



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA

**EFEITO DOS PERÍODOS DE REPOUSO NO ENSAIO DE FADIGA EM MISTURAS
ASFÁLTICAS E EM LIGANTES**

FORTALEZA

2019

LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA

EFEITO DOS PERÍODOS DE REPOUSO NO ENSAIO DE FADIGA EM MISTURAS
ASFÁLTICAS E EM LIGANTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48e Oliveira, Leticia Sousa de.
Efeito dos períodos de repouso no ensaio de fadiga em misturas asfálticas e em ligantes / Leticia Sousa de Oliveira. – 2019.
154 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
Coorientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.
1. Pavimentação. 2. Perda de rigidez. 3. Fadiga. 4. Períodos de Repouso. 5. Healing. I. Título.
CDD 388
-

LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA

EFEITO DOS PERÍODOS DE REPOUSO NO ENSAIO DE FADIGA EM MISTURAS
ASFÁLTICAS E EM LIGANTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes a Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 26/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Co-Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luís Alberto Hermann do Nascimento
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES)

Prof. Dr. Cédric Sauzéat
Universidade de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (Univ. de Lyon/ENTPE)

A Deus todo poderoso e a minha família pelo incentivo, força e compreensão pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ter concedido, através de sua bondade infinita, o potencial de concretizar mais uma conquista. Foram grandes os momentos de dificuldades, porém consegui superá-los até o momento.

Ao meu professor e orientador deste trabalho, Jorge, e ao meu co-orientador, Lucas Babadopulos, que com sabedoria, motivação e apoio me auxiliaram e apresentaram a um mundo da pavimentação até então desconhecido por mim. Com suas paciências me ajudaram e orientaram ao longo desse início de caminhada, não tenho palavras para agradecer pelos ensinamentos e pelo tempo despendido a mim.

A minha amada e querida mãe, Maria Nilde, e ao meu namorado, Osmar Coelho, que sentiram de perto minhas preocupações e dificuldades, que com apoio em todos os momentos, me deram o combustível maior para nunca desistir, o amor incondicional. Foram as duas pessoas que sentiram de perto o sofrimento que é querer estar perto e não poder, que sentiram como a saudade pode doer, mas, que em certos momentos essa saudade se torna necessária e um combustível para se alcançar os objetivos propostos. Sem palavras para expressar tudo que vocês significam na minha vida, dedico a vocês a minha conquista.

Aos demais professores e funcionários do PETRAN, pela amizade, apoio e orientação ao longo dessa etapa do mestrado. À FUNCAP pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos do mestrado.

Aos meus amigos, parceiros de uma vida, pelo apoio, amizade e companheirismo em todas as horas. A todos os integrantes do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, que muito pacientes ouviram minhas solicitações e necessidades. Ensinarão-me muito em conhecimento prático do dia a dia de um laboratório de pavimentação. Gostaria de expressar meu sentimento especial à Aline, Annie, Hermano, Jorge Lucas, Juceline, Rômulo e Wesley, sem vocês eu talvez poderia ter conseguido chegar até aqui, mas, não seria com a mesma alegria, seriedade e companheirismo. Nos momentos em que estive ausente vocês me ajudaram, estenderam às mãos, me auxiliaram e por muitas vezes abriram mãos dos seus compromissos para que eu pudesse finalizar o mais rápido possível os meus ensaios e conseguisse defender. Jorge Lucas, muito obrigada por toda a paciência em me ensinar, por transmitir seus conhecimentos com tanta maestria, você realmente é um professor nato. Com toda a certeza, vocês fizeram a diferença na minha vida!

Estendo meus agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Peço perdão se esqueci de externar minha gratidão a alguém, mas todos vocês de alguma forma impactaram a minha vida e são especiais.

OBRIGADA!

“Uma longa jornada começa com um único passo.”

Lao Tsé

RESUMO

A repetição do tráfego nos pavimentos pode levar ao dano por fadiga na mistura asfáltica que compõe a camada de revestimento. A fadiga é avaliada em laboratório por meio de ensaios cíclicos contínuos. Enquanto isso, em campo, o carregamento é intermitente. No ensaio de laboratório, observa-se a perda de rigidez ao longo do ensaio e a quantidade requerida de ciclos para provocar a falha por fadiga. Devido à intermitência do carregamento em campo, um estudo mais aprofundado do efeito dos períodos de repouso (*Rest Periods – RPs*) sobre a rigidez é importante. Ademais, devido à expectativa de que o repouso possa provocar uma auto-cicatrização de microtrincas (fenômeno chamado na literatura de *healing*), também torna relevante uma investigação sobre o efeito dos *RPs* na vida de fadiga. O objetivo do trabalho foi estudar a influência dos *RPs* sobre a vida de fadiga demonstrando a relação entre as propriedades de danos nas escalas do ligante e da respectiva mistura. Os materiais utilizados na pesquisa foram dois agregados de origem granítica, cinza pesada, CAPs 50/70 provenientes da Petrobras/Lubnor de duas coletas diferentes e um CAP 50/70 proveniente da REFAP. A caracterização de rigidez foi realizada por meio do ensaio de módulo complexo (E^*) por compressão axial para as misturas e do ensaio de módulo de cisalhamento (G^*) complexo por torção para os ligantes. Os ensaios de fadiga foram realizados a temperatura de 19°C e com repetições em diferentes amplitudes de deformação. Também foram realizados, nos mesmos materiais e mesmas condições de temperatura e de amplitude de deformação os ensaios de fadiga com introdução de 5 períodos de repouso de 4h. Para a modelagem viscoelástica linear (VEL) foi utilizado o modelo *2S2PID* (*2 springs, 2 parabolic elements and 1 linear dashpot*), com 7 constantes, e a equação WLF (Williams-Landel-Ferry), com 2 constantes independentes, para a representação do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT). O modelo *2S2PID*, associado à equação WLF, se mostrou satisfatório para a modelagem das misturas e dos ligantes. Das 9 constantes dos modelos ajustados ao G^* de ligantes, 6 puderam ser mantidas para as suas respectivas misturas, todas ligadas a propriedades dependentes do tempo, demonstrando que o comportamento viscoelástico da mistura é herdado do ligante asfáltico e pode ser descrito por uma transformação conhecida na literatura como *SHStS*. Através da utilização dessas metodologias foi possível relacionar o comportamento VEL da mistura com o comportamento reológico do ligante que a compõe. O dano por fadiga nas misturas se mostrou diretamente relacionado ao dano ocorrido nos ligantes correspondentes. Obteve-se a relação entre os efeitos dos *RPs* em ambas as escalas investigadas. Há diferenças em uma mesma escala no comportamento quanto à fadiga com e sem *RPs* e apesar de se observar uma recuperação do

módulo durante os períodos de repouso, esta recuperação não se reflete na quantidade de repetições até a falha por fadiga (Nf), que não se alterou significativamente com o repouso. Conclui-se que a recuperação do módulo deve estar relacionada a outros efeitos (de fenômenos reversíveis), não a auto-cicatrização.

Palavras-chave: Pavimentação. Perda de rigidez. Fadiga. Períodos de Repouso. *Healing*. Fenômenos Reversíveis.

ABSTRACT

Traffic loading repetition can lead to fatigue damage in the asphalt mixtures used in pavement surface courses. Fatigue is evaluated in the laboratory through continuous cyclic tests. Meanwhile, in the field, loading is intermittent. In the laboratory test, the loss of stiffness throughout the test and the required amount of cycles to cause fatigue failure is observed. Different phenomena can cause loss of stiffness throughout loading and recovery over rest. Due to intermittent field loading, further study of the effect of rest periods (RPs) on stiffness is important. In addition, due to the expectation that rest may lead to self-healing of microcracks (a phenomenon designated as healing in the literature), it also makes relevant an investigation into the effect of RPs on fatigue life. The aim of this work is to contribute to the study of the fatigue cracking phenomenon in asphalt mixtures by evaluating the effect of RPs on the scales of the binder and the respective complete asphalt mixture. Materials at both scales will be submitted to fatigue tests with the same PRs. The materials used in the research are two granitic aggregates, fly ash, two asphalt cements (AC) 50/70 from Petrobras/LUBNOR and an AC 50/70 from Petrobras/REFAP. The characterization of the rigidity was performed using the axial compression dynamic modulus for the mixtures (E^*) and the twisted complex shear modulus test for the binders (G^*). Fatigue tests were performed at 19°C and with repetitions at different strain ranges. In the same materials and under the same conditions of temperature and strain, the fatigue tests with 5 RPs of 4h were introduced. For the linear viscoelastic modeling (LVE) we used the 2S2P1D model (2 springs, 2 parabolic elements and 1 linear dashpot), with 7 constants, and the WLF (Williams-Landel-Ferry) equation, with 2 independent constants, for the representation of the Time-Temperature Superposition Principle (TTSP). The 2S2P1D model, associated with the WLF equation, was satisfactory for the modeling of mixtures and binders. Out of the 9 fitted model constants values for binders, 6 could be kept for their respective mixtures, all linked to time-dependent properties, demonstrating that the viscoelastic behavior of the mixture is inherited from the asphalt binder and can be described by method known in the literature as SHStS transformation. Through the use of those methodologies, it was possible to relate the LVE behavior of the mixture with the rheological behavior of the its binder. Fatigue damage in the mixtures was directly related to damage in the corresponding binders. The relationship between the effects of the RPs in both investigated scales was investigated. There are differences in the material behavior regarding fatigue with and without RPs and although there is a recovery of the modulus during rest periods, this recovery is not observed in terms of an increase in the number of cycles at failure (N_f) for the tests with rest,

which did not change significantly with rest. It is concluded that the modulus recovery must be related to other effects (reversible phenomena), not to healing.

Keywords: Paving. Loss of stiffness. Fatigue. Rest periods. Healing. Reversible Phenomena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das diferentes escalas	27
Figura 2 – Domínios do comportamento mecânico do ligante asfáltico de acordo com a deformação (ϵ) e o número de ciclos (N), a depender da temperatura	28
Figura 3 – Domínios do comportamento mecânico da mistura asfáltica de acordo com a deformação (ϵ) e o número de ciclos (N), a depender da temperatura	29
Figura 4 – Representação do limite da VEL na varredura de tensão.....	29
Figura 5 – (a) Mola ou elemento de Hooke; (b) Amortecedor linear ou elemento de Newton	30
Figura 6 – (a) Modelo de Maxwell; (b) Modelo de Voigt	31
Figura 7 – Representação da tensão e deformação ao longo do tempo durante o ensaio de módulo uniaxial de tensão-compressão	34
Figura 8 – Representação do modelo através das curvas: (a) Cole-Cole e (b) Espaço de Black	36
Figura 9 – Representação do modelo através das curvas: (a) Isotermas e (b) Curva Mestre	37
Figura 10 – Representação da transformação gráfica do $SHStS$	38
Figura 11 – Representação gráfica do ensaio de fadiga à tensão controlada	40
Figura 12 – Representação gráfica do ensaio de fadiga à deformação controlada	40
Figura 13 – Geometria de placas paralelas.....	41
Figura 14 – Representação de um CP no ensaio uniaxial por tração-compressão direta.....	42
Figura 15 – Fases de recuperação durante os RPs	43
Figura 16 – Representação esquemática das contribuições dos diferentes fenômenos no módulo complexo durante o ensaio de carga cíclica com repouso.....	44
Figura 17 – Exemplo de curvas C vs S , considerando ou não o efeito da temperatura medida na superfície dos CPs	47
Figura 18 – Representação da vida de fadiga a partir do N_f e da amplitude de deformação	48
Figura 19 – Exemplo dos dados experimentais do ligante no ensaio de fadiga exemplificando as fases que ocorrem durante o ensaio	50
Figura 20 – Fluxograma da pesquisa	51
Figura 21 – Comparação entre as aberturas da série de peneiras utilizadas pelo DNIT e AASHTO	53

