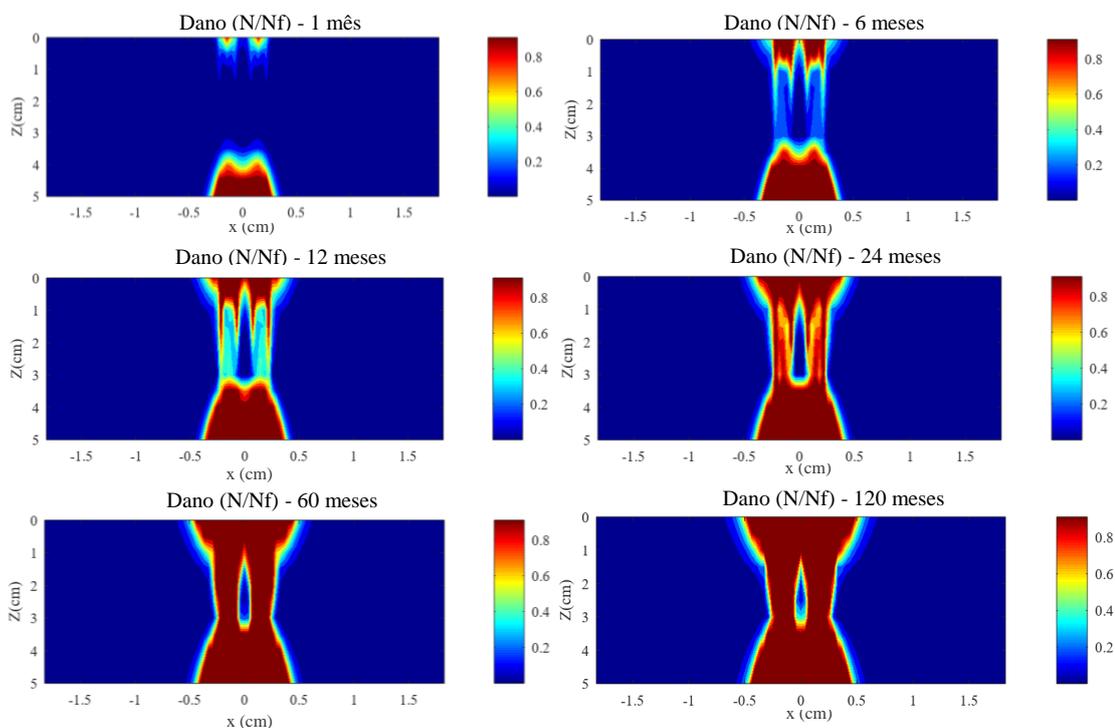
Temperatura (°C)	f (Hz)	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)
-10	0,1	22841,5	5,82
-10	0,5	24937,5	4,635
-10	1	25777	4,18
-10	5	27510	3,27
-10	10	28172,5	2,94
-10	25	28991	2,605
4	0,1	12715	15,115
4	0,5	15933	11,67
4	1	17310,5	10,385
4	5	20254	8,015
4	10	21373,5	7,22
4	25	22703,5	6,17
20	0,1	3046,5	33,44
20	0,5	5288,5	28,38
20	1	6437	26,275
20	5	9596	20,575
20	10	11087,5	18,44
20	25	13145	15,69
40	0,1	226,75	39,345
40	0,5	443,25	39,125
40	1	598,55	38,825
40	5	1304	37,785
40	10	1818	37
40	25	2682,5	32,68
54	0,1	63,95	39,655
54	0,5	128,95	39,135
54	1	159,85	38,34
54	5	324,5	33,99
54	10	470,95	30,98
54	25	799,15	19,865

Dados do ensaio de módulo complexo para a mistura DERSA - FX III - 60/85E B

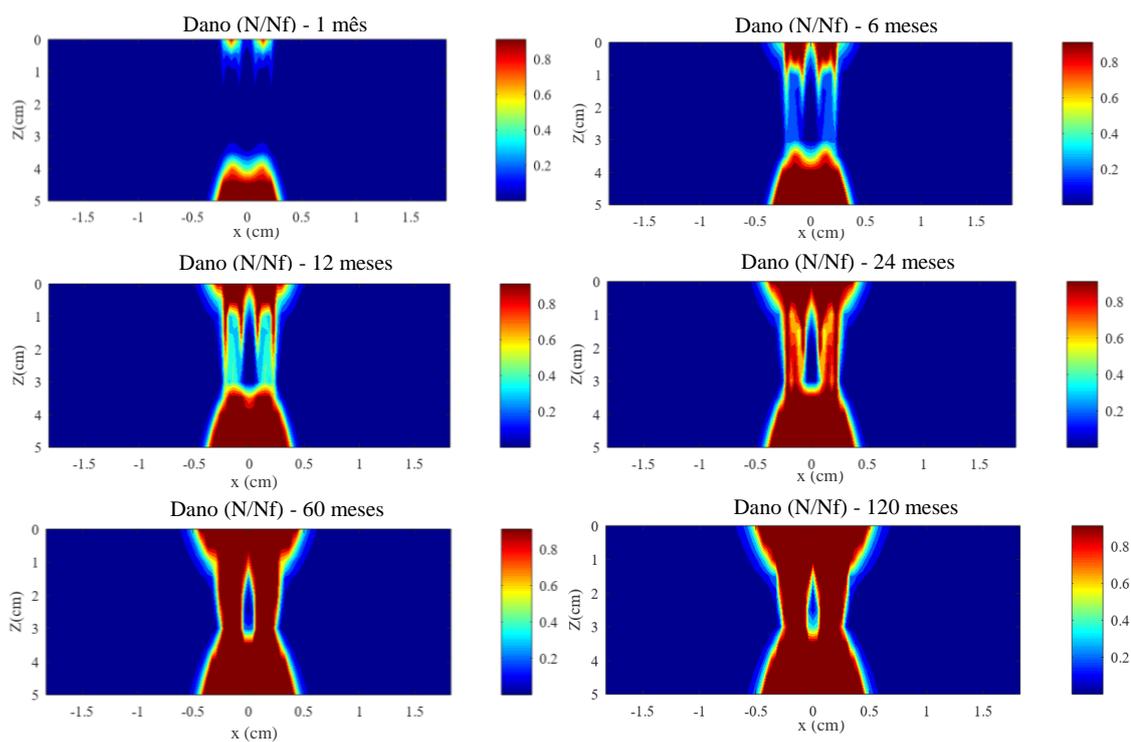
Temperatura (°C)	f (Hz)	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)
-10	0,1	19217	7,09
-10	0,5	21617	6,17
-10	1	22631	5,825
-10	5	24937	5,085
-10	10	25892,5	4,76
-10	25	27082,5	4,39
4	0,1	9710,5	14,29
4	0,5	12005	12,255
4	1	13121	11,495
4	5	15761,5	9,85
4	10	16996,5	9,23
4	25	18807	8,345
20	0,1	2729	25,77
20	0,5	4030	23,645
20	1	4696,5	22,925
20	5	6681,5	20,005
20	10	7735,5	18,885
20	25	9283,5	16,965
40	0,1	432,65	31,19
40	0,5	729,75	30,615
40	1	896,25	30,285
40	5	1533	30
40	10	1932	29,395
40	25	2612,5	28,86
54	0,1	143,1	33,125
54	0,5	233,7	32,81
54	1	293,85	31,795
54	5	562,7	31,02
54	10	761,75	28,835
54	25	1139,85	26,165

## APÊNDICE E – CONTORNOS DE DANO DAS SIMULAÇÕES DE PAVIMENTOS NO FLEXPAVE™

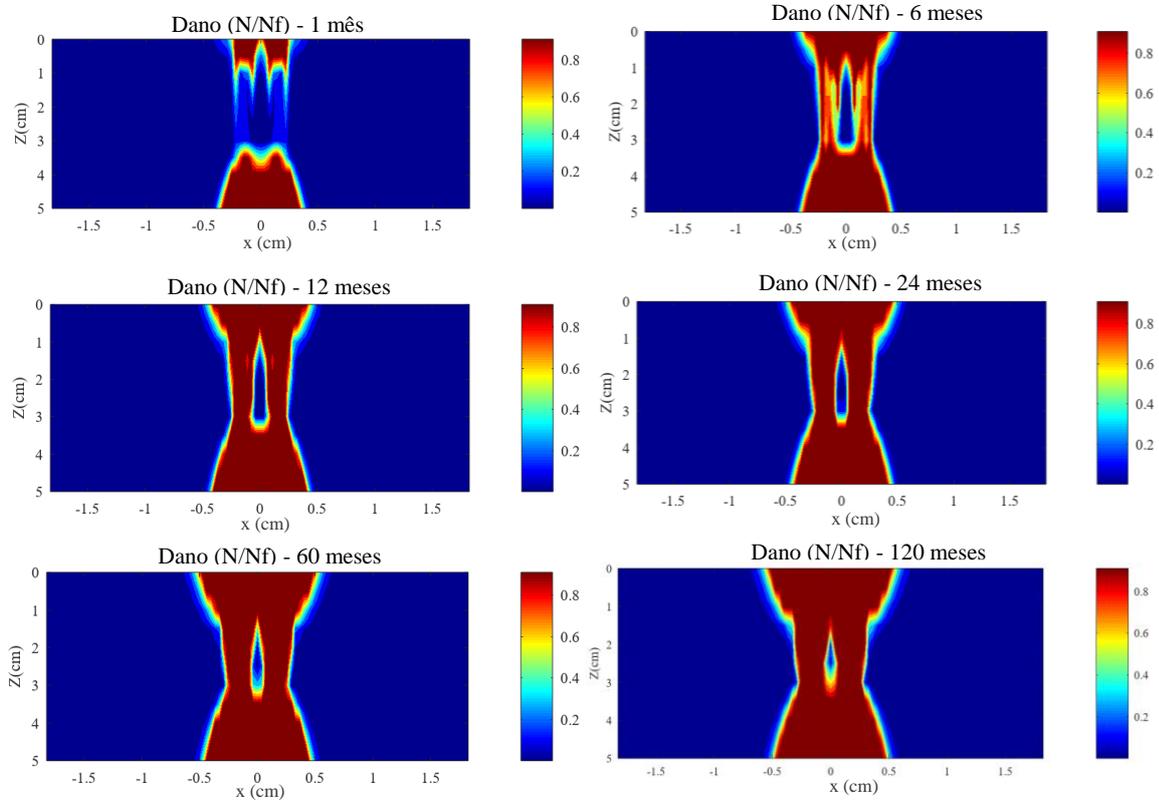
### DERSA - FX III - 30/45 A ( $E_1 = 5 \text{ cm}$ )



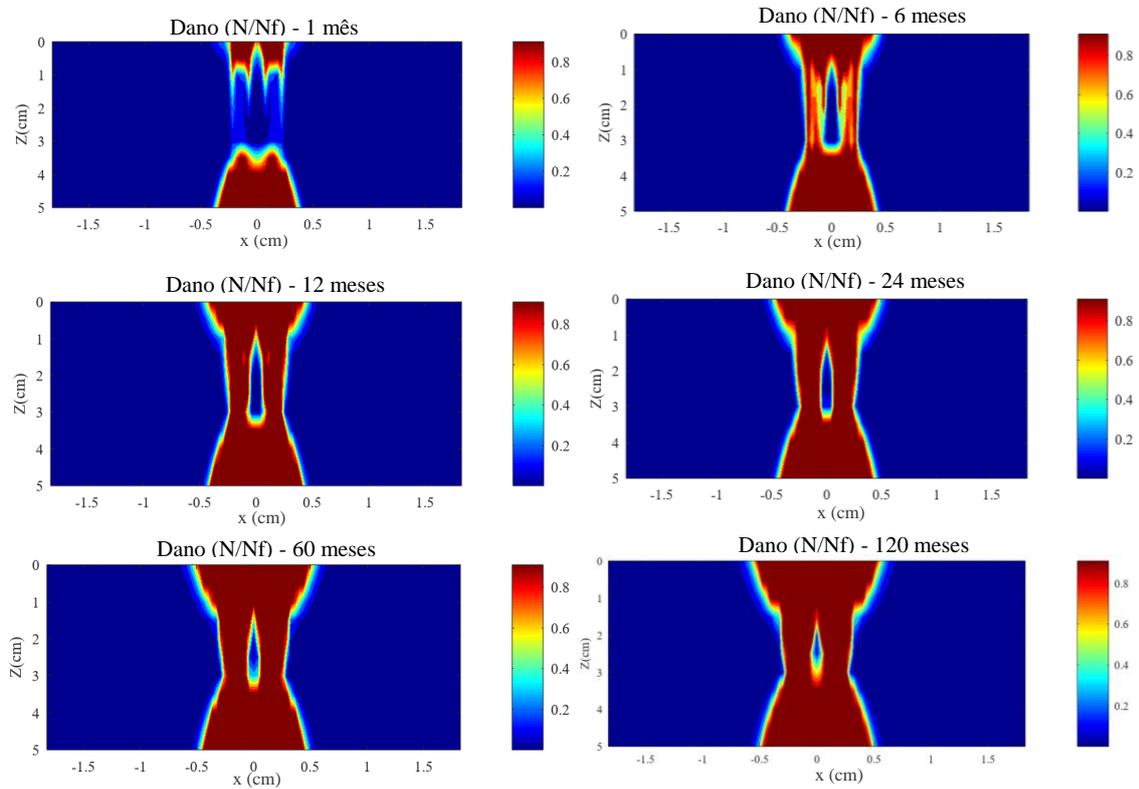
### DERSA - FX III - 30/45 B ( $E_1 = 5 \text{ cm}$ )



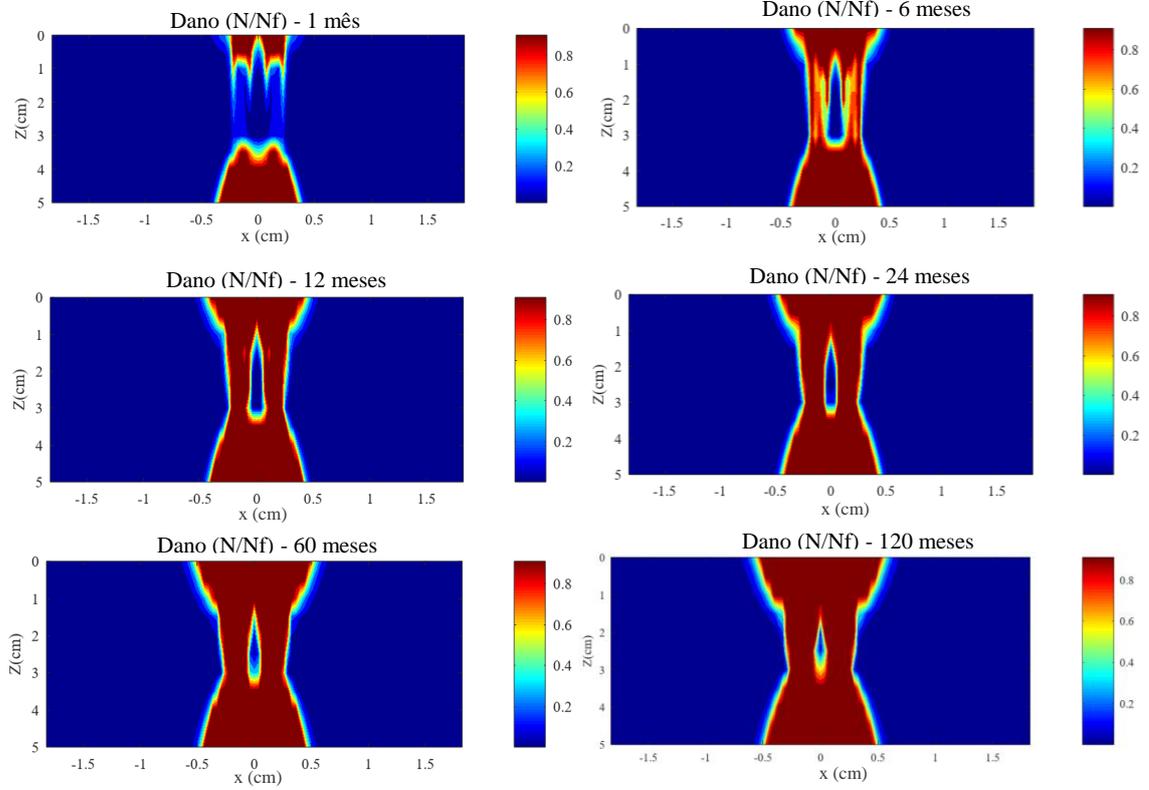
## DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (E1 = 5 cm)



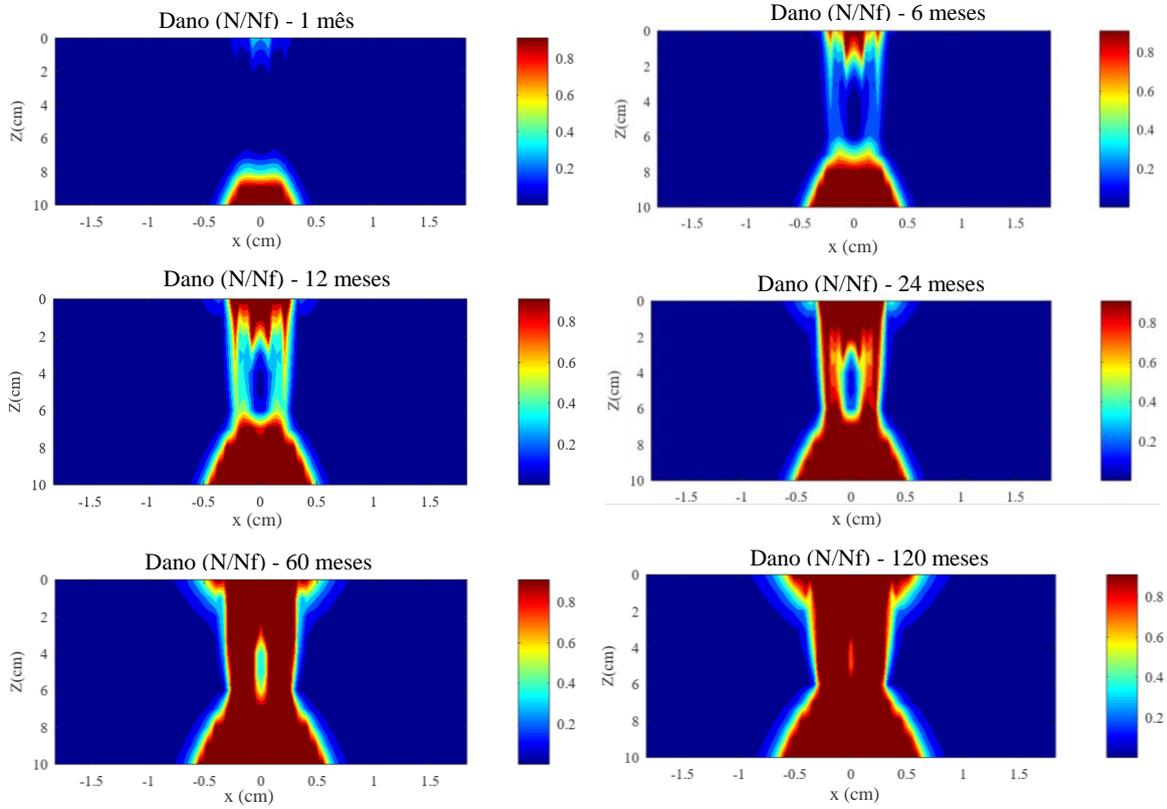
## DERSA - FX III - 60/85E A (E1 = 5 cm)



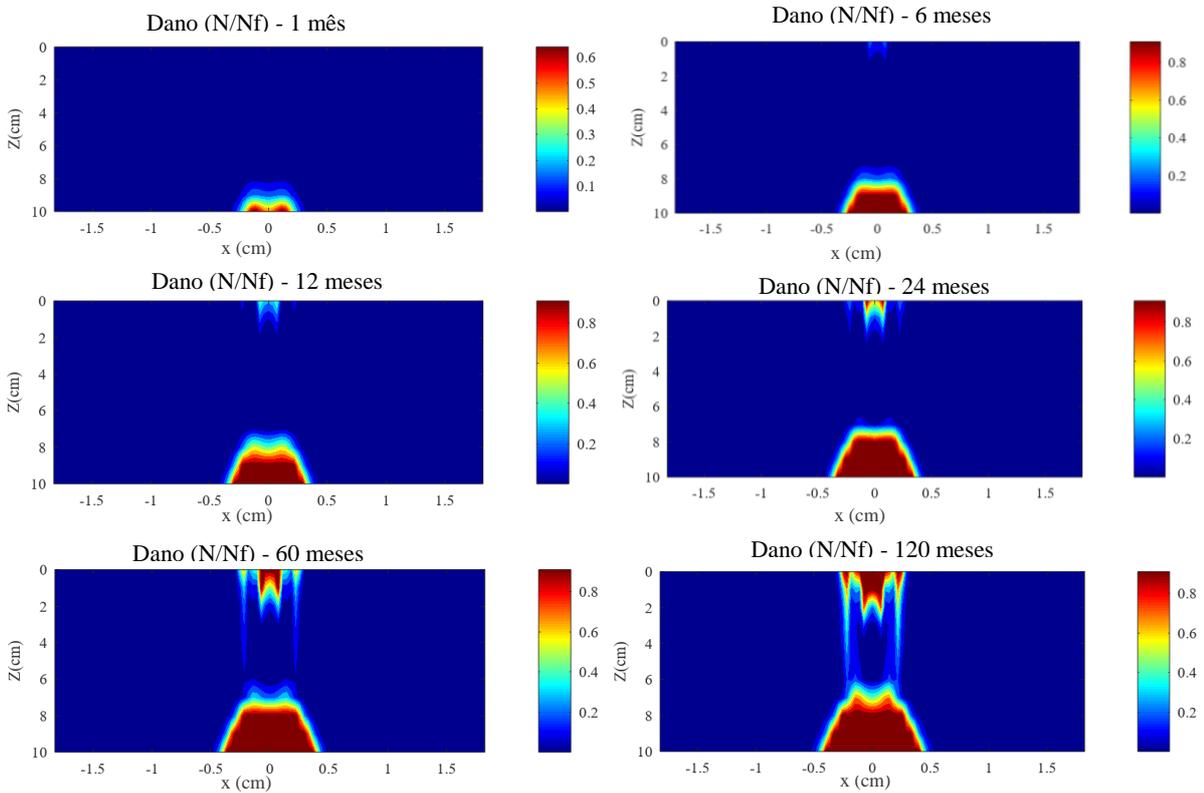
## DERSA - FX III - 60/85E B (E1 = 5 cm)