Figura 22 – Curva granulométricas dos agregados por pilhas	53
Figura 23 – Curva granulométrica das misturas	57
Figura 24 – Equipamento <i>AIMS</i>	59
Figura 25 – Sequência do ensaio de adesividade.....	61
Figura 26 – Resultado qualitativo do ensaio de adesividade: (a) M1L1; (b) M1R; (c) M2L2 e M2L2C.....	61
Figura 27 – Imagem utilizada para o processamento digital.....	62
Figura 28 – Protocolo do ensaio de módulo dos ligantes asfálticos	65
Figura 29 – (a) <i>Universal Testing Machine</i> ; (b) CP montado dentro da UTM para a realização do ensaio	66
Figura 30 – Protocolo do ensaio de módulo dinâmico das misturas asfálticas	66
Figura 31 – Teste de sinal (a) antes do ajuste e (b) depois do ajuste.....	73
Figura 32 – Análise da modificação do sinal do atuador durante a realização do ensaio....	74
Figura 33 – Determinação do N_f em função do ângulo de fase.....	75
Figura 34 – Representação em função do tempo a (a) Integridade e (b) Dano	75
Figura 35 – Área de cálculo do FFL e FFM.....	76
Figura 36 – Esquema de carga e repouso durante a realização do ensaio.....	78
Figura 37 – Exemplo de dificuldade de ensaio: Picos no ensaio de fadiga com <i>RP</i> s nos ligantes quando não se realiza a purga.....	79
Figura 38 – (a) Cole-Cole dos ligante e (b) Curvas do Espaço de Black dos ligantes	81
Figura 39 – Fatores de deslocamento a_T dos ligantes.....	82
Figura 40 – Curvas isotermas dos ligantes: (a) L1; (b) L2; (c) R.....	82
Figura 41 – Curvas mestras na temperatura de 21,1°C dos ligantes (a) módulo e (b) ângulo de fase.....	83
Figura 42 – Relação entre os valores experimentais dos ligantes e os previstos: (a) módulo dinâmico e; (b) ângulo de fase.....	84
Figura 43 – Comparação da Série de Prony – KVG de 22 elementos com <i>2S2PID</i> dos ligantes	85
Figura 44 – Curvas mestras do módulo das misturas	86
Figura 45 – Relação entre os valores experimentais das misturas e os previstos: (a) módulo dinâmico e; (b) ângulo de fase.....	87
Figura 46 – Fatores de deslocamento a_T das misturas asfálticas.....	87
Figura 47 – Curvas isotérmicas das misturas: (a) M1L1; (b) M1R; (c) M2L2 e; (d) M2L2R	89

Figura 48 – Comparação da Série de Prony – KVG com 2S2PID das misturas	89
Figura 49 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f do ligante L1	90
Figura 50 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f do ligante L2	90
Figura 51 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f do ligante R	91
Figura 52 – (a) Curvas características de dano; (b) curva G^R vs N_f dos ligantes asfálticos.	92
Figura 53 – Curvas de simulação da fadiga a N_f constante a partir dos dados experimentais de ensaio dos ligantes asfálticos para as seguintes temperaturas: (a) 0°C; (b) 10°C; (c) 20°C; (d) 30°C; (e) 40°C.....	93
Figura 54 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M1L1	94
Figura 55 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M1R.....	94
Figura 56 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M2L2	95
Figura 57 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M2L2C.....	95
Figura 58 – (a) Curvas características de dano; (b) curva G^R vs N_f das misturas	96
Figura 59 – Curvas de simulação da fadiga a N_f constante a partir dos dados experimentais de ensaio das misturas asfálticas para as seguintes temperaturas: (a) 0°C; (b) 10°C; (c) 20°C; (d) 30°C; (e) 40°C.....	97
Figura 60 – Resultados experimentais do ligante L1 para testes de <i>RP</i> s com 5 fases de carregamento com $N_f^{10\%}$ à amplitude de 40.000 μ m/m e repouso de 4h entre os carregamentos e uma fase de carga até o rompimento: (a) módulo complexo em função do tempo e; (b) o ângulo de fase em função do tempo ..	100
Figura 61 – Resultados experimentais da amplitude de deformação em função do tempo do ligante L1 para testes de <i>RP</i> s: 5 fases de carregamento com $N_f^{10\%}$ à amplitude de 40.000 μ m/m e repouso de 4h entre os carregamentos e uma fase de carga até o rompimento	101
Figura 62 – Resultados experimentais do ligante L1 para testes de <i>RP</i> s à amplitude de 40.000 μ m/m: (a) módulo complexo em função do número de ciclos aplicados e; (b) o ângulo de fase em função do número de ciclos aplicados	101
Figura 63 – Curva de característica de dano do ligante L1 para testes de <i>RP</i> s à amplitude de à amplitude de 40.000 μ m/m	102
Figura 64 – Dados do ligante L1 para testes de <i>RP</i> s à amplitude de 40.000 μ m/m e repouso de 4h entre os carregamentos: (a) Integridade do material em função do tempo e; (b) o dano acumulado em função do tempo.....	103
Figura 65 – Energia dissipada do ligante L1 em função do número de ciclos aplicados durante as fases de carregamento à amplitude de 40.000 μ m/m	103

Figura 66 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de $40.000\mu\text{m/m}$..	104
Figura 67 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de $20.000\mu\text{m/m}$..	105
Figura 68 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de $10.000\mu\text{m/m}$: (a) L1; (b) L2 e R.....	105
Figura 69 – Curva de característica de dano da mistura M1L1 com AID $200\mu\text{m/m}$	106
Figura 70 – Dados da mistura M1L1: (a) Integridade do material em função do tempo e; (b) o dano acumulado em função do tempo	107
Figura 71 – Valores de N_f das misturas para as amplitudes de deformação de: (a) $150\mu\text{m/m}$; (b) $200\mu\text{m/m}$; (c) $250\mu\text{m/m}$; (d) $300\mu\text{m/m}$; (e) $350\mu\text{m/m}$	107
Figura 72 – Amplitudes médias de deformação das misturas asfálticas	110
Figura E-1 – Dados do ligante L1 com amplitude de $10.000\mu\text{m/m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	131
Figura E-2 – Dados do ligante L1 com amplitude de $20.000\mu\text{m/m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	132
Figura E-3 – Dados do ligante L2 com amplitude de $10.000\mu\text{m/m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	133
Figura E-4 – Dados do ligante L2 com amplitude de $20.000\mu\text{m/m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada	

	em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	134
Figura E-5	– Dados do ligante R com amplitude de 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	136
Figura E-6	– Dados do ligante R com amplitude de 20.000 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo	137
Figura F-1	– Dados da mistura M1L1 com AID 150 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	139
Figura F-2	– Dados da mistura M1L1 com AID 300 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	139
Figura F-3	– Dados da mistura M1R com AID 200 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	140
Figura F-4	– Dados da mistura M1R com AID 250 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	141
Figura F-5	– Dados da mistura M1R com AID 300 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	141
Figura F-6	– Dados da mistura M2L2 com AID 200 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	142

Figura F-7 – Dados da mistura M2L2 com AID 300 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	143
Figura F-8 – Dados da mistura M2L2 com AID 350 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	143
Figura F-9 – Dados da mistura M2L2C com AID 300 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	144
Figura F-10 – Dados da mistura M2L2C com AID 350 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos Mecânicos de previsão de comportamento de materiais viscoelásticos lineares	32
Quadro 2 – Características dos ensaios à fadiga em misturas asfálticas.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características gerais utilizadas nos testes com repouso	45
Tabela 2 – Caracterização física dos agregados	54
Tabela 3 – Caracterização dos ligantes	55
Tabela 4 – Resultados dos parâmetros volumétricos	57
Tabela 5 – Valores limites para cada tipo de propriedade física segundo o sistema de classificação Ibiapina (2018)	58
Tabela 6 – Resultado da análise do agregado granítico 1	59
Tabela 7 – Resultado da análise do agregado granítico 2	60
Tabela 8 – Percentuais de áreas em PDI	63
Tabela 9 – Resultados de RT das misturas asfálticas.....	63
Tabela 10 – Resultados de MR das misturas asfálticas	64
Tabela 11 – Recomendações descritas na norma AASHTO T 342 (2011) para a realização do ensaio	67
Tabela 12 – Tensões máximas e mínimas aplicadas no ensaio de módulo dinâmico	68
Tabela 13 – Classificação dos critérios estatísticos de qualidade de ajuste das curvas de caracterização VEL	71
Tabela 14 – Condições para a determinação das demais amplitudes de deformações para realização do ensaio de fadiga.....	74
Tabela 15 – Constantes de Arrhenius e WLF para o cálculo do a_T	82
Tabela 16 – Parâmetros da modelagem dos ligantes	84
Tabela 17 – Parâmetros da modelagem das misturas	86
Tabela 18 – $C_{médio}$, $S_{médio}$ e $DMR_{médio}$ dos ligantes asfálticos	91
Tabela 19 – Parâmetros de fadiga dos ligantes asfálticos	92
Tabela 20 – $C_{médio}$, $S_{médio}$ e $DMR_{médio}$ das misturas.....	95
Tabela 21 – Parâmetros de fadiga das misturas.....	96
Tabela 22 – Fatores de fadiga dos ligantes e das misturas a 19°C	99
Tabela 23 – Amplitudes médias de deformação das misturas asfálticas em cada bloco de carregamento.....	109

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

$ E^* _{\text{fingerprint}}$	Módulo Dinâmico a Tração/Compressão
$ E^* _{\text{LVE}}$	Módulo Dinâmico a Compressão
<i>2S2PID</i>	<i>2 Spring 2 Parabolic Dampers 1 Dashpot</i>
<i>AASHTO</i>	<i>American Association of State Highway and Transportation</i>
ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas
AID	Amplitude Inicial de Deformao
<i>AIMS</i>	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
A_{PDI}	Percentual de rea Recoberta pelo Ligante
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Pseudo-rigidez
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederao Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
DC	Deformao Controlada
DER	Departamento de Estrada e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<i>DSR</i>	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
E^*	Módulo Complexo das Misturas
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
<i>FHWA</i>	<i>Federal Highway Administration</i>
G^*	Módulo de Cisalhamento dos Ligantes
G_{mb}	Densidade Aparente Medida
G_{mm}	Densidade Máxima Medida
JPG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
LUBNOR	Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Differential Transformes</i>
MAC	Mistura Asfáltica Completa
MAF	Matriz de Agregados Finos
MDC	Mecânica do Dano Contínuo
PDI	Processamento Digital de Imagem

PG	Grau de Desempenho
PSTT	Princípio de Superposição Tempo-Temperatura
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
<i>RPs</i>	<i>Rest Periods</i>
S	Dano
<i>SHStS</i>	<i>Shift-Homothety-Shift in time Shift</i>
<i>S-VECD</i>	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
TC	Tensão Controlada
TNM	Tamanho Nominal Máximo
T_{REF}	Temperatura de Referência
<i>UTM-25</i>	<i>Universal Testing Machine 25</i>
<i>VECD</i>	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
VEL	Viscoelástico Linear
V_v	Volume de vazios
WLF	Williams-Landel-Ferry

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Considerações Iniciais.....	24
1.2	Problema e Questões de Pesquisa.....	25
1.3	Objetivos	26
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Composição de Materiais Asfálticos.....	27
2.2	Viscoelasticidade Linear	28
2.2.1	<i>Módulo Complexo (E^* ou G^*).....</i>	33
2.2.2	<i>Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT).....</i>	34
2.2.3	<i>Curvas de Caracterização Viscoelástica Linear</i>	35
2.2.4	<i>Transformação SHStS</i>	37
2.3	Dano por Fadiga	38
2.3.1	<i>Ensaio de Fadiga com Placas Paralelas</i>	41
2.3.2	<i>Ensaio de Fadiga Uniaxial de Tração-Compressão.....</i>	41
2.3.3	<i>Períodos de Repouso no Ensaio de Fadiga</i>	42
2.4	Mecânica do Dano Contínuo – MDC	45
2.4.1	<i>Crítérios de Falha</i>	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Considerações Iniciais.....	51
3.2	Agregado	52
3.3	Caracterização Básica dos Ligantes	54
3.4	Dosagem das Misturas Asfálticas	55
3.4.1	<i>Procedimento</i>	55
3.4.2	<i>Enquadramento das curvas granulométricas e parâmetros volumétricos.....</i>	56
3.5	Processamento Digital de Imagem (PDI)	57
3.6	Adesividade ao Ligante Asfáltico	60
3.7	Percentual de Área de Agregado Recoberto por meio de PDI	61
3.8	Caracterização Mecânica Básica das Misturas Asfálticas.....	63
3.8.1	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	63
3.8.2	<i>Módulo de Resiliência.....</i>	63
3.9	Caracterização Reológica do Ligante.....	64
3.10	Módulo Dinâmico por Compressão Axial	65

3.11	Curvas de Caracterização VEL.....	68
3.11.1	<i>Aplicação do Modelo 2S2PID</i>	69
3.11.2	<i>Aplicação da Transformação SHStS</i>	71
3.12	Ensaio de Fadiga nos Ligantes	71
3.13	Ensaio de Fadiga Uniaxial de Tração-Compressão	72
3.14	Fator de Fadiga.....	76
3.15	Tempo de Repouso no Ensaio de Fadiga.....	77
3.16	Peculiaridades e Dificuldades na Realização do Ensaio de Fadiga Com e Sem Tempo de Repouso	78
3.16.1	<i>Ligantes Asfálticos</i>	78
3.16.2	<i>Misturas Asfálticas</i>	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Caracterização e Modelagem Viscoelástica Linear	81
4.1.1	<i>Ligantes Asfálticos</i>	81
4.1.2	<i>Misturas Asfálticas</i>	85
4.2	Dano por Fadiga	89
4.2.1	<i>Fadiga nos Ligantes Asfálticos</i>	89
4.2.2	<i>Simulação do Comportamento dos Ligantes Asfálticos</i>	92
4.2.3	<i>Fadiga nas Misturas Asfálticas</i>	93
4.2.4	<i>Simulação do Comportamento das Misturas Asfálticas</i>	96
4.2.5	<i>Fator de Fadiga</i>	98
4.3	Fadiga com Repouso.....	99
4.3.1	<i>Ligante Asfáltico</i>	99
4.3.2	<i>Mistura Asfáltica</i>	105
5	CONCLUSÕES.....	111
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	113
	REFERÊNCIAS.....	114
	APÊNDICE A – ESPECTRO DE RELAXAÇÃO DOS LIGANTES	127
	APÊNDICE B – ESPECTRO DE RETARDAÇÃO DOS LIGANTES.....	128
	APÊNDICE C – ESPECTRO DE RELAXAÇÃO DAS MISTURAS.....	129
	APÊNDICE D – ESPECTRO DE RETARDAÇÃO DAS MISTURAS	130
	APÊNDICE E – RESULTADOS DO TESTE DE FADIGA COM REPOUSO DOS LIGANTES.....	131
	APÊNDICE F – RESULTADOS DO TESTE DE FADIGA COM	

REPOUSO DAS MISTURAS.....	139
ANEXO A – ESPECTRO DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MODELO 2S2P1D NAS CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO VISCOELASTICA LINEAR.....	146
ANEXO B – RELATÓRIO DE ANÁLISE ATRAVÉS DO AIMS DO AGREGADO GRANÍTICO 1	147
ANEXO C – RELATÓRIO DE ANÁLISE ATRAVÉS DO AIMS DO AGREGADO GRANÍTICO 2	150
ANEXO D – CÓDIGO IMPLEMENTADO DO PDI.....	153

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desempenho dos pavimentos é um ponto bastante discutido pelos pesquisadores, no qual se predomina a percepção de que algo precisa ser realizado para que se atinja um padrão crescente de qualidade. Dentre as preocupações está a de minimizar o impacto causado por trincas provenientes do dano por fadiga nos revestimentos asfálticos (Little e Bhasin, 2007; Brito *et al.*, 2008; Underwood *et al.*, 2009; Underwood *et al.*, 2012; Ayar *et al.*, 2016; Santiago *et al.*, 2018). São rodovias e vias urbanas onde predominam as mais diversas patologias e a vida útil do pavimento se encontra frequentemente aquém do esperado (CNT, 2018).

Nos pavimentos asfálticos, as cargas dos veículos são aplicadas no revestimento e transmitidas às subcamadas. Em decorrência das repetições das cargas de veículos pesados, pode ocorrer o dano por fadiga na mistura asfáltica que compõe o revestimento. Esse dano pode ser descrito como a diminuição gradual da resistência do material em virtude do efeito de solicitações repetidas (Pinto, 1991). Di Benedetto e De La Roche (1998) afirmam que os pavimentos asfálticos são submetidos a curtos intervalos de tempo de carregamento que causam degradações, propiciando a perda de rigidez do material e conseqüentemente ocasionando o fenômeno de fadiga. A predição e o desempenho quanto à fadiga no pavimento é algo bastante desafiador, apesar dos esforços que vêm sendo realizados com o objetivo de compreender melhor o fenômeno de evolução das trincas em um revestimento (Pronk e Hopman, 1991; Si *et al.*, 2002b; Kim *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2005; Babadopulos, 2015; Tapsoba *et al.*, 2015; Fritzen, 2016; Santiago *et al.*, 2018).

Classicamente, os ensaios laboratoriais de fadiga consistem na aplicação de ciclos de carga de maneira contínua, sem a consideração de variações de descanso entre os mesmos (Di Benedetto *et al.*, 2004). O descanso pode ter efeito sobre a evolução da rigidez do material ao longo do ensaio devido a diferentes fenômenos, como: auto-aquecimento, tixotropia, não-linearidade e dano (Soltani e Anderson, 2005; Di Benedetto *et al.*, 2011; Mangiafico, 2014; Babadopulos, 2017). A literatura também aponta que pode haver efeito no número de ciclos para ruptura (Ayar *et al.*, 2018).

Em campo, a aplicação das cargas não é contínua, de maneira que os fenômenos reversíveis que ocorrem no ensaio laboratorial com carregamento contínuo (auto-aquecimento e tixotropia) não ocorrem na situação real em serviço. Sendo assim, a correspondência entre

campo e laboratório é enfraquecida. Essa relação precisa ser melhor entendida por meio da investigação do efeito dos períodos de repouso nos resultados de ensaios de laboratório.

As misturas asfálticas são constituídas de agregados (partículas elásticas) e ligante (material viscoelástico). Em virtude da presença do ligante, a mistura completa apresenta características termo-sensíveis viscoelásticas. Segundo Baaj *et al.* (2017), o ligante asfáltico pode ser considerado um material que se auto regenera, ou seja, possui a capacidade de restaurar parte de sua rigidez e resistência durante períodos de descanso e temperaturas elevadas. Na literatura, a auto regeneração do material é denominada *healing*, podendo levar a uma extensão na vida útil do ligante e, por consequência, da mistura asfáltica correspondente (Daniel e Kim, 2001; Si *et al.*, 2002b; Zeiada *et al.*, 2018).

Portanto, para permitir uma previsão adequada da vida útil de um pavimento asfáltico em relação ao dano por fadiga, é importante que se considere, em ensaios de laboratório ou por meio de ensaios em associação a simulações computacionais, situações próximas da realidade de campo. Entre elas está a consideração dos períodos de repouso (*Rest Periods - RPs*) entre os carregamentos durante a realização de ensaios de laboratório.

1.2 Problema e Questões de Pesquisa

Um dos maiores problemas da engenharia rodoviária é estimar de forma satisfatória a vida útil dos pavimentos, seja por meio de ensaios laboratoriais que busquem simular a situação de campo, seja pela busca de propriedades fundamentais que possam ser usadas em modelos computacionais que considerem da forma mais aproximada possível a complexidade do fenômeno em campo. No pavimento em serviço, há variabilidade nas condições climáticas e os carregamentos mecânicos apresentam características variáveis e intermitentes. Nos ensaios laboratoriais de vida de fadiga, em geral, os carregamentos são cíclicos e contínuos, além de não considerarem variação da temperatura no interior do material durante a realização do ensaio. Em virtude da característica viscoelástica do ligante asfáltico, sendo altamente influenciado pelas variações de temperatura e frequência de carregamento, este é comumente considerado o elemento que mais afeta o comportamento de fadiga da mistura asfáltica (FHWA, 2002).

Em relação a esses problemas, algumas questões são formuladas para a presente pesquisa:

- a) Qual a relação entre os efeitos de períodos de repouso nas misturas asfálticas completas e nos ligantes?

- b) Ao longo dos ensaios, haveria períodos em que predominem efeitos reversíveis (auto-aquecimento, tixotropia, não-linearidade) em vez do dano por fadiga? Quando este predominaria?
- c) Existem diferenças expressivas nas curvas da pseudo-rigidez (C) vs o dano (S), do ensaio de tração direta (tração-compressão) quando são considerados diferentes tempos de descanso entre os carregamentos?
- d) Diferenças nas curvas da pseudo-rigidez (C) vs o dano (S) com a consideração de diferentes períodos de repouso influenciam significativamente a previsão de desempenho dos revestimentos de pavimentos?
- e) O tempo de repouso influencia no resultado final do ensaio de fadiga (número de ciclos até a falha) nos ligantes e nas misturas asfálticas?

1.3 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é investigar os efeitos do período de repouso nos ensaios laboratoriais de fadiga nas escalas da mistura asfáltica completa e do ligante. Os seguintes objetivos específicos podem ser listados para se buscar o objetivo geral:

- a) Verificar a relação entre as escalas de ligante e mistura asfáltica completa com e sem a consideração de períodos de repouso;
- b) Verificar se há períodos (e.g. nos ciclos iniciais de ensaio) de predominância de efeitos reversíveis nas escalas de mistura asfáltica completa e do ligante e, se for o caso, quando estes se iniciam;
- c) Avaliar mudanças que ocorrem na curva da pseudo-rigidez (C) vs o dano (S) quando se considera diferentes tempos de descanso entre os carregamentos;
- d) Verificar a influência das mudanças no ensaio na curva da pseudo-rigidez (C) vs o dano (S) obtida para a previsão de desempenho (e.g. cálculo de dano médio em revestimentos de pavimentos);
- e) Identificar e avaliar as diferenças de comportamento dos materiais a partir dos resultados dos ensaios com e sem períodos de repouso (e.g. número de ciclos até a falha);

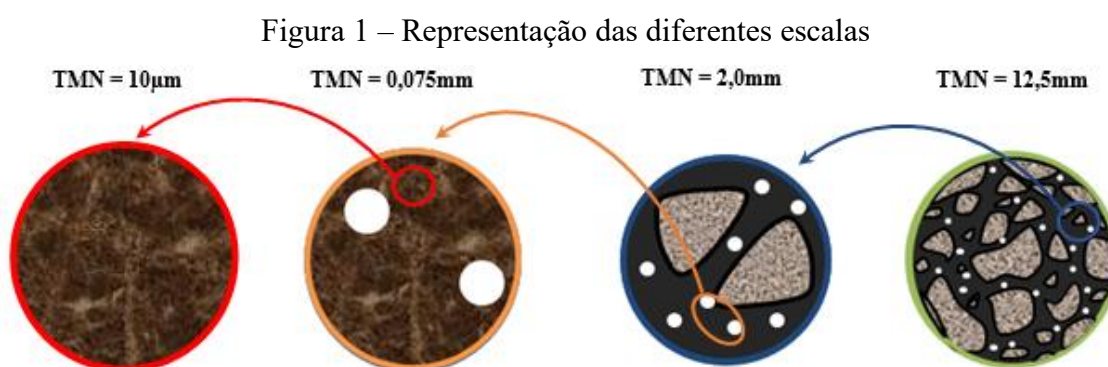
2 REVISÃO DA LITERATURA

Inicialmente, este capítulo traz dados a respeito da composição dos materiais asfálticos utilizados na pavimentação. Em seguida é feita uma revisão sobre a caracterização viscoelástica linear dos materiais e são mostrados os modelos mecânicos mais apropriados para esta representação. Na sequência, trata-se do dano por fadiga, dos períodos de repouso, além dos critérios de falha utilizados na caracterização do dano dos materiais asfálticos.