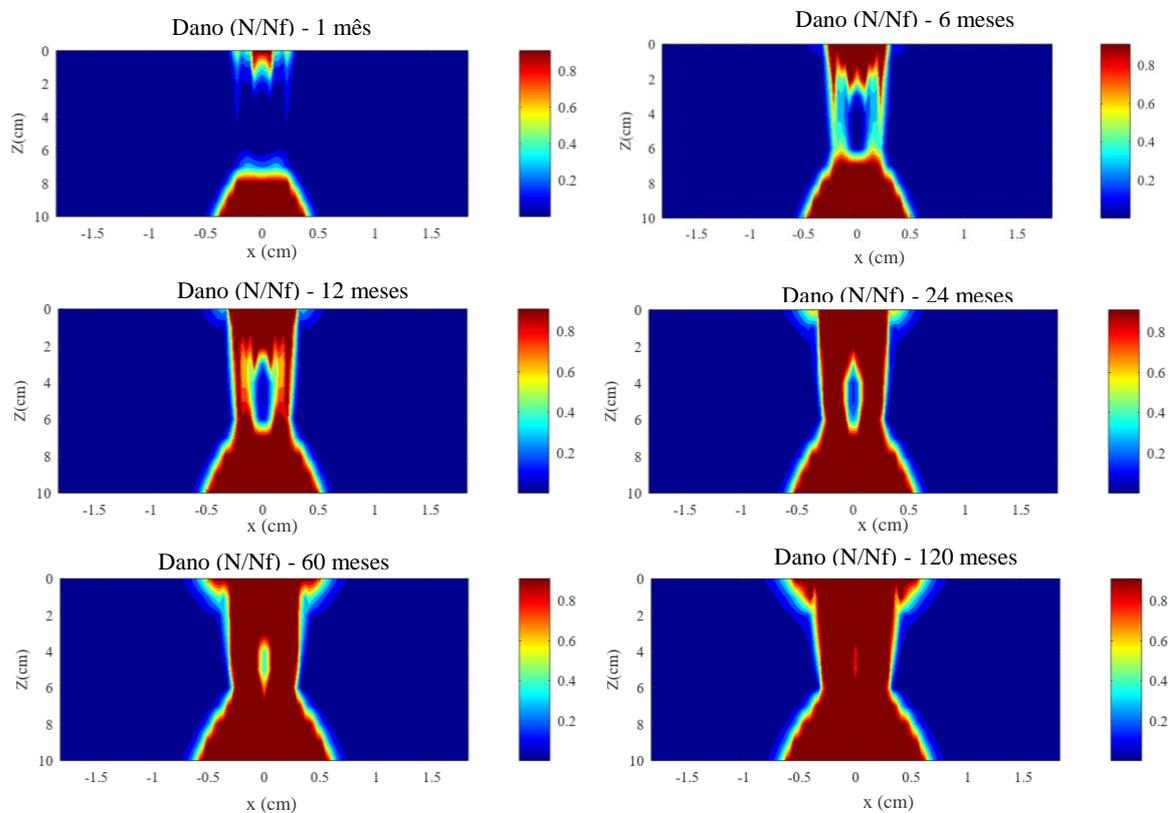
DERSA - FX III - 30/45 A (E2 = 10 cm)



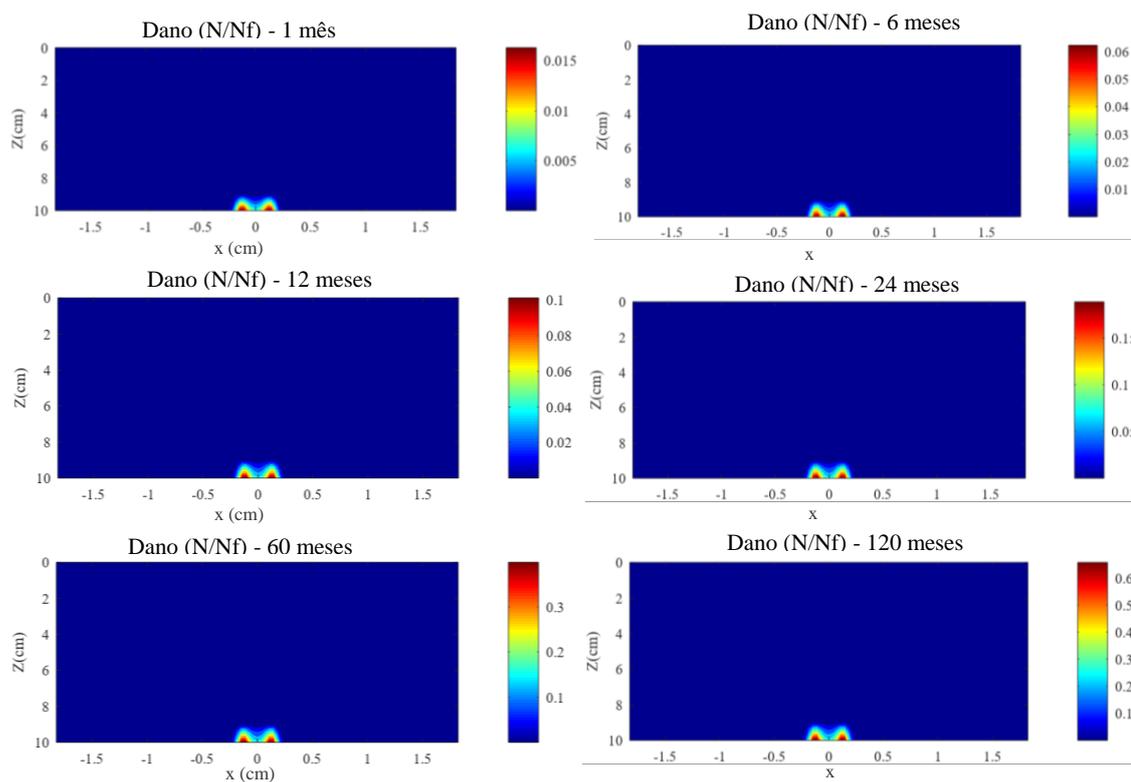
DERSA - FX III - 30/45 B (E2 = 10 cm)



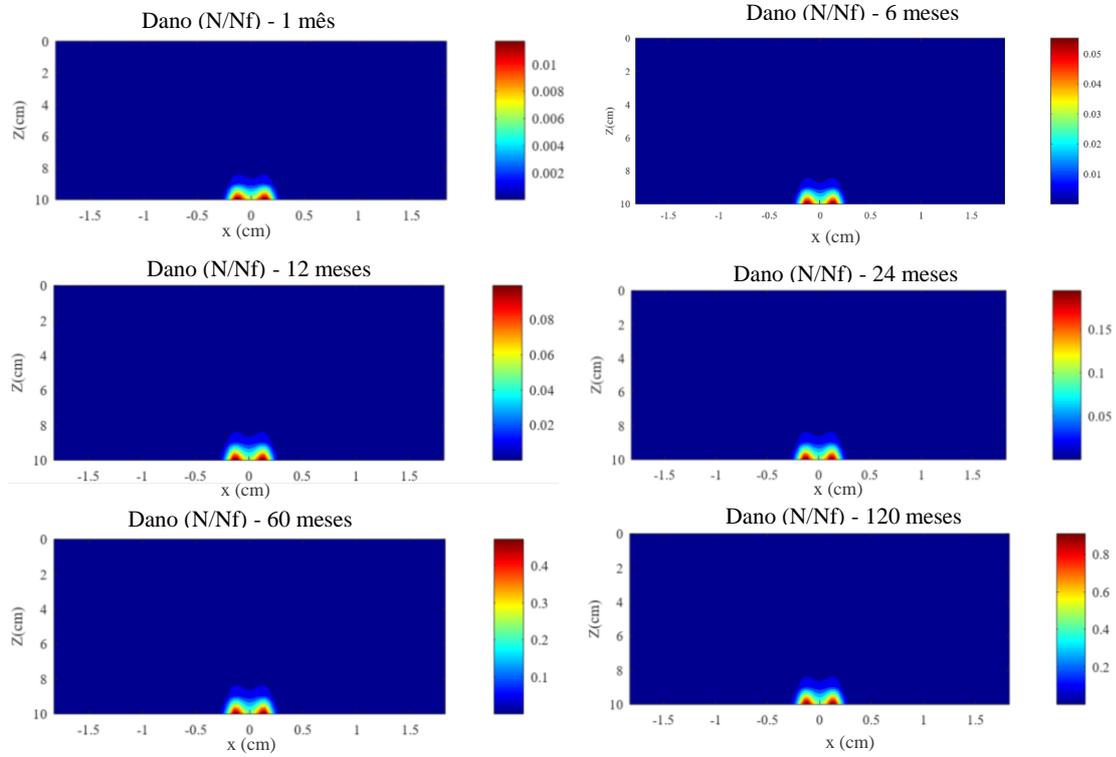
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 ( $E_2 = 10 \text{ cm}$ )