2.1 Composição de Materiais Asfálticos

O desempenho das misturas é influenciado por fatores distintos, tais como origem dos agregados, tipo de ligante, presença e tipo de modificador, presença de material de enchimento, granulometria dos agregados e volume de vazios, dificultando assim a análise do comportamento mecânico do material. São utilizadas na literatura 4 escalas de materiais asfálticos para fins de caracterização laboratorial (apresentado na Figura 1):

- a) Ligante;
- b) Mastique: ligante + filer;
- c) Matriz de Agregados Finos (MAF): ligante + filer + agregado miúdo;
- d) Mistura Asfáltica Completa (MAC): ligante + filer + agregado miúdo + agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre as quatro escalas citadas, o ligante é a escala mais simples e mais uniforme, enquanto que a MAC é a escala mais complexa e heterogênea. De acordo com Underwood e Kim (2013), as propriedades referentes à MAF, mastique e principalmente o ligante, influenciam diretamente o comportamento quanto à fadiga da MAC. Segundo FHWA (2002),

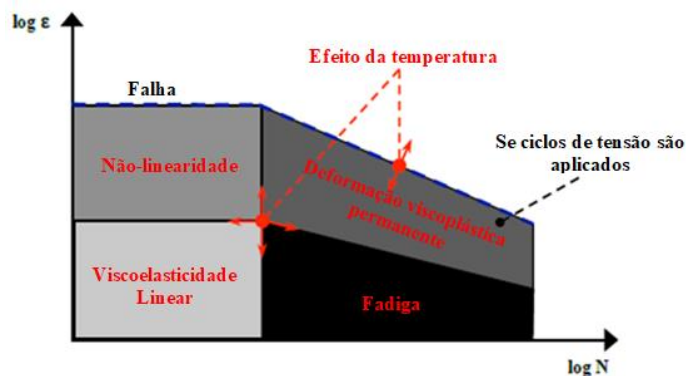
o ligante é o elemento que mais afeta o comportamento quanto ao dano por fadiga da mistura asfáltica em decorrência da sua característica viscoelástica.

2.2 Viscoelasticidade Linear

Nas análises e nos procedimentos de dimensionamento é comum a consideração de que os materiais utilizados encontram-se dentro de um regime elástico linear. Porém, a maioria dos materiais existentes depende do tempo, da pressão e da temperatura aos quais estão sujeitos. Os domínios do comportamento dos materiais asfálticos (ligante ou mistura) podem ser representados de acordo com a deformação (ϵ) e o número de ciclos de carregamento (N) a qual o material está submetido, de acordo com as Figura 2 e 3 (Mangiafico, 2014).

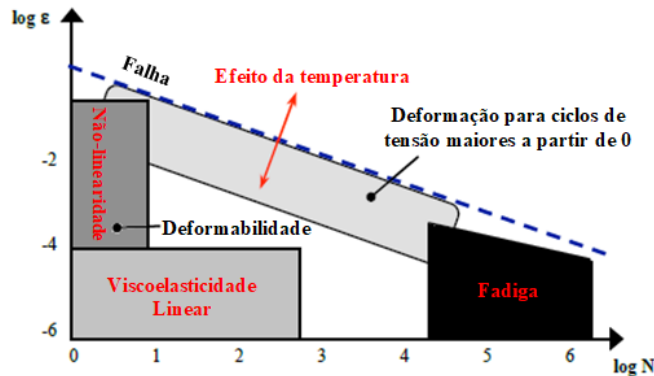
No domínio Viscoelástico Linear (VEL) quando ocorrem pequenas deformações, os materiais respondem às tensões com o comportamento intermediário entre o linear e o viscoso, havendo comumente uma defasagem entre o momento em que a tensão é aplicada e o momento em que o material responde a essa tensão. Além de o material ser dependente da sua característica quanto a ser elástico ou viscoso, o comportamento dos materiais está intimamente ligado a fatores como a temperatura, frequência, número de ciclos aplicados e o envelhecimento do mesmo (Roberts *et al.*, 1996; Huang, 2004; Kim, 2009; Hunter *et al.*, 2015; Huang e Di Benedetto 2015; Babadopulos, 2017).

Figura 2 – Domínios do comportamento mecânico do ligante asfáltico de acordo com a deformação (ϵ) e o número de ciclos (N), a depender da temperatura



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014).

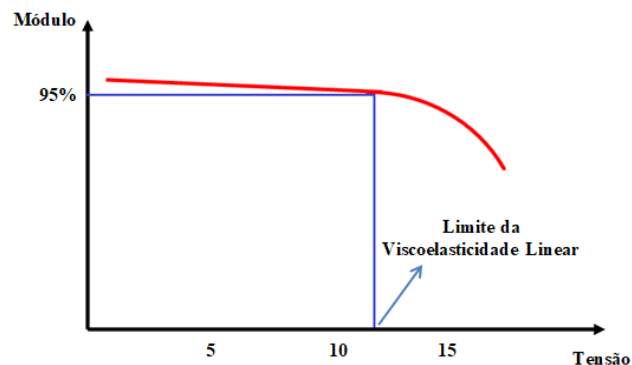
Figura 3 – Domínios do comportamento mecânico da mistura asfáltica de acordo com a deformação (ϵ) e o número de ciclos (N), a depender da temperatura



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014).

Os materiais tipicamente elásticos podem ser descritos de acordo com a Lei de Hooke ($\Phi = 0^\circ$), enquanto que os materiais tipicamente viscosos são explicados de acordo com a Lei de Newton ($\Phi = 90^\circ$). As leis de Hooke e de Newton são leis lineares, havendo uma proporcionalidade direta entre a aplicação da tensão e a deformação. Em virtude dos materiais VEL possuírem características tanto de materiais elásticos como de materiais viscosos, o ligante asfáltico possui ângulo de fase dentro de um intervalo de $0^\circ < \Phi < 90^\circ$. Outro fato que ocorre nos materiais viscoelásticos é a existência do comportamento linear dentro de um limite de faixa de tensão. Acima desse limite de faixa, o material comporta-se de forma não-linear, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Representação do limite da VEL na varredura de tensão



Fonte: Elaborado pela autora.

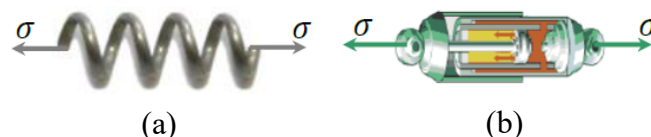
Na caracterização de materiais VEL diversas propriedades são utilizadas, entre elas estão o módulo (E), o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de cisalhamento, entre outros, além de ser necessário assumir a isotropia e a homogeneidade do material. Nos ligantes é realizado

o ensaio no qual é aplicada uma carga oscilatória, obtendo-se os parâmetros de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (ϕ). Enquanto que nas misturas asfálticas são aplicadas cargas axiais oscilantes no corpo de prova (CP), nas quais se obtêm os parâmetros de módulo dinâmico ($|E^*|$), ângulo de fase (Φ) existente entre a tensão e a deformação axial e inclusive o ângulo de fase (Φ_v) existente entre a deformação axial e a transversal.

Existem diversos modelos matemáticos e mecânicos utilizados para a previsão do comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos na literatura (Boltzmann, 1876; Allen *et al.*, 2001; Park e Kim, 2001; Olard e Di Benedetto, 2003; Bari e Witczak, 2006; Kim, 2009; Xu e Solaimanian, 2009). De acordo com Dias (2016), para a utilização de modelos mecânicos na previsão do comportamento viscoelástico dos materiais é necessário identificar e caracterizar os seus elementos constituintes (amortecedor linear, amortecedor parabólico e mola) a fim de facilitar a compreensão do que ocorre nos modelos. No amortecedor linear a tensão que ocorre no material varia de acordo com a taxa de deformação aplicada e a viscosidade do material; no amortecedor parabólico a tensão que ocorre no material depende do tempo de relação, da viscosidade do material, da deformação que é dependente do tempo, do módulo de rigidez complexo e do tempo de relaxação; e na mola a deformação ocorre linearmente com a tensão aplicada.

O modelo mecânico mais apropriado para a representação dos materiais elásticos lineares é utilização de uma mola, conhecido como elemento de Hooke, representado na Figura 5(a); entretanto, para os materiais de comportamento viscoso linear o modelo mecânico que melhor o representa é um amortecedor linear, conhecido como elemento de Newton, representado na Figura 5(b) (Christensen, 1982; Olard e Di Benedetto, 2003; Xu e Solaimanian, 2009; Coutinho, 2012; Mensch, 2017; Lucas Júnior, 2018).

Figura 5 – (a) Mola ou elemento de Hooke; (b) Amortecedor linear ou elemento de Newton

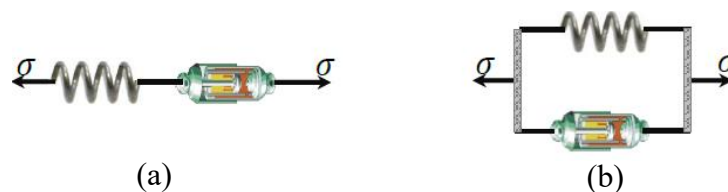


Fonte: Lucas Júnior (2018).

Diversos outros modelos foram propostos a fim de melhor representar o comportamento real dos materiais mais complexos, como os materiais viscoelásticos, podendo os elementos constituintes dos modelos mecânicos (amortecedor linear, amortecedor parabólico e mola) serem associados em paralelo ou em série. Os modelos de Maxwell e de Voigt utilizam

uma mola e um amortecedor linear, sendo que esses elementos são associados em série no modelo de Maxwell e em paralelo no modelo de Voigt, conforme Figura 6. No modelo de Maxwell é considerado que a deformação é a soma da deformação elástica com a deformação viscosa, já no modelo de Voigt é considerado que as deformações dos dois elementos são semelhantes, sem haver diferenças entre as suas deformações. Em virtude dos modelos de Maxwell e Voigt não serem apropriados para representar o comportamento VEL dos materiais, foram desenvolvidos modelos mecânicos mais complexos, conforme o Quadro 1.

Figura 6 – (a) Modelo de Maxwell; (b) Modelo de Voigt



Fonte: Lucas Júnior (2018).

O modelo de Maxwell-Wiechert Generalizado consiste em um conjunto de n elementos mola-amortecedor associados em paralelo, enquanto que no modelo de Kelvin-Voigt Generalizado o conjunto é de n elementos mola-amortecedor associados em série.

De acordo com Babadopulos (2017) o modelo Huet e o modelo Huet-Sayegh são os dois modelos que representam a viscoelasticidade linear de espectro contínuo. No modelo de Huet existe a introdução de amortecedores parabólicos, que consiste em um sistema com uma mola e dois amortecedores em série. Porém, segundo esse modelo as misturas asfálticas apresentam inconformidade na assíntota inferior da curva mestra do módulo $|E^*|$, pois quando a frequência tende a zero ao invés do valor E_0 tender a ser maior que zero, esse tende a zero (Olard e Di Benedetto, 2003). Já no modelo Huet-Sayegh há a introdução de mais uma mola em paralelo com o modelo Huet descrito anteriormente. Apesar de haver um melhor ajuste com a introdução de uma mola, melhorando assim o modelo, ainda existem inconformidades quando são aplicadas baixas frequências e na maior frequência de ensaio, que equivale a menor temperatura (Olard e Di Benedetto, 2003; Dias, 2016; Babadopulos, 2017).

Quadro 1 – Modelos Mecânicos de previsão de comportamento de materiais viscoelásticos lineares

Maxwell-Wiechert Generalizado	
Kelvin-Voigt Generalizado	
Huet	
Huet-Sayegh	
2S2PID	

Fonte: Adaptado de Lucas Júnior (2018).

A fim de melhor ajustar os desvios que ocorrem na representação do comportamento viscoso assintótico com o uso do modelo Huet-Sayegh, é apropriado a adição de um amortecedor linear ao modelo conhecido como *2S2PID* (2 *springs*, 2 *parabolic elements* e 1 *dashpot*). Este modelo possui um conjunto de mola em paralelo com uma mola, dois amortecedores parabólicos e um amortecedor linear associados em série. De acordo com Olard e Di Benedetto (2003), pode ser utilizado para modelar o comportamento tanto dos ligantes quanto das misturas asfálticas, promovendo a resposta do material em relação as diferentes frequências e temperaturas, além de possibilitar a correlação entre os parâmetros utilizados com as propriedades físicas do material. A Equação 1 representa o módulo complexo do material através do modelo *2S2PID*, onde é considerado que os tempos de relaxação de todos os amortecedores utilizados são iguais, tendo apenas diferença em suas potências.

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

Em que: E_0 : valor do módulo quando a frequência tende a infinito;

E_∞ : valor do módulo quando a frequência tende a zero;

δ , k e h : constantes adimensionais.

β : constante relacionada a viscosidade;

ω : frequência angular;

τ : tempo;

Os resultados de módulo complexo podem ser modelados através do modelo *2S2PID*, e podem ser analisados em diferentes tipos de curvas, como a Cole-Cole, o Espaço de Black e as Curvas Mestras, as quais serão apresentadas detalhadamente em itens a seguir.

2.2.1 Módulo Complexo ($|E^*|$ ou $|G^*|$)

Segundo Pritz (1998), o módulo complexo é considerado uma propriedade de rigidez utilizada na caracterização dos materiais viscoelásticos, podendo ser considerado como a relação entre a deformação e a tensão (em espaço transformado) quando é aplicada uma carga senoidal. O ensaio considera a influência da temperatura e da frequência de carregamento, tornando-o o principal ensaio para melhor compreender a rigidez de misturas asfálticas.

O módulo complexo apresenta um ângulo de fase que relaciona a sua parte imaginária e a sua parte real. A parte real do módulo complexo está relacionada às propriedades de reversibilidade mecânica (elásticas) do comportamento do material, na qual não há atraso de fase entre a tensão e a deformação, enquanto que a parte imaginária se relaciona com efeito viscoso.

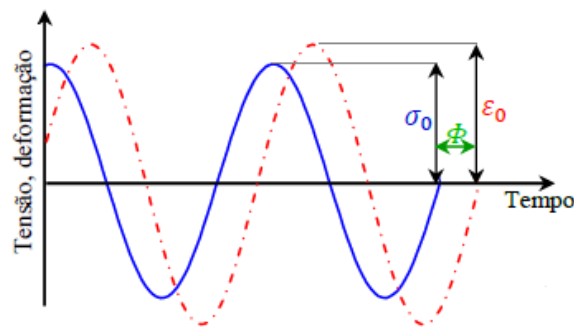
O módulo complexo é dependente do tempo e da temperatura ao qual o material está sujeito, e a relação existente entre as amplitudes de tensão e deformação é o valor absoluto do módulo complexo, conforme as Equações 2 e 3. A Figura 7 mostra a representação da amplitude da tensão (σ_0), a amplitude de deformação (ε_0) e o ângulo de fase (Φ) encontrados em um ensaio de módulo uniaxial tensão-compressão.

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \Phi)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\Phi + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\Phi \quad (2)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

Em que: σ_0 : amplitude da tensão;
 ε_0 : amplitude de deformação;
 ω : frequência angular;
 τ : tempo;
 Φ : ângulo de fase.

Figura 7 – Representação da tensão e deformação ao longo do tempo durante o ensaio de módulo uniaxial de tensão-compressão



Fonte: Adaptado de Lucas Júnior (2018).

2.2.2 Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT)

Para uma melhor verificação do comportamento dos materiais viscoelásticos é necessário realizar uma análise na qual a faixa de tempo (frequência) seja bastante ampla, podendo chegar de 10 a 15 décadas logarítmicas. Sem a aplicação do Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) seriam necessários anos para a ampla varredura de frequência e mensuração da propriedade do material em intervalos de tempo que se comparam a vibração molecular. De acordo com o PSTT o aumento da temperatura é equivalente ao aumento do tempo, sendo possível evitar longos períodos de observação (realização de ensaio) com a aplicação de diferentes temperaturas (Ferry, 1980; Christensen, 1982; Kim, 2009; Silva, 2009).

O material viscoelástico tem normalmente dependente da temperatura. Porém, em temperaturas diferentes pode apresentar comportamento equivalente se observada uma mesma tensão-deformação, ou seja, uma mesma carga e reposta. Esse comportamento pode ser conhecido como uma função do tempo equivalente, no qual um fator de deslocamento tempo-temperatura (*time-temperature shift factor*, a_T), determinado experimentalmente, pode ser

utilizado para transladar horizontalmente os pontos experimentais para a temperatura de referência desejada (T_{REF}). O fator a_T representa o tempo de deslocamento relacionado com a mudança de temperatura (Gross 1968; Ferry 1980; Roylance, 2001; Di Benedetto *et al.*, 2008; Babadopulos, 2017).

Quando o comportamento do material respeita o PSTT, esse é considerado um material termorreologicamente simples, sendo possível a sobreposição dos dados experimentais de viscoelasticidade obtidos a diferentes temperaturas e frequências em uma única curva (Gross 1968; Ferry 1980; Coutinho, 2012; Gouveia, 2016).

É possível obter os mesmos valores do fator de deslocamento tempo-temperatura para diferentes misturas asfálticas produzidas com o mesmo ligante. Portanto, a construção de uma única curva para a observação do comportamento viscoelástico de um ligante implica na construção simultânea da mesma curva para a mistura asfáltica produzida com este ligante (Di Benedetto *et al.*, 2004; Delaporte *et al.*, 2009; Graziani *et al.*, 2016).

2.2.3 *Curvas de Caracterização Viscoelástica Linear*

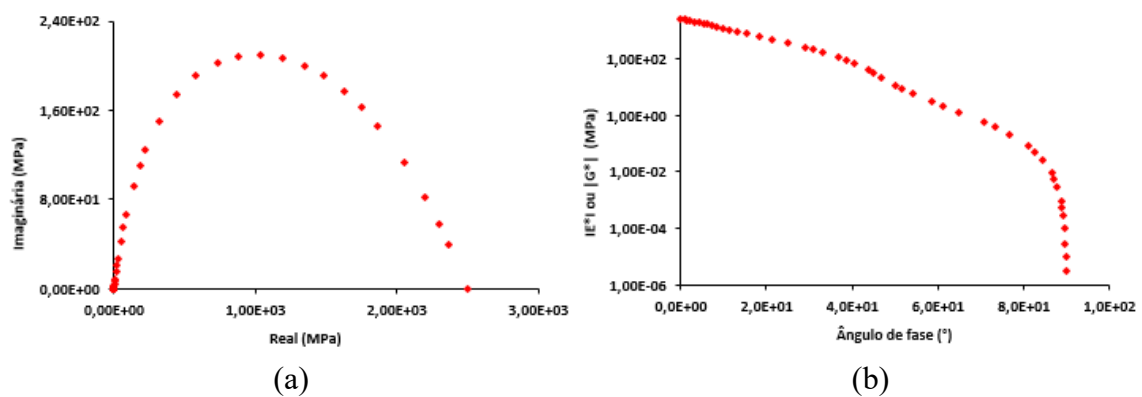
De acordo com Babadopulos (2017) os resultados do ensaio de módulo, podem ser analisados em diferentes tipos de curvas, dentre eles estão: Cole-Cole, Espaço de Black, Isotérmicas, Isócronas e Curvas Mestras. No Anexo A é apresentado o espectro de influência das constantes do modelo *2S2PID* nas curvas de caracterização viscoelástica linear.

- Cole-Cole: consiste na representação da parte viscosa do material em função da parte elástica, ou seja, se refere a parte imaginária do módulo complexo em função da parte real, conforme Figura 8(a). Essa representação é muito útil na análise do comportamento dos materiais asfálticos em baixas temperaturas e/ou altas frequências, sendo muito utilizada para a verificação do PSTT para o comportamento viscoelástico. Porém, não é muito preciso para valores de módulo baixos, então para a calibração com os valores de módulo baixos é utilizada a representação do Espaço de Black.
- Espaço de Black: consiste na representação do módulo complexo ($|E^*|$ ou $|G^*|$) em função do ângulo de fase (Φ ou φ), conforme apresentado na Figura 8(b), sendo muito útil para a análise do comportamento dos materiais asfálticos com menores ângulos de fase em altas temperaturas. Além de possibilitar através da correlação linear entre o módulo e o ângulo, o cálculo da porção elástica e

viscosa do módulo. Assim como a representação Cole-Cole, também pode ser usado para a verificação do PSTT para o comportamento viscoelástico.

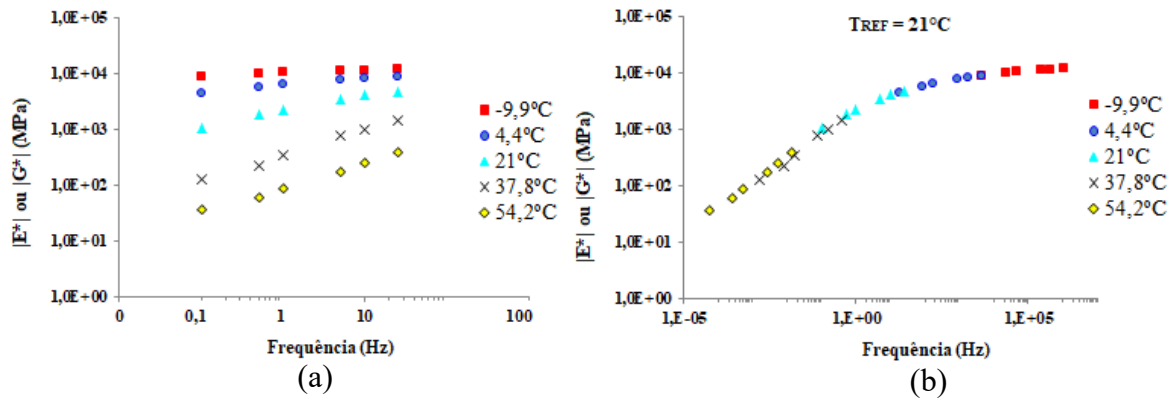
- Isotermas: consiste na representação do módulo complexo ($|E^*|$ ou $|G^*|$) em função da frequência, em diferentes curvas a temperatura fixa, como mostrado na Figura 9(a).
- Curva Mestre: consiste da representação do módulo complexo ($|E^*|$ ou $|G^*|$) em função de uma faixa mais ampla de frequência (conhecidas como frequências equivalentes ou frequências reduzidas), para uma temperatura de referência, após a aplicação do PSTT. Com a escolha de uma temperatura de referência (T_{REF}) e a aplicação de fatores de deslocamento em relação a ela, é possível obter uma curva suave e contínua do módulo em função da frequência, conforme Figura 9(b), em consequência da aplicação do PSTT. Em virtude da limitação do equipamento de ensaio e do tempo requerido para realização de ensaios a baixíssimas frequências, não é possível realizar essa varredura tão ampla de frequência, de maneira que a aplicação do PSTT nas isotermas para a construção da Curva Mestre se mostra como uma poderosa ferramenta de análise do comportamento do material viscoelástico.

Figura 8 – Representação do modelo através das curvas: (a) Cole-Cole e (b) Espaço de Black



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Representação do modelo através das curvas: (a) Isotermas e (b) Curva Mestre



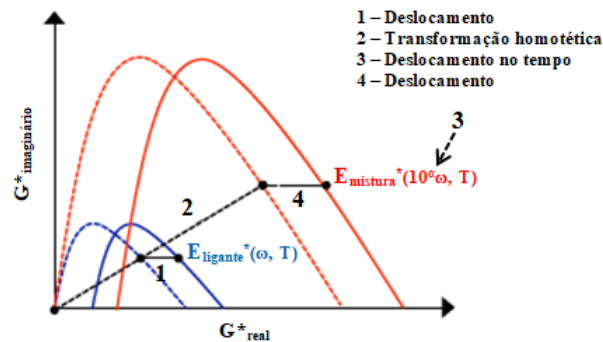
Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.4 Transformação SHStS

O comportamento viscoelástico da mistura asfáltica está intimamente ligado ao comportamento viscoelástico do ligante utilizado (Di Benedetto *et al.*, 2004). A partir das curvas de caracterização VEL do ligante é possível obter as propriedades VEL de qualquer mistura asfáltica na qual se utiliza este ligante (Di Benedetto *et al.*, 2004; Pouget *et al.*, 2012).

O método de transformação conhecido como *SHStS* (*Shift-Homothety-Shift in time Shift*) propõe prever o comportamento de misturas asfálticas a partir do ligante, sem ter a dependência de nenhum modelo reológico. Segundo Mangiafico (2014), também é possível obter o comportamento reverso do ligante a partir da mistura, realizando o problema inverso.

A Figura 10 ilustra a aplicação do método e as quatro transformações necessárias para se obter as propriedades da mistura a partir das propriedades do ligante na representação Cole-Cole. Este método é basicamente uma transformação gráfica aplicada na curva Cole-Cole, em que são aplicados dois fatores de deslocamento, um negativo e outro positivo, um fator de escala (homotético) e um fator de deslocamento no tempo, onde esta transformação é evidenciada nas curvas dependentes da frequência (curvas mestras do módulo e do ângulo de fase). Pode-se obter o módulo da mistura a partir dos dados do ligante através da Equação 4.