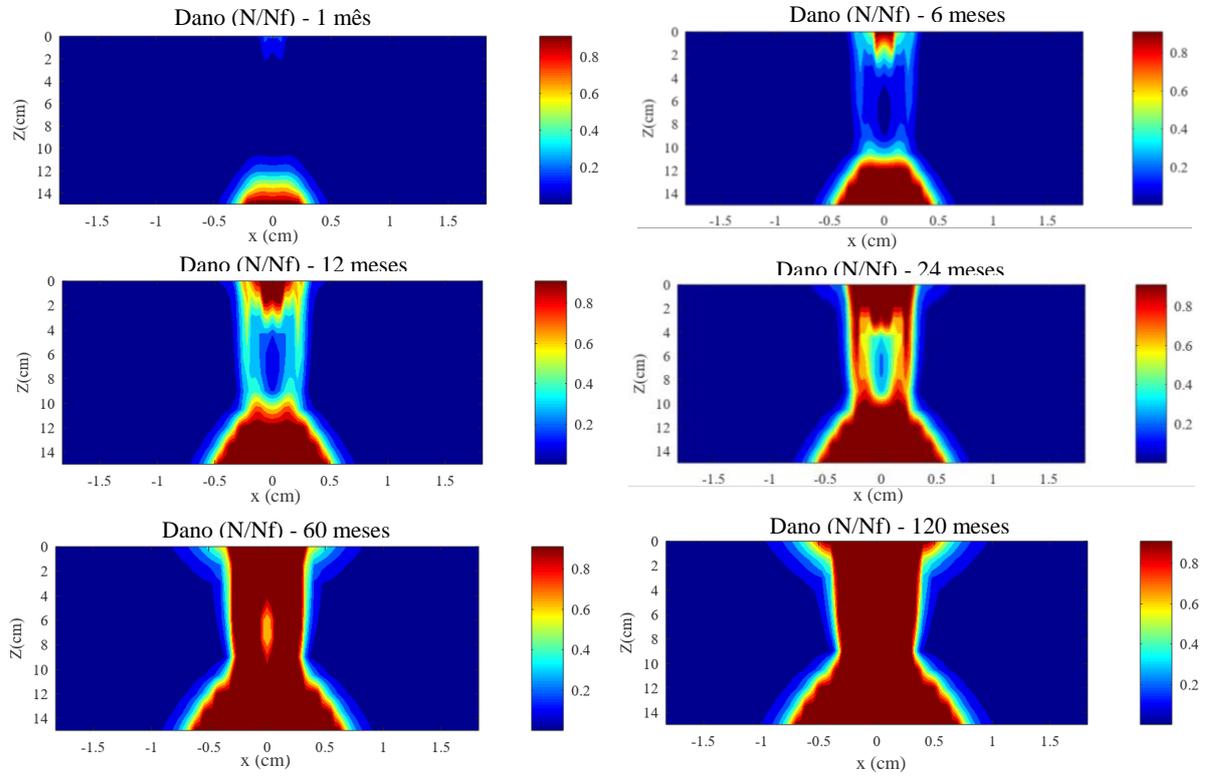
DERSA - FX III - 60/85E A ( $E_2 = 10 \text{ cm}$ )



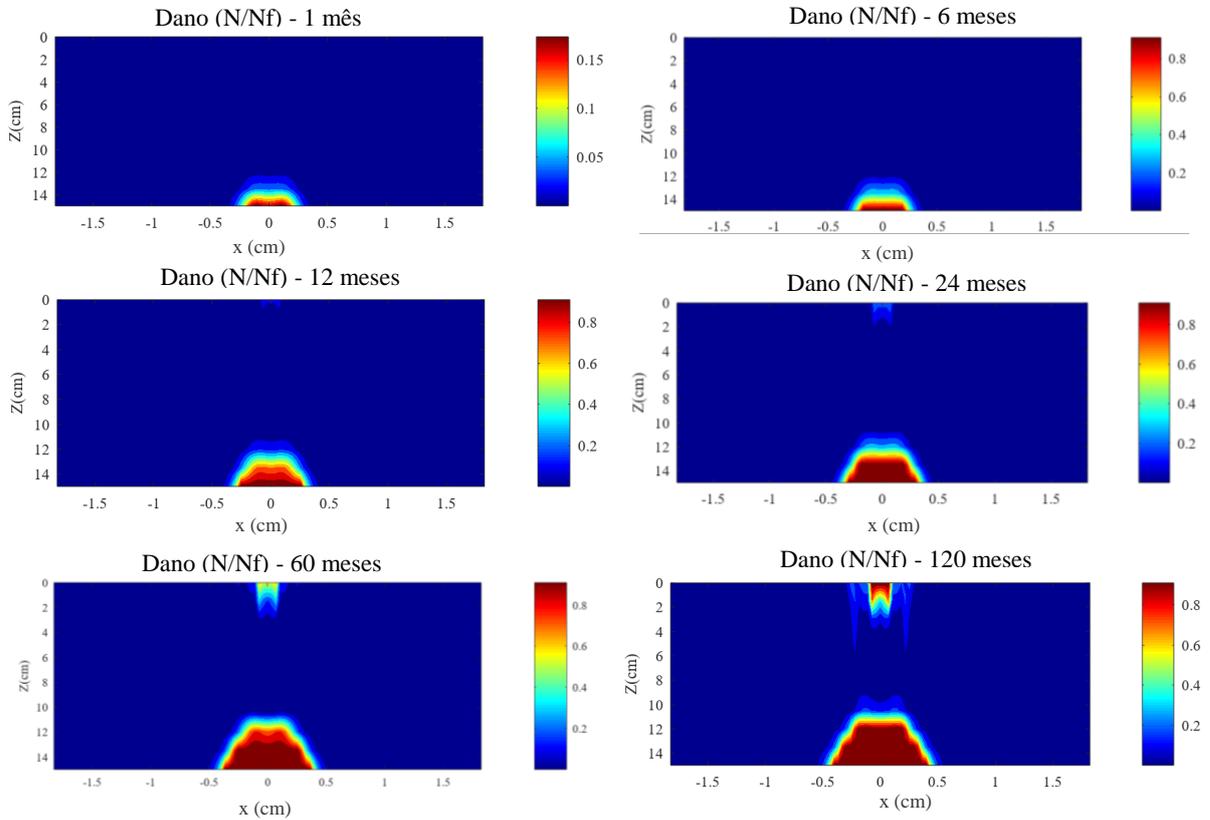
## DERSA - FX III - 60/85E B (E2 = 10 cm)



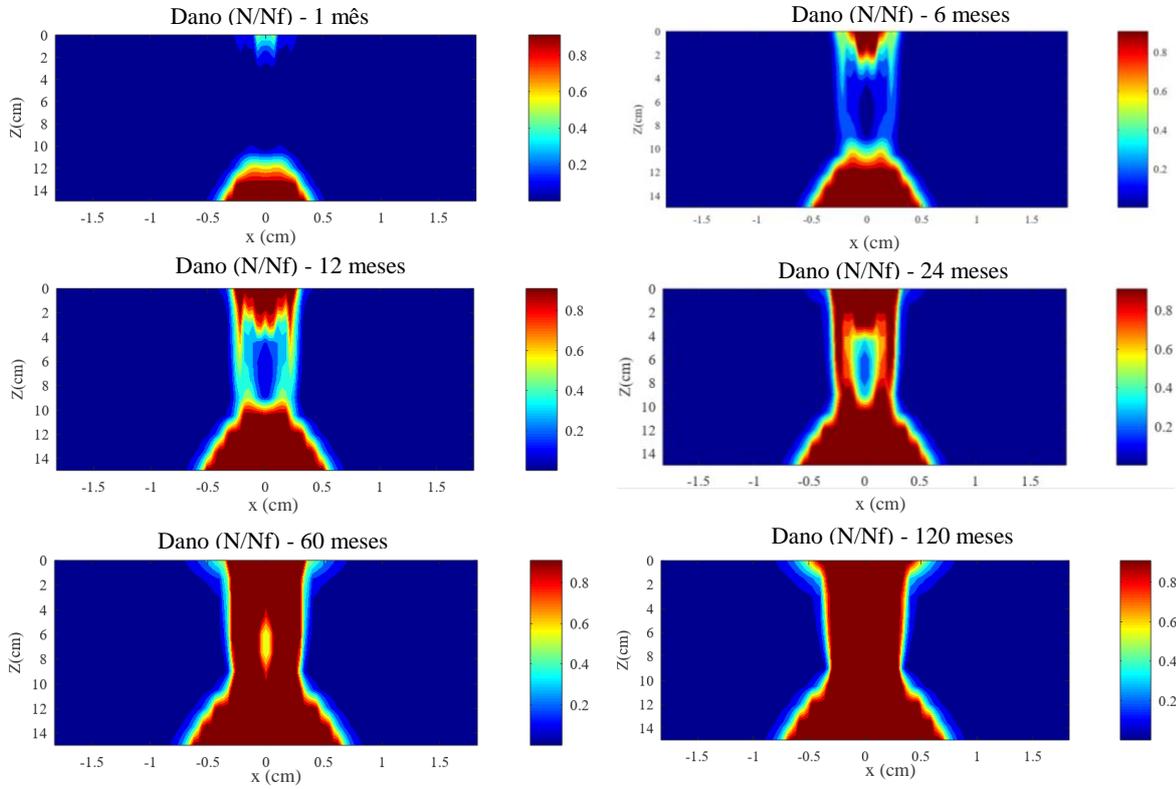
DERSA - FX III - 30/45 A (E3 = 15 cm)



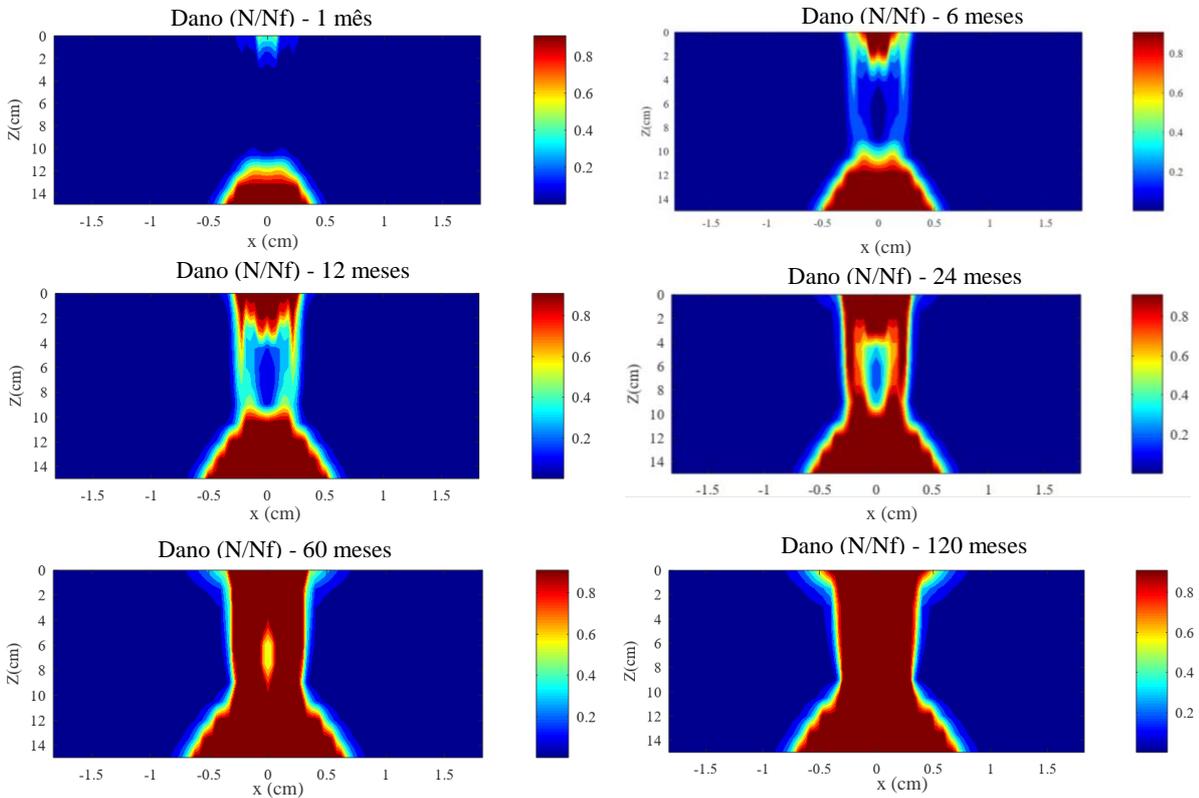
DERSA - FX III - 30/45 B (E3 = 15 cm)

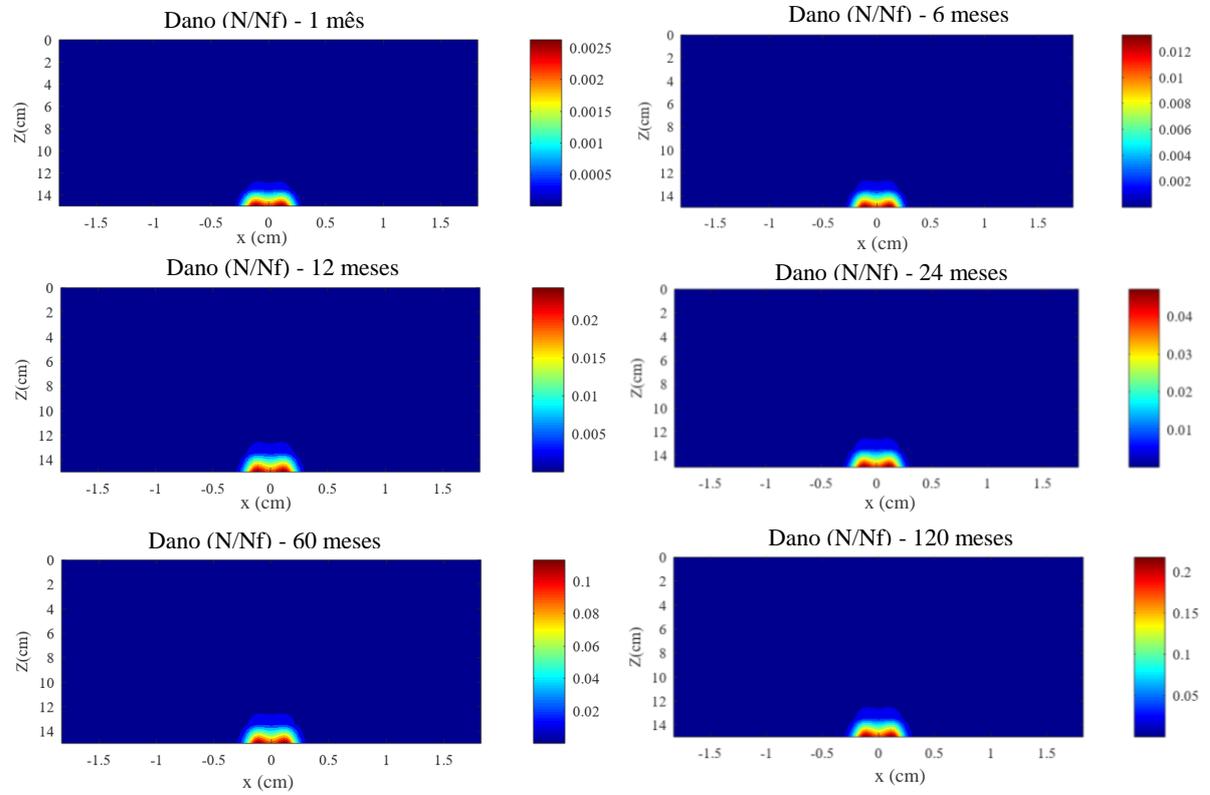


DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (E3 = 15 cm)



DERSA - FX III - 60/85E A (E3 = 15 cm)



DERSA - FX III - 60/85E B ( $E_3 = 15 \text{ cm}$ )

**APÊNDICE F – EVOLUÇÃO DO DANO MÉDIO ACUMULADO CALCULADO PELO FLEXPAVE™, E DA ÁREA TRINCADA PELAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE NASCIMENTO (2015) E NASCIMENTO (2021), E PELA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MEDINA**

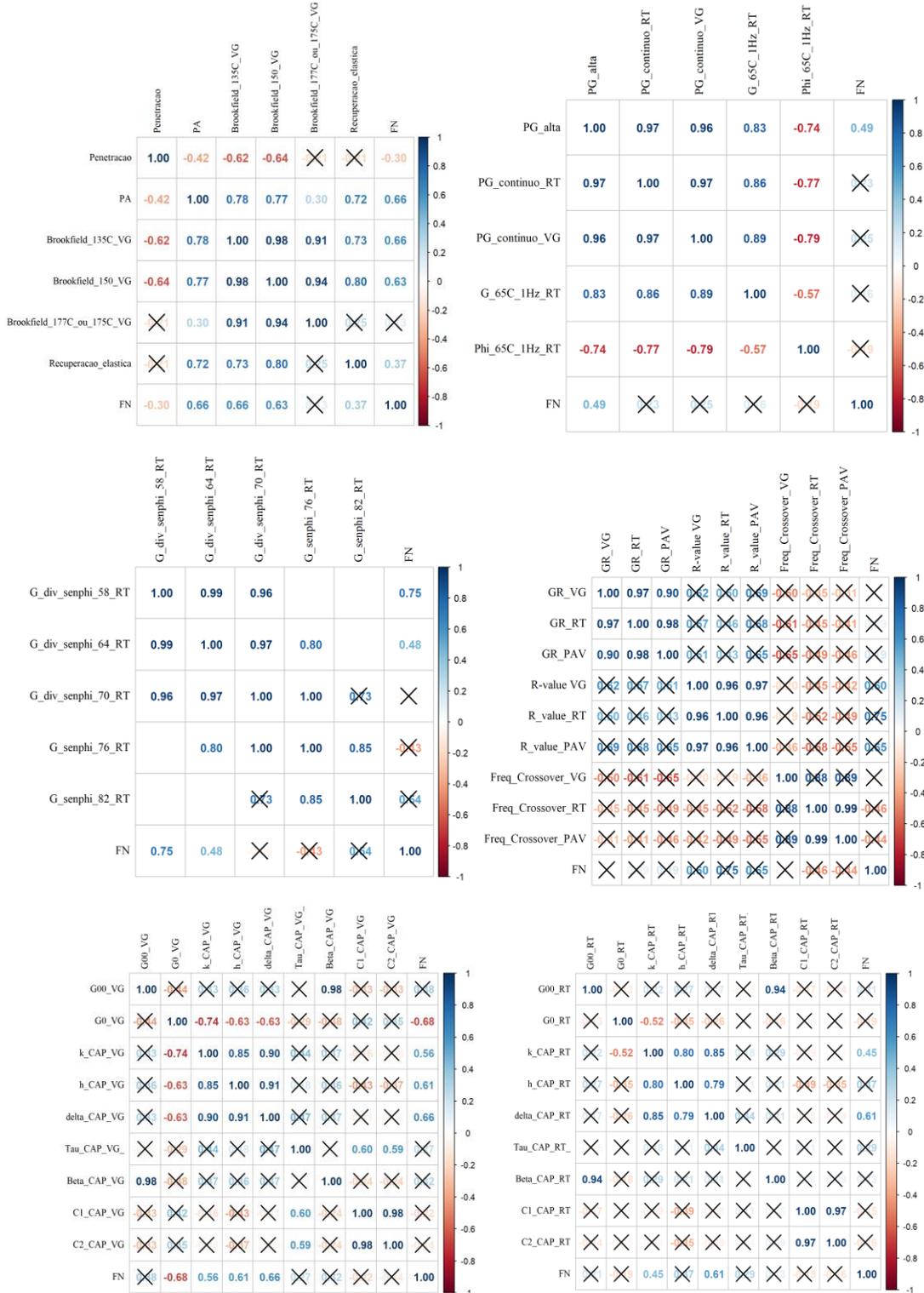
<b>Evolução da área trincada prevista pela função de transferência de Fritzen (2016) - MeDiNa</b>						
<b>Meses</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>60</b>	<b>120</b>
<b>MISTURA</b>						
DERSA - FX III - 30/45 A (5cm)	0,870	1,640	2,170	2,980	5,140	9,650
DERSA - FX III - 30/45 B (5cm)	1,510	3,220	4,790	8,230	25,670	76,430
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (5cm)	0,880	1,680	2,220	3,060	5,320	10,160
DERSA - FX III - 60/85E A (5cm)	1,140	2,260	3,120	4,620	9,920	25,780
DERSA - FX III - 60/85E B (5cm)	0,810	1,520	2,000	2,710	4,500	7,960
DERSA - FX III - 30/45 A (10cm)	1,250	2,540	3,580	5,520	13,280	38,380
DERSA - FX III - 30/45 B (10cm)	1,930	4,610	7,740	16,520	65,170	99,000
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (10cm)	1,270	2,590	3,650	5,670	13,920	40,710
DERSA - FX III - 60/85E A (10cm)	1,620	3,560	5,460	9,920	34,260	92,720
DERSA - FX III - 60/85E B (10cm)	1,330	2,740	3,920	6,230	16,270	49,110
DERSA - FX III - 30/45 A (15cm)	1,090	2,140	2,920	4,250	8,710	21,330
DERSA - FX III - 30/45 B (15cm)	2,120	5,410	9,700	22,860	85,950	99,000
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (15cm)	1,140	2,250	3,100	4,580	9,810	25,350
DERSA - FX III - 60/85E A (15cm)	1,880	4,450	7,380	15,380	60,460	99,000
DERSA - FX III - 60/85E B (15cm)	1,510	3,220	4,790	8,240	25,710	76,520