Figura 10 – Representação da transformação gráfica do *SHStS*

Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

$$E^*_{mistura}(\omega, T) = E_{\infty mistura} + \left[G^*_{ligante}(10^{\alpha}\omega, T) - G_{\infty ligante} \right] \frac{E_{0 mistura} - E_{\infty mistura}}{G_{0 ligante} - G_{\infty ligante}} \quad (4)$$

Em que: $E^*_{mistura}(\omega, T)$: módulo complexo da mistura na frequência ω e temperatura T ;

$E_{0 mistura}$ e $G_{0 ligante}$: módulos da mistura e do asfalto quando a frequência $\omega \rightarrow 0$;

$E_{\infty mistura}$ e $G_{\infty ligante}$: módulos quando a frequência $\omega \rightarrow \infty$;

10^{α} : transformação no tempo.

2.3 Dano por Fadiga

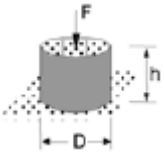
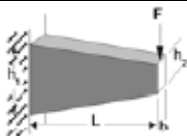
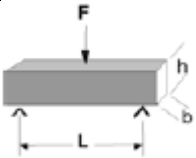
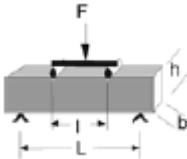
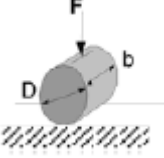
A vida de fadiga de um material asfáltico pode ser definida como o número de aplicações de carga necessário para que o material atinja a ruptura, considerando carregamento de nível inferior ao necessário para ruptura em um ciclo, ou seja, há uma diminuição da rigidez decorrente da repetição da deformação.

Em laboratório, diferentes tipos de carregamento e de geometria são utilizados nos ensaios para a determinação da vida de fadiga em misturas asfálticas. O Quadro 2 apresenta algumas diferenças existentes entre a geometria e o tipo de carregamento nos ensaios, sendo que dentre as geometrias estão: flexão simples, flexão com suporte, diametral, axial e de fratura; enquanto, dentre os tipos de carregamento estão: senoidal, *haversine*, pulso-descanso e ainda com força controlada ou deslocamento controlado, havendo uma grande diferença na realização desses ensaios e também entre os seus resultados.

A partir do Quadro 2 observa-se que somente no ensaio de fadiga uniaxial de tração-compressão direta é considerado a existência de um estado homogêneo de deformação, pois na seção transversal todos os pontos do material são teoricamente solicitados da mesma forma para

um material homogêneo (Di Benedetto *et al.*, 2004). Nos demais ensaios, a tensão e a deformação na amostra não são espacialmente constantes. Observa-se que um material é considerado homogêneo para fins de análise mecânica quando as maiores heterogeneidades são de tamanho cerca de cinco vezes inferior à menor dimensão do volume material analisado, porém esse valor pode variar às vezes de três a dez vezes, a depender da aplicação (Lemaitre e Chaboche, 1990). O estado homogêneo no ensaio facilita a interpretação dos resultados e evita erros ligados às hipóteses simplificadoras necessárias para análise de ensaios não homogêneos para converter forças e deslocamentos em tensões e deformações. Por exemplo, o fato de o material se danificar durante o ensaio de fadiga produz heterogeneidade de rigidez no volume material, de maneira que as hipóteses utilizadas na análise de ensaios não-homogêneos são invalidadas, não devendo ser calculadas as tensões e as deformações utilizando as mesmas equações classicamente utilizadas.

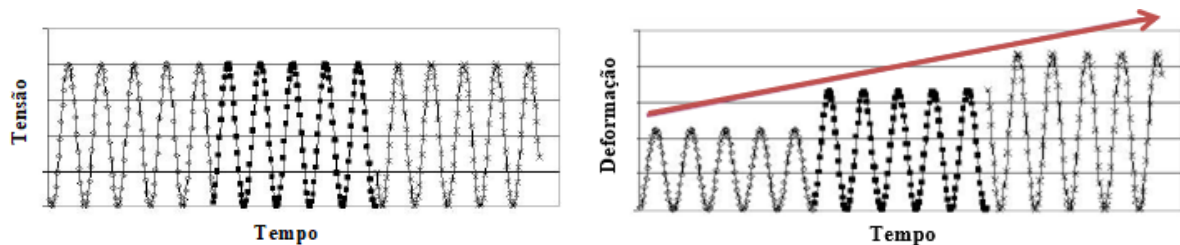
Quadro 2 – Características dos ensaios à fadiga em misturas asfálticas

Geometria da amostra	Tipo de carregamento
	Tensão – Compressão Homogêneo
	Flexão em dois pontos Não homogêneo
	Flexão em três pontos Não homogêneo
	Flexão em quatro pontos Não homogêneo
	Tração indireta Não homogêneo

Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2004).

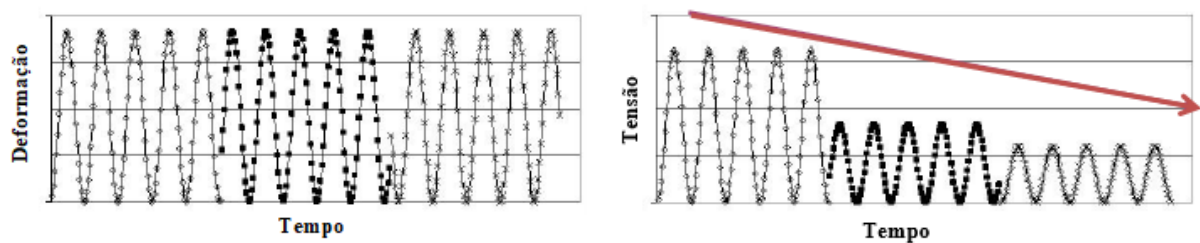
Para a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas os ensaios podem ser realizados a tensão controlada, com exemplo representado na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, ou a deformação controlada, na Figura 12. No ensaio à tensão controlada (TC), após a aparição da fissura, o material enfraquece e as cargas seguintes acabam por provocar uma ruptura rápida na mistura asfáltica; enquanto que no ensaio à deformação controlada (DC), o prolongamento das fissuras ocorre de maneira mais gradual, pois, a presença da fissura no material não implica necessariamente em um aumento de tensões nos pontos onde não há as fissuras.

Figura 11 – Representação gráfica do ensaio de fadiga à tensão controlada



Fonte: Adaptado de Colpo (2014).

Figura 12 – Representação gráfica do ensaio de fadiga à deformação controlada



Fonte: Adaptado de Colpo (2014).

Durante o ensaio de fadiga com aplicação de carga cíclica nos materiais asfálticos são observadas algumas fases distintas no material: fase I, fase II e fase III (Di Benedetto *et al.*, 1996; Di Benedetto *et al.*, 2004; Tapsoba *et al.*, 2015; Babadopulos, 2017).

- Fase I: ocorre uma rápida diminuição do módulo, além de um aumento do ângulo de fase e da temperatura;
- Fase II: continua ocorrendo uma diminuição do módulo ao longo dos ciclos aplicados e um aumento do ângulo de fase, porém menos que durante a Fase I. Considera-se que nessa fase a temperatura para de aumentar e começa a ocorrer as microfissuras no material;

- Fase III: há um aumento das microfissuras que resulta no aparecimento das macrofissuras. Quando o material entra na fase III é considerado que esse sofreu falha por fadiga.

2.3.1 *Ensaio de Fadiga com Placas Paralelas*

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*DSR*) com a geometria de placas paralelas tem sido amplamente utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico, inclusive na caracterização do dano por fadiga nos ligantes de ligantes, o qual se utiliza o teste de varredura de tempo, conhecido como *Time Sweep – TS* (Bahia *et al.*, 2001; Hintz e Bahia, 2013; Safaei *et al.*, 2016; Underwood, 2016; Shan *et al.*, 2017; Apostolidis *et al.*, 2018; Safaei e Castorena, 2018).

A geometria de placas paralelas consiste na aderência de uma amostra cilíndrica de ligante asfáltico entre duas placas paralelas, como mostrado na Figura 13. O *TS* é realizado com carga senoidal, onde o torque ou a amplitude de deslocamento são constantes.

Figura 13 – Geometria de placas paralelas



Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.2 *Ensaio de Fadiga Uniaxial de Tração-Compressão*

Nos ensaios uniaxiais em CPs cilíndricos, com montagem representada na Figura 14, pode-se considerar a existência de um estado homogêneo de deformação, pois se assume que em uma seção transversal, todos os pontos do material são solicitados da mesma forma (Di Benedetto *et al.*, 2004).

Figura 14 – Representação de um CP no ensaio uniaxial por tração-compressão direta



Fonte: Elaborado pela autora.

O estado homogêneo no ensaio facilita a interpretação dos resultados. Quando se considera que as amostras são homogêneas e que as hipóteses simplificadoras estabelecidas são respeitadas, as mudanças de temperatura ao longo da amostra tornam-se menores a depender do volume do material e da distribuição de deformações.

A partir do ensaio de fadiga pode-se obter a relação do dano médio com os parâmetros de rigidez (E^*). Sendo o dano médio a relação entre o módulo dinâmico da amostra submetida ao ensaio de fadiga, com o módulo dinâmico das amostras utilizadas na caracterização viscoelástica linear. Essa relação se dá em virtude da aplicação da teoria da elasticidade e a partir da curva mestra do material, onde se obtém os parâmetros de rigidez conforme a temperatura e a frequência determinadas. É também possível determinar a vida de fadiga a partir da amplitude de deformação a uma determinada temperatura e frequência durante o ensaio. Para melhor entendimento desses procedimentos de representação do ensaio de fadiga a partir do número de ciclos, nos próximos itens constam explicações a respeito.

2.3.3 *Períodos de Repouso no Ensaio de Fadiga*

Diversos fatores influenciam diretamente na vida de fadiga de uma mistura asfáltica. O tipo de carregamento e a escolha adequada do ensaio a ser utilizado são fatores importantes para esta definição.

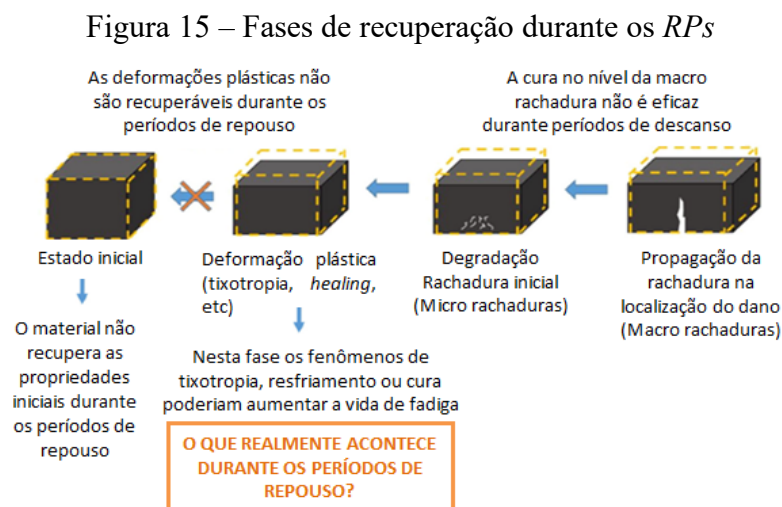
Os materiais asfálticos em pavimentos estão sujeitos a *RPs* entre as solicitações de carga de eixos dos veículos e entre a passagem dos veículos. A introdução e o efeito dos *RPs* nos ensaios de vida de fadiga foram investigados por uma série de pesquisadores. Kim *et al.* (2002) estudaram o efeito dos *RPs* nos ensaios de fadiga e os diversos critérios de ruptura à fadiga em amostras de areia-asfalto nos quais foram usados os ensaios à torção e os conceitos

da mecânica do dano contínuo (MDC). Verificou-se que os *RP*s para este ensaio influenciam no resultado final do ensaio de fadiga (N_f) das misturas, sendo N_f o número de ciclos até a falha.

Os pavimentos, estão sujeitos a *RP*s entre as solicitações de carga de eixos dos veículos e logo após, sendo que o carregamento aplicado é interrompido até a passagem de um novo veículo. Alguns pesquisadores avaliaram a capacidade de recuperação dos materiais asfálticos, como o ligante, através da aplicação de *RP*s na realização dos ensaios cíclicos em laboratório (Daniel e Kim, 2001; Mangiafico, 2014; Moreno-Navarro *et al.*, 2015; Ayar *et al.*, 2016; Babadopulos, 2017; Lv *et al.*, 2017; Moreno-Navarro *et al.*, 2017).