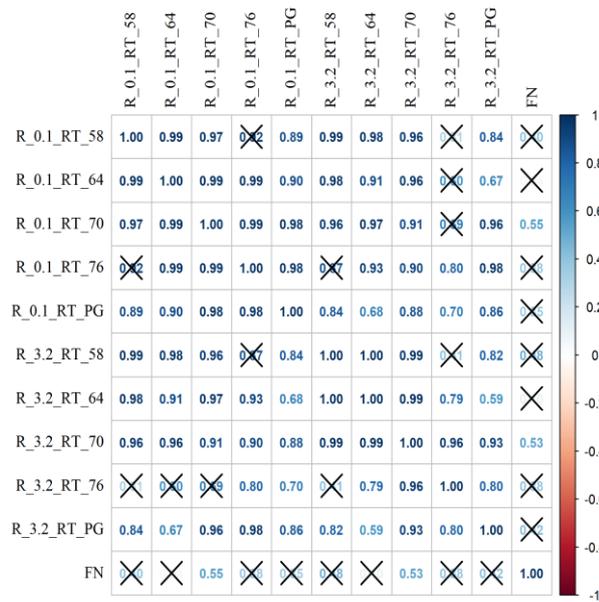
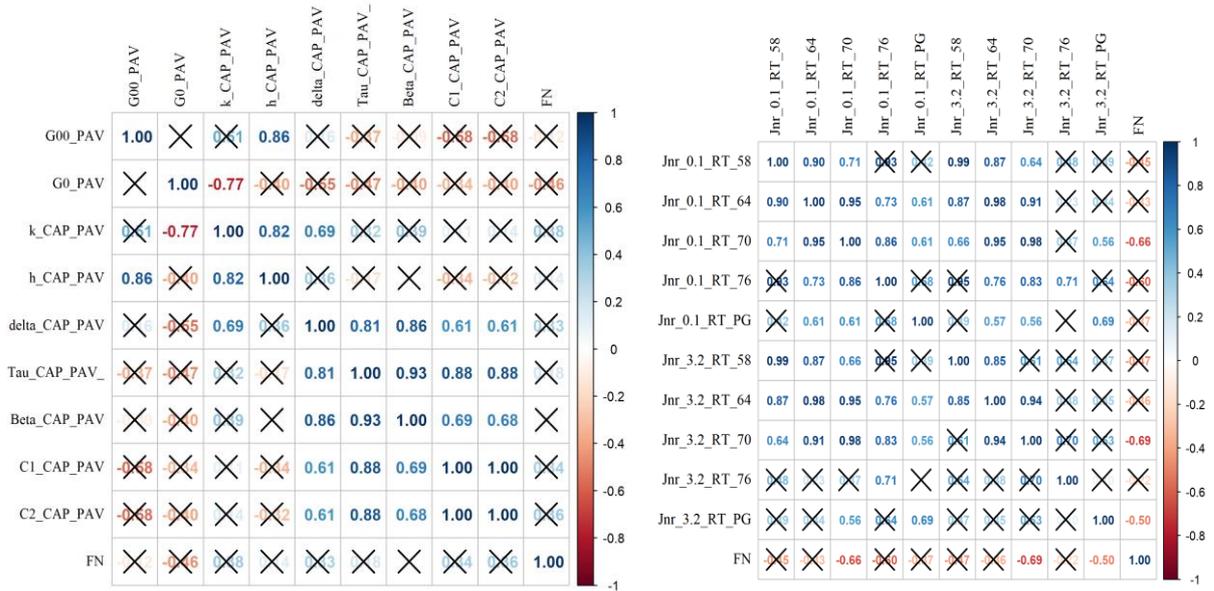
<b>Evolução do dano pelo FlexPAVE™</b>						
<b>Meses</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>60</b>	<b>120</b>
<b>MISTURA</b>						
DERSA - FX III - 30/45 A (5cm)	0,26039	0,49975	0,61646	0,75082	0,85996	0,9055677
DERSA - FX III - 30/45 B (5cm)	0,11789	0,25299	0,31348	0,37619	0,50007	0,6014537
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (5cm)	0,48444	0,73424	0,81263	0,85517	0,90118	0,9319145
DERSA - FX III - 60/85E A (5cm)	0,07914	0,10374	0,10984	0,12046	0,14133	0,1610843
DERSA - FX III - 60/85E B (5cm)	0,00367	0,01552	0,02623	0,0475	0,07851	0,1144094
DERSA - FX III - 30/45 A (10cm)	0,22814	0,48839	0,63095	0,78868	0,92058	0,9729865
DERSA - FX III - 30/45 B (10cm)	0,25275	0,42876	0,52112	0,62971	0,76918	0,8251349
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (10cm)	0,37312	0,64383	0,76563	0,86401	0,93738	0,9771949
DERSA - FX III - 60/85E A (10cm)	0,00076	0,003	0,00505	0,00959	0,02098	0,0361257
DERSA - FX III - 60/85E B (10cm)	0,00081	0,00383	0,0071	0,01408	0,03422	0,0646409
DERSA - FX III - 30/45 A (15cm)	0,0149	0,09656	0,14321	0,19467	0,27029	0,3441387
DERSA - FX III - 30/45 B (15cm)	0,17296	0,43926	0,58133	0,77224	0,95129	0,9939686
DERSA - FX III - 50/70 PA 85 (15cm)	0,26217	0,49998	0,64104	0,79626	0,93839	0,985938
DERSA - FX III - 60/85E A (15cm)	6,4E-06	3,3E-05	4,9E-05	7,6E-05	0,00016	0,00031
DERSA - FX III - 60/85E B (15cm)	0,26217	0,49998	0,64104	0,79626	0,93839	0,985938



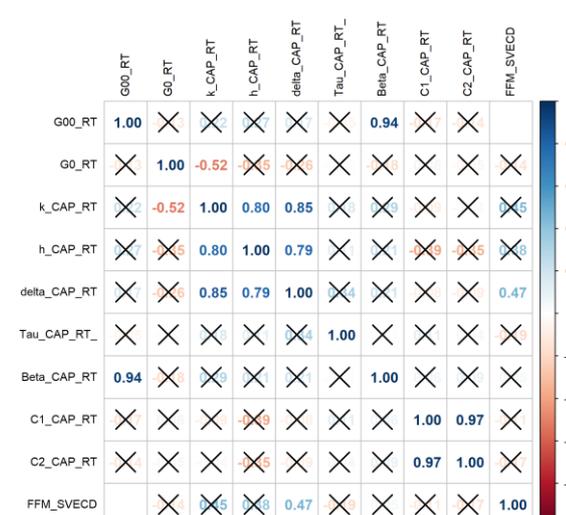
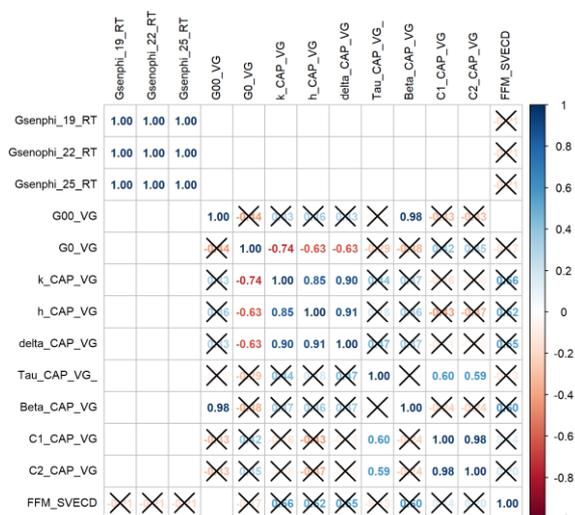
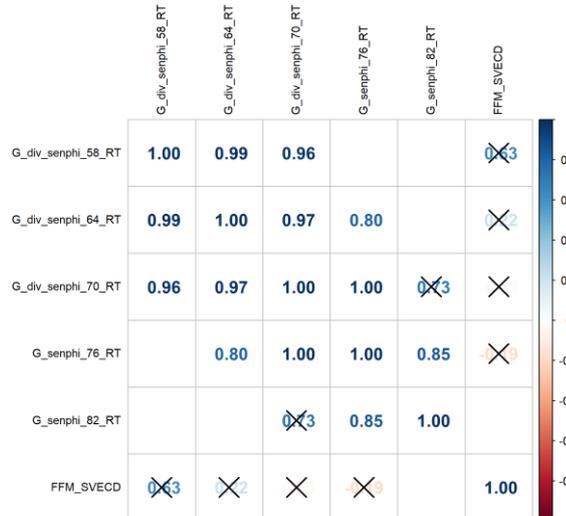
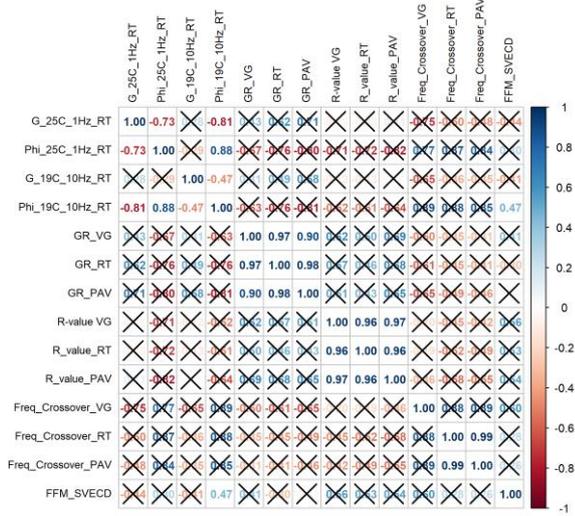
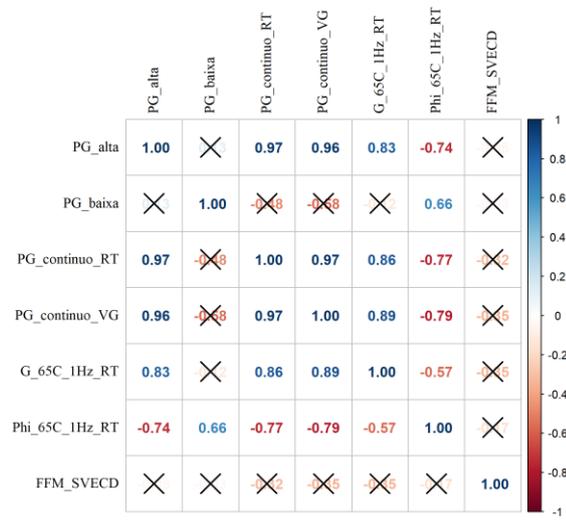
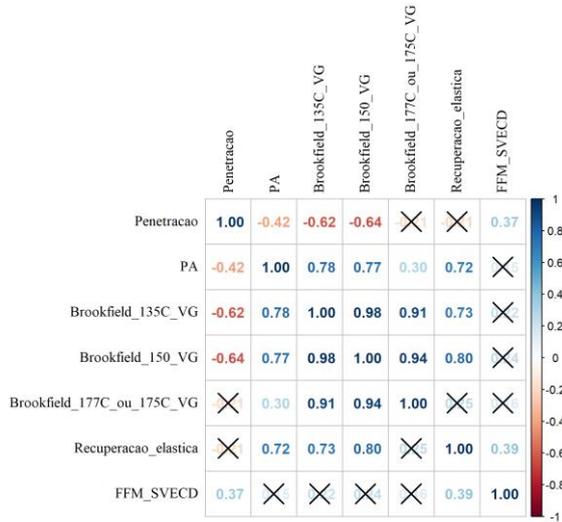
## APÊNDICE G – MATRIZES DE CORRELAÇÃO

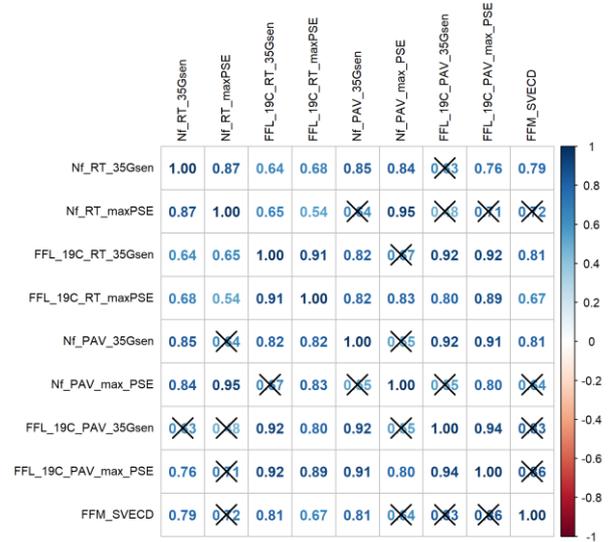
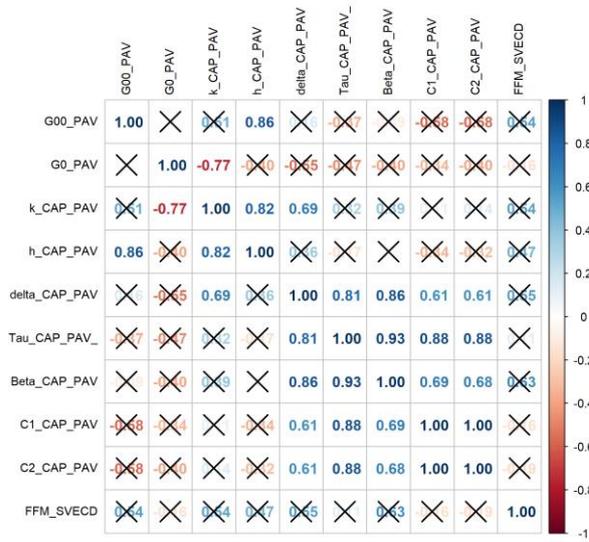
Matrizes de correlação FN vs. parâmetros de ligantes



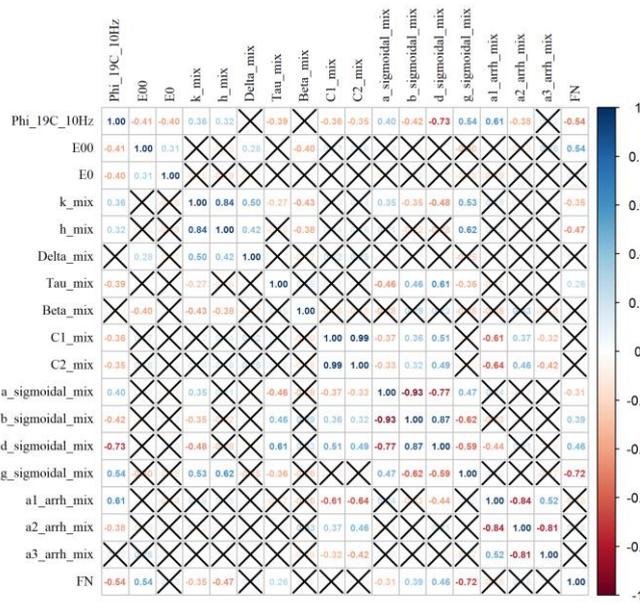
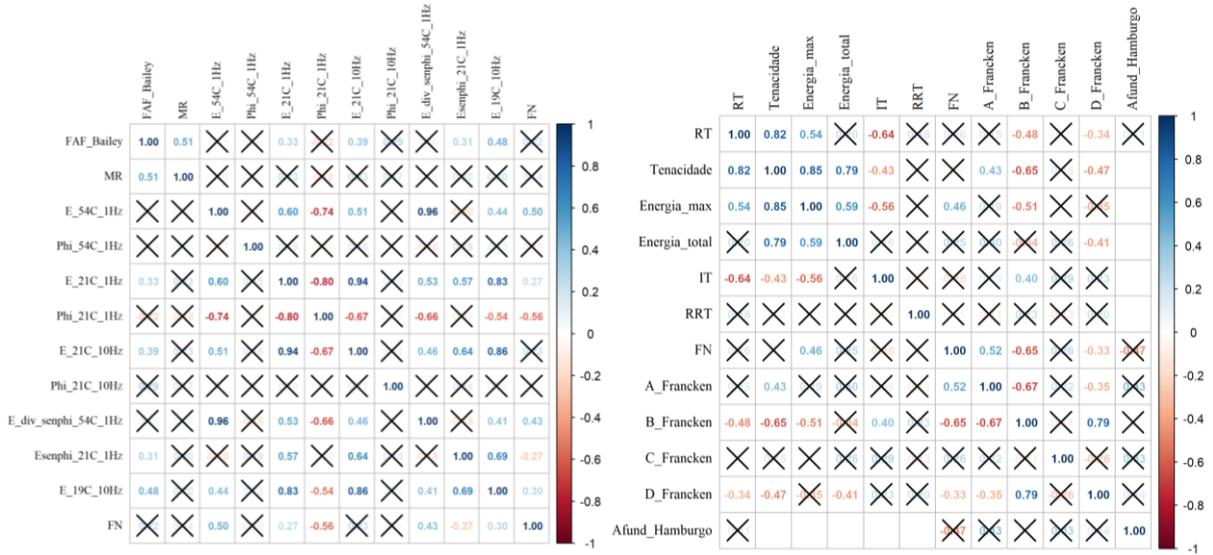


Matrizes de correlação FFM (S-VECD) vs. parâmetros de ligantes

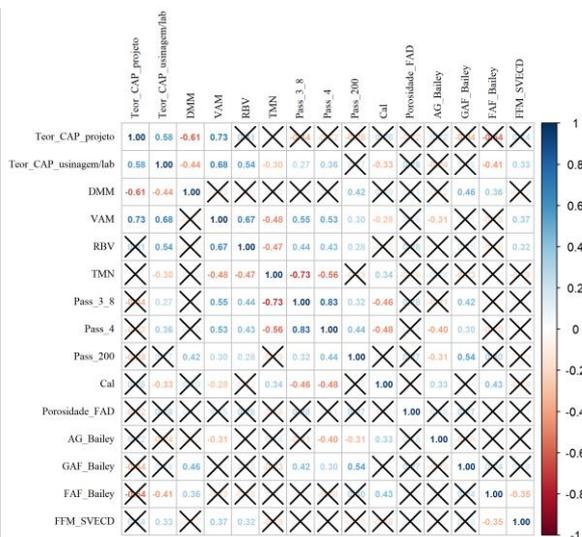
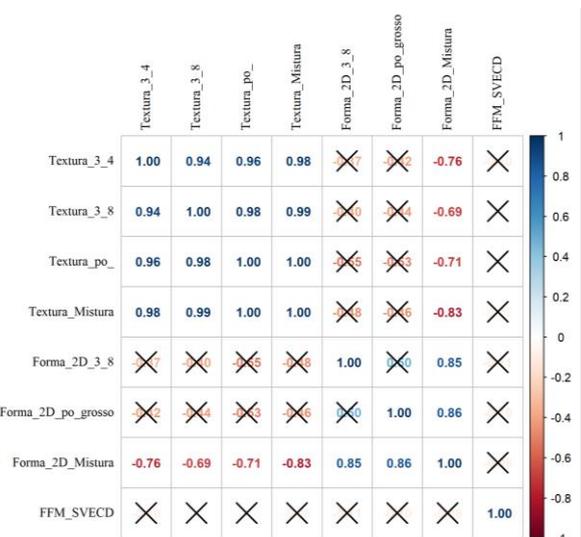
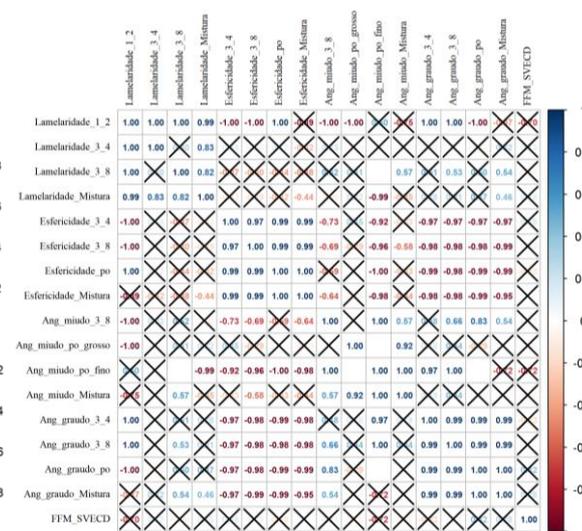
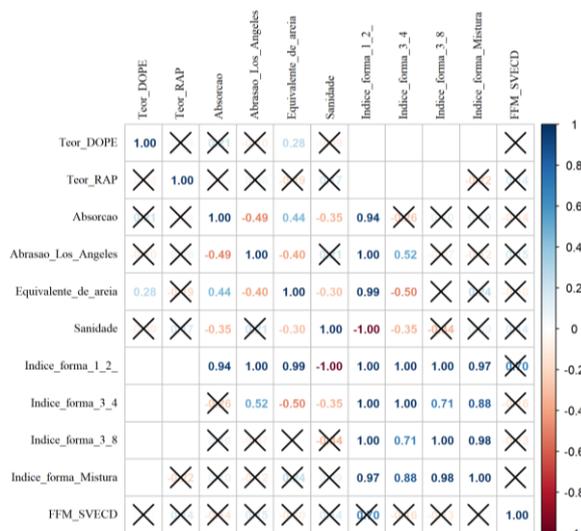