Daniel e Kim (2001) consideram que durante os *RP*s ocorre uma recuperação, ou seja, uma auto regeneração (*zling*). O *healing* é considerado como um processo que neutraliza o crescimento de trincas de fadiga durante *RP*s e temperaturas elevadas, levando a uma extensão na vida de fadiga. Deve-se observar, porém, que é complexa a diferenciação entre esse fenômeno e fenômenos reversíveis que ocorrem ao longo de ensaios cíclicos (Babadopulos, 2017).

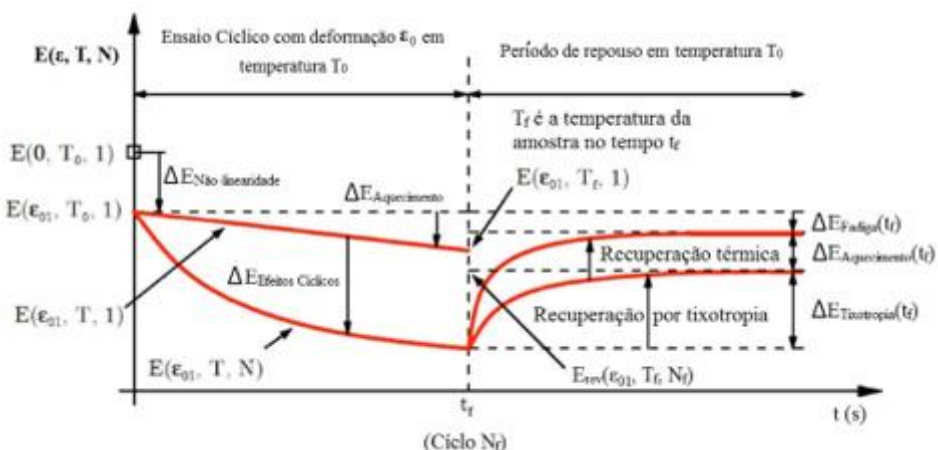
Durante os ensaios cíclicos de fadiga, ocorrem diferentes fenômenos físicos que provocam alteração de rigidez. Eles podem ser divididos em fenômenos reversíveis (como a não-linearidade, o auto-aquecimento e a tixotropia) e o fenômeno propriamente irreversível, que é o dano à fadiga. Rigorosamente, deveria ser considerado *healing* apenas o que ocorre para reverter os fenômenos irreversíveis, visto que este é o termo utilizado para a auto-cicatrização do material asfáltico (Di Benedetto *et al.*, 2011; Babadopulos, 2017). A Figura 15 apresenta um resumo das fases de recuperação de danos (reversíveis e irreversíveis) que ocorrem nos materiais asfálticos durante os *RP*s.



Fonte: Adaptado de Ayar *et al.* (2018).

De acordo com Babadopulos (2017), nos ensaios de fadiga realizados com descanso, o material estará sujeito a um histórico de carregamento diferente. Em decorrência de diferença entre os históricos de carregamento, a mistura não se encontrará na mesma temperatura durante a realização do ensaio, provocando distorções nos resultados entre CPs de uma mesma mistura. O mesmo pode ser dito sobre a tixotropia, que altera o arranjo microestrutural do material. Em decorrência de o ligante ser suscetível a temperatura e haver uma grande dependência de outras propriedades quanto às mudanças na temperatura, pode haver resultados distintos entre os ensaios com descanso e sem a consideração do descanso, sem que haja efeito de cicatrização. A Figura 16 apresenta esquematicamente as mudanças esperadas que ocorrem no módulo do material durante os períodos de carregamento e de repouso.

Figura 16 – Representação esquemática das contribuições dos diferentes fenômenos no módulo complexo durante o ensaio de carga cíclica com repouso



Fonte: Adaptado de Nguyen (2011).

Apesar de haver uma série de estudos nos quais se introduziram *PRs* no ensaio de vida de fadiga, não há uma padronização na geometria da amostra, temperaturas, frequências, repetições, ciclos e principalmente quais os tempos de repouso indicados a serem utilizados no ensaio. A Tabela 1 apresenta um resumo das características utilizadas nos ensaios de fadiga com *PRs* realizados por alguns autores.

Tabela 1 – Características gerais utilizadas nos testes com repouso

Autor	Temperatura (C°)	Frequência (Hz)	Repouso (min)	Repetição	Ciclos	Escala
Daniel e Kim (2001)	20	2	240	3 à 4	3.000	Mistura asfáltica
	60		360		10.000	
Grant (2001)	10	-	3	Até a ruptura	1.000	Mistura asfáltica
			6			
			10			
			30			
15	60					
	2	1	14 ou 46	300	Mistura asfáltica	
Si <i>et al.</i> (2002a)	5					
	15					
	20					
	25					
	30					
35	1000					
40						
Abo-Qudais e Suleiman (2005)	0	-	60	-	Até a rigidez reduzir a 1/4 da inicial	Mistura asfáltica
	15		180			
	30		4.320			
	45		10.080			
	60		20.160			
Shen <i>et al.</i> (2010)	15	10	0,03	Até a ruptura	10	Ligante
	25		0,06			
			0,1			
Mangiafico (2014)	8	10	15	Até a ruptura	200	Ligante
	10		1.440		100.000	Mistura asfáltica com RAP
	12					
	14					
Babadopulos (2017)	11	10	240	5	10.000	Ligante
			840		20.000	Mastique
Ayar <i>et al.</i> (2018)	20	5	1	Até a ruptura	100	Mistura asfáltica
			5		400	
			10		800	

Fonte: Elaborado pela autora.

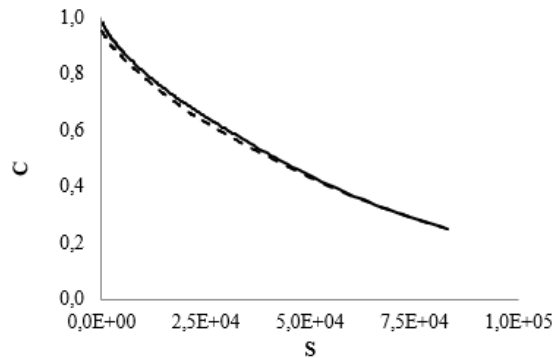
2.4 Mecânica do Dano Contínuo – MDC

Para modelar o fenômeno do dano no ensaio de fadiga, pode-se utilizar de abordagens como a MDC que tem como objetivo contabilizar a degradação interna que ocorre no material, levando fenômenos micromecânicos em conta através de variáveis homogeneizadas no volume material. Através da MDC o dano é visto como a perda da seção transversal resistente do material, levando a uma perda na rigidez devido a repetição da aplicação de carga. Diversos autores vêm utilizando essa abordagem da MDC para caracterizar o dano por fadiga nas misturas asfálticas (Daniel e Kim, 2002; Lundström e Ekblad, 2006; Babadopulos, 2014; Nascimento, 2014; Freire, 2015; Babadopulos, 2017; Zeiada *et al.*, 2018).

Uma abordagem da MDC utilizada comumente para caracterização do dano por fadiga de misturas asfálticas é o chamado *Viscoelastic Continuum Damage (VECD) model*, conhecido como Teoria do Dano em meio Contínuo Viscoelástico. Esse modelo possui alguns princípios para a modelagem do comportamento do material, dentre eles: o princípio da correspondência elástico-viscoelástica com base na pseudo-deformação (ϵ^R); a teoria do potencial de trabalho para modelagem de efeitos das microfissuras no comportamento constitutivo global; PSTT com dano crescente para incluir os efeitos de tempo e temperatura (Mello, 2008; Babadopulos, 2014; Nascimento, 2015).

Underwood *et al.* (2009) e Underwood *et al.* (2012) propuseram uma simplificação do modelo *VECD*, passando a ser denominado *Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD)* para o caso do carregamento cíclico. O *S-VECD* faz a simplificação transformando as equações do comportamento viscoelástico do material em equações similares às de comportamento elástico através da substituição da deformação pela pseudo-deformação (Freire, 2015). Para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas nos ensaios de tração-compressão direta usando o modelo, os resultados de ensaio têm como parâmetros a pseudo-rigidez (C) e o dano (S), representados na curva C vs S (Figura 17), que é considerada uma propriedade fundamental do material, útil na previsão da evolução da rigidez ao longo de ensaios de fadiga. Segundo Daniel e Kim (2002), a curva C vs S é conhecida como curva característica de dano da mistura asfáltica e independe do tipo de carregamento aplicado, cíclico ou monotônico, da frequência e da temperatura. Para a previsão da falha, o critério considerado é baseado em densidade de pseudo-energia de deformação (Sabouri e Kim, 2014).

Figura 17 – Exemplo de curvas C vs S , considerando ou não o efeito da temperatura medida na superfície dos CPs



Fonte: Elaborada pela autora.

O S - $VECD$ é baseada na teoria Potencial de Schapery (Schapery 1990; Park *et al.* 1996) em que se utiliza a pseudo-deformação a fim de simplificar a análise do dano em materiais viscoelásticos. A Lei de Potência e a Lei Exponencial são apresentadas nas Equações 5 e 6, onde os valores de C_{11} , C_{12} , a e b são coeficientes para melhor ajustar as curvas características de dano. Em virtude das possíveis variações que possam existir entre os CPs utilizados nos ensaios de módulo dinâmico a compressão ($|E^*|_{LVE}$) e de fadiga ($|E^*|_{\text{fingerprint}}$)

$$C = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (5)$$

$$C = e^{aS^b} \quad (6)$$

Nascimento (2016) formulou um conjunto de equações que, permite prever a vida de fadiga (N_f) de misturas asfálticas em função da deformação, da frequência, da parcela do ciclo em tração e da temperatura, conforme as Equações 7, 8, 9, 10, 11 e 12. O dano é determinado através da aplicação do modelo S - $VECD$ a partir da perda de energia dissipada do material devido à sua perda de rigidez durante o ensaio de vida de fadiga. Os dados do ensaio podem ser representados a partir do N_f e a amplitude de deformação, conforme Figura 18.

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \frac{C_{12}}{p}}} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{p(C_{11}C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} k_1}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\frac{C_{12}}{p}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (9)$$

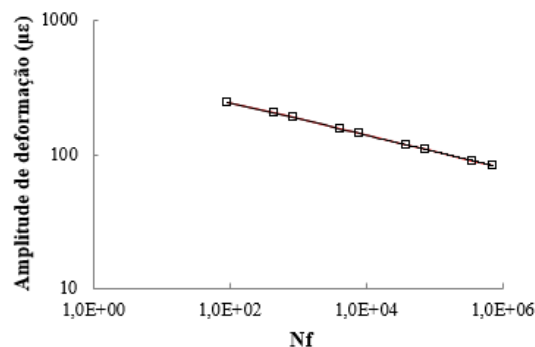
$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (10)$$

$$G^R = Y(N_f)^\Delta \quad (11)$$

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

Em que: N_f : número de ciclos até a falha;
 Y : coeficientes do critério de ruptura G_R vs N_f ;
 C_{11} e C_{12} : coeficientes da curva C vs S ;
 Δ : expoente da equação Y ;
 ε_{TA}^R : amplitude da pseudo-deformação;
 α : taxa de evolução do dano;
 k_1 : fator de forma do pulso de carga;
 f_R : frequência reduzida;
 β : parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (um valor usual é de -0,08, que na prática significa que ocorre compressão em 80% do ciclo);
 $\varepsilon_{0,pp}$: amplitude de deformação pico a pico;
 $|E^*|_{LVE}$: módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência;
 G^R : taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada por ciclo durante todo ensaio;
 $C(S)$: integridade do material;
 S : parâmetro de dano.

Figura 18 – Representação da vida de fadiga a partir do N_f e da amplitude de deformação



Fonte: Elaborada pela autora.