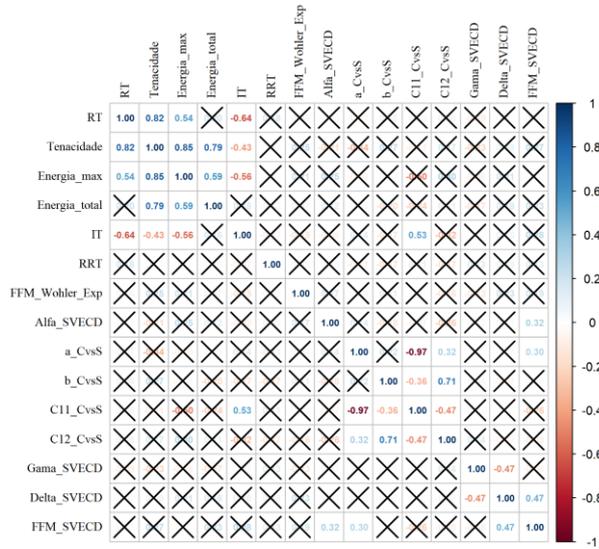
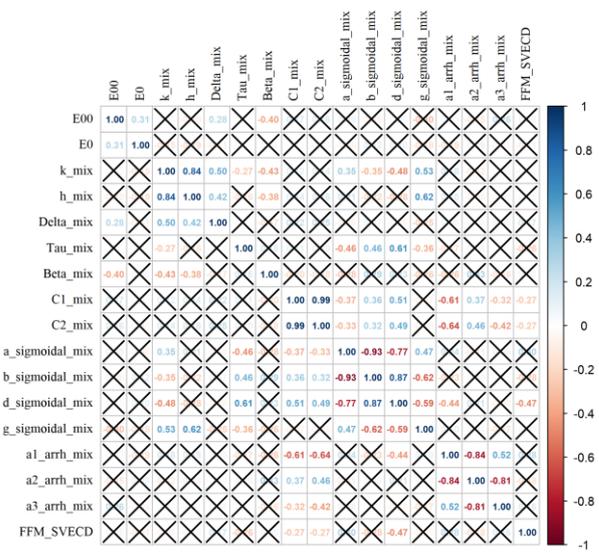
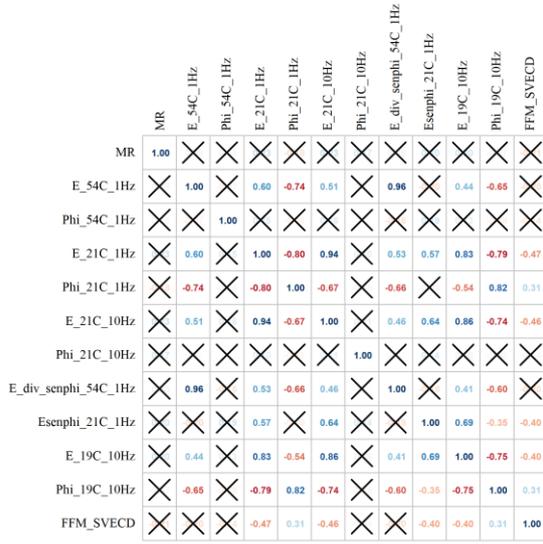




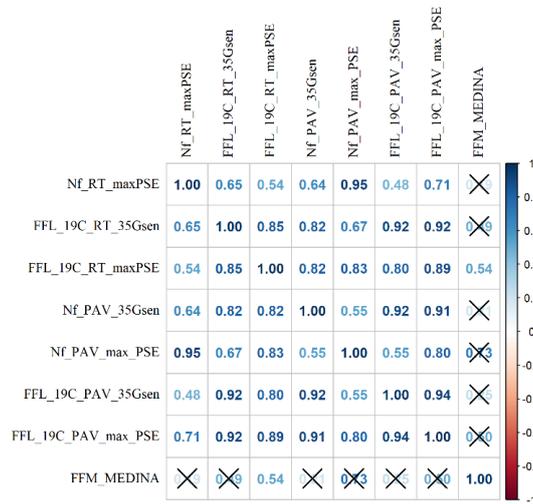
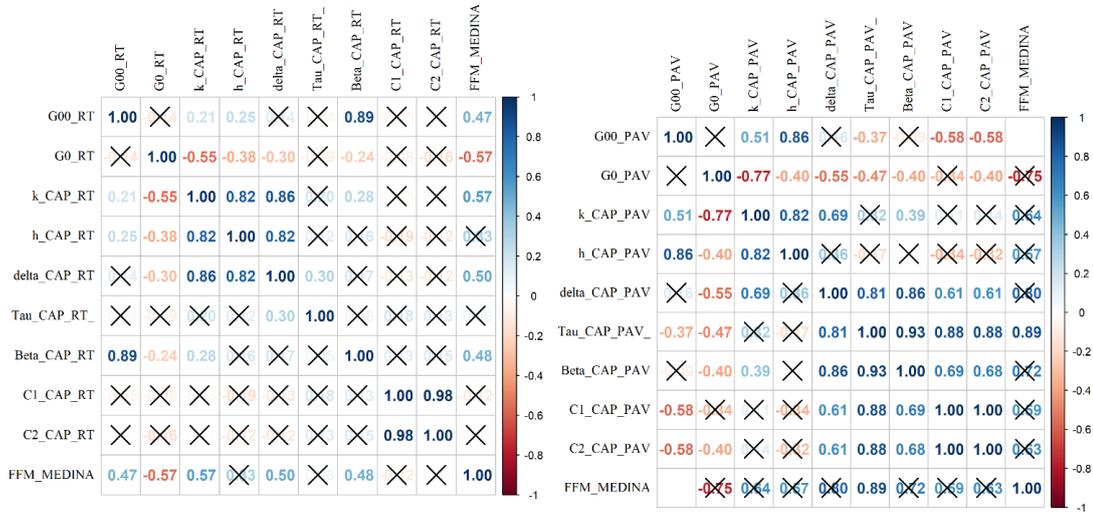


Matrizes de correlação FFM (S-VECD) vs. parâmetros de agregados e misturas



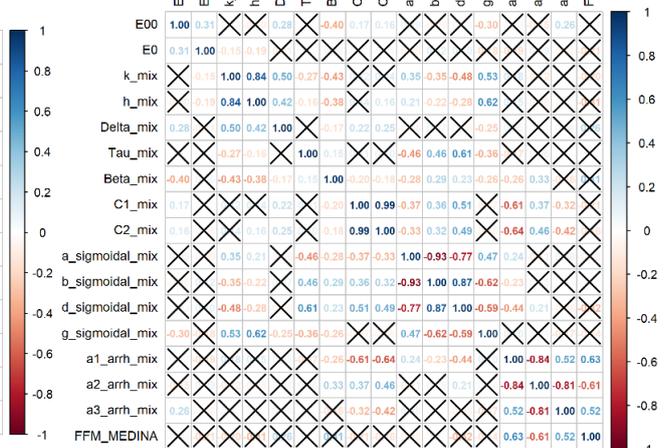








	MIR	E_54C_1Hz	Phi_54C_1Hz	E_21C_1Hz	Phi_21C_1Hz	E_21C_10Hz	Phi_21C_10Hz	E_div_senphi_54C_1Hz	Esenphi_21C_1Hz	E_19C_10Hz	Phi_19C_10Hz	FFM_MEDINA
MIR	1.00	X	X	0.23	-0.18	0.23	0.17	X	0.20	0.20	X	-0.37
E_54C_1Hz	X	1.00	X	0.60	-0.74	0.51	X	0.96	-0.20	0.44	-0.65	X
Phi_54C_1Hz	X	X	1.00	0.15	X	0.16	X	-0.16	0.19	X	X	-0.36
E_21C_1Hz	0.23	0.60	0.15	1.00	-0.80	0.94	X	0.53	0.57	0.83	-0.79	-0.58
Phi_21C_1Hz	-0.18	-0.74	X	-0.80	1.00	-0.67	X	-0.66	X	-0.54	0.82	X
E_21C_10Hz	0.23	0.51	0.16	0.94	-0.67	1.00	X	0.46	0.64	0.86	-0.74	-0.68
Phi_21C_10Hz	0.17	X	X	X	X	X	1.00	X	0.14	X	X	X
E_div_senphi_54C_1Hz	X	0.96	0.16	0.53	-0.66	0.46	X	1.00	-0.19	0.41	-0.60	X
Esenphi_21C_1Hz	0.20	-0.20	0.19	0.57	X	0.64	0.14	-0.16	1.00	0.69	-0.35	-0.64
E_19C_10Hz	0.20	0.44	X	0.83	-0.54	0.86	X	0.41	0.69	1.00	-0.75	-0.56
Phi_19C_10Hz	X	-0.65	X	-0.79	0.82	-0.74	X	-0.60	-0.35	-0.75	1.00	X
FFM_MEDINA	-0.37	X	X	-0.58	X	-0.68	X	X	-0.64	-0.56	X	1.00



	RT	Tenacidade	Energia_max	Energia_total	IT	RRT	FFM_Wohler_Exp	Alfa_SVECD	a_CvsS	b_CvsS	C11_CvsS	C12_CvsS	Gama_SVECI	Delta_SVECD	FFM_SVECD
RT	1.00	0.82	0.54	X	-0.64	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tenacidade	0.82	1.00	0.85	0.79	0.43	X	0.25	-0.34	0.27	X	X	X	0.23	0.27	X
Energia_max	0.54	0.85	1.00	0.59	-0.56	X	0.25	-0.34	0.27	X	X	X	0.23	0.27	X
Energia_total	X	0.79	0.59	1.00	X	X	0.25	-0.34	0.27	X	X	X	0.23	0.27	X
IT	-0.64	-0.43	-0.56	X	1.00	X	0.25	-0.34	0.27	X	X	X	0.23	0.27	X
RRT	X	X	X	X	X	1.00	X	X	X	X	X	X	X	X	X
FFM_Wohler_Exp	X	0.25	X	X	X	X	1.00	X	X	X	X	X	X	X	X
Alfa_SVECD	X	X	0.25	X	X	X	X	1.00	-0.16	0.28	X	X	X	0.32	X
a_CvsS	X	-0.34	X	X	X	X	X	-0.16	1.00	-0.97	0.32	X	X	0.30	X
b_CvsS	X	0.27	X	X	X	X	X	0.22	1.00	0.36	0.71	X	X	X	X
C11_CvsS	X	-0.50	X	0.53	X	X	X	-0.97	-0.36	1.00	-0.47	X	X	-0.26	X
C12_CvsS	X	X	X	0.32	X	X	X	0.28	0.32	0.71	0.47	1.00	X	X	X
Gama_SVECI	X	-0.23	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1.00	-0.47	X
Delta_SVECD	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.47	1.00	0.47
FFM_SVECD	X	0.27	X	X	X	X	X	0.32	0.30	-0.26	X	X	0.47	0.47	1.00