2.4.1 Critérios de Falha

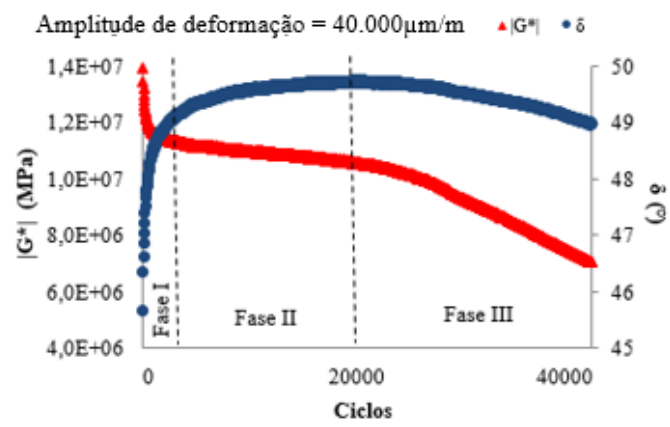
A determinação do momento em que ocorre a falha do material por fadiga, onde as microtrincas evoluem e se tornam macrotrincas, é algo bastante discutido na literatura (Hopman *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 2003; Sabouri e Kim, 2014; Wang *et al.*, 2015; Safaei *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016). Diversos critérios de falha por fadiga são reportados, frequentemente relacionando-se a evolução do módulo no ensaio com a falha por fadiga do material. O valor de 50% na diminuição do módulo complexo é utilizado na maioria das análises, porém esse método não considera outros fenômenos e as diversidades dos materiais, visto que diferentes materiais podem suportar diferentes acumulações de dano.

Alguns autores utilizam o ângulo de fase de pico como uma indicação de falha, porém, se a falha ocorrer entre os intervalos de medição da tensão, pode ocorrer a não visualização do ângulo de fase de pico. Outro critério de falha utilizado é a combinação da queda do valor do ângulo de fase com a energia de pseudo-deformação (G^R) como resultado de falha do material. Esse critério independe do modo de carregamento e é determinado ao longo de todo o histórico de carregamento, pois, nos carregamentos cíclicos, sempre que a amplitude máxima de tensão é atingida, a energia máxima de pseudo-deformação (W_{max}^R) absorvida pelo material é acumulada, conforme as Equações 13 e 14. Durante as fases I e II do ensaio de fadiga as medições de amplitude realizadas pelos extensômetros se aproximam da amplitude média de tensão, porém, quando começa a ocorrer a fase III essas medições podem divergir muito rápido, proporcionando assim um critério para a determinação da falha do material por fadiga. Acredita-se que a falha no material ocorre entre a fase II e a fase III, pois as macrotrincas só começam a aparecer após um certo dano acumulado no material. As fases que ocorrem durante o ensaio de fadiga estão representadas na Figura 19.

$$W_{max}^R = \frac{1}{2} \cdot C(S_n)(\epsilon_{TA}^R)^2 \quad (13)$$

$$G^R = \frac{W_{max}^R}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{(N_f)^2} \quad (14)$$

Figura 19 – Exemplo dos dados experimentais do ligante no ensaio de fadiga exemplificando as fases que ocorrem durante o ensaio



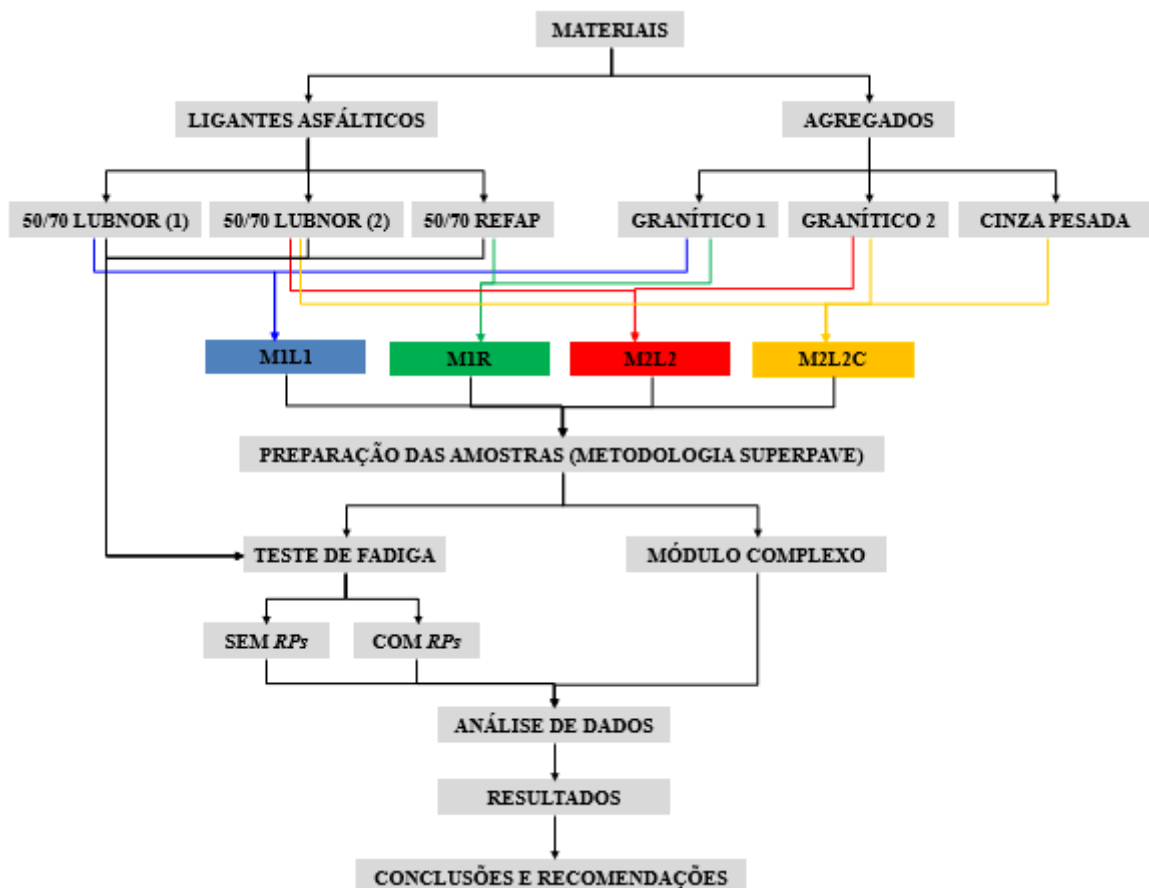
Fonte: Elaborada pela autora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Para facilitar o entendimento da abordagem da pesquisa, um fluxograma é apresentado na Figura 20. Foram investigadas quatro misturas, com três tipos de ligante, sendo dois ligantes puros oriundos da Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor) da Petrobras, porém de bateladas distintas e outro ligante puro oriundo da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) da Petrobras. Nos ligantes é realizado o ensaio de fadiga utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer – DSR*) e nas misturas asfálticas é usado o ensaio uniaxial de tração-compressão direta. A fim de acompanhar o aparecimento das trincas durante a realização do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas é medido o Módulo Complexo do material em cada ciclo. Além do ensaio de vida de fadiga, são executados métodos de caracterização como resistência à tração e módulo complexo.

Figura 20 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Para facilitar o entendimento dos resultados aqui apresentados decidiu-se nomear os ligantes e as misturas:

- Ligante 1 (L1) é o 50/70 proveniente da Petrobras/LUBNOR 1ª batelada;
- Ligante 2 (L2) é o 50/70 proveniente da Petrobras/LUBNOR 2ª batelada;
- Ligante 3 (R) é o ligante 50/70 proveniente da Petrobras/REFAP;
- Mistura M1L1 corresponde aquela produzida com o ligante L1 e o agregado granítico 1;
- Mistura M1R corresponde aquela produzida com o ligante R e o agregado granítico 1;
- Mistura M2L2 corresponde aquela produzida com o ligante L2 e o agregado granítico 2;
- Mistura M2L2C corresponde aquela produzida com o ligante L2, 5% de cinza pesada e o agregado granítico 2.

3.2 Agregado

Com a evolução da tecnologia e com o desenvolvimento sustentável sendo um dos princípios mais exigidos hoje na engenharia e na própria política de desenvolvimento global, comumente buscam-se soluções técnicas em diversas áreas de atuação que abranjam, ao mesmo tempo, eficiência e a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, observa-se o crescente esforço na utilização de materiais reciclados, inclusive na pavimentação, dentre eles a cinza proveniente da queima de carvão mineral.

A cinza é um rejeito da queima do carvão mineral para a geração de energia termelétrica, sendo um resíduo industrial e, portanto, sujeito a condições e normas específicas para sua disposição no meio ambiente. De acordo com Mallmann (1996), a cinza pesada tem a sua maior parte descartada no meio ambiente e de formas muitas vezes inadequadas. O reaproveitamento das cinzas contribui para a diminuição da poluição, minimiza a problemática com o destino final do resíduo e contribui para a diminuição do custo final do produto (a energia), visto que a remoção das cinzas para aterros é um custo oneroso para a indústria. Portanto, optou-se por utilizar a cinza pesada na composição de uma das quatro misturas da presente pesquisa.

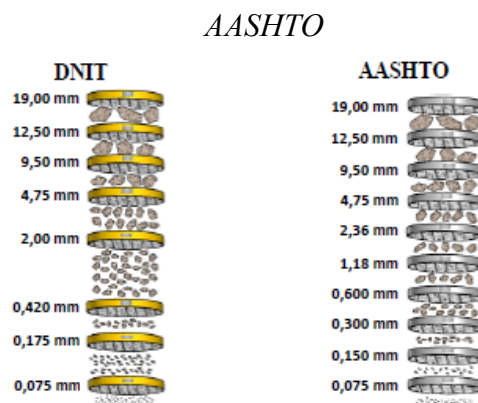
Os agregados minerais utilizados na pesquisa são provenientes das pedreiras Ponta da Serra Mineração LTDA (agregado granítico 1) e Itatiba LTDA (agregado granítico 2),

localizadas no Estado do Ceará. As coletas foram realizadas em três pilhas distintas: pilha 1 de agregado 1/2", pilha 2 de agregado 3/8" e pilha 3 de pó de pedra. Após as coletas os materiais foram secos em temperatura ambiente e antes da realização dos ensaios e das dosagens foram secos em estufa.

Em virtude do objetivo que é o estudo da relação existente entre as escalas de ligante e mistura asfáltica, decidiu-se padronizar as características volumétricas das misturas asfálticas o tanto quanto possível. Devido ao controle desejado das características volumétricas decidiu-se utilizar a série de peneiras da *AASHTO*, pois esta permite a obtenção de menor amplitude no tamanho dos grãos entre as peneiras quando comparada a série de peneiras do DNIT, conforme ilustrado na Figura 21.

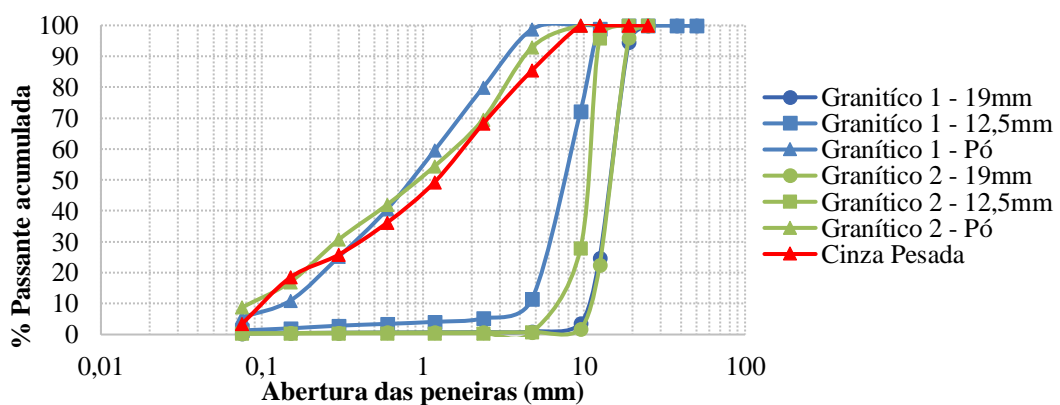
A análise granulométrica foi realizada nas três pilhas dos agregados coletados, conforme Figura 22. Posteriormente, foram realizados os demais ensaios de caracterização física e mecânica dos agregados, sendo os resultados dispostos na Tabela 2.

Figura 21 – Comparação entre as aberturas da série de peneiras utilizadas pelo DNIT e



Fonte: Adaptado de Lucas Júnior (2018).

Figura 22 – Curva granulométricas dos agregados por pilhas



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 2 – Caracterização física dos agregados

Ensaio	Abrasão Los Angeles (%)	Absorção (%)	Adesividade do agregado ao ligante	Densidade real do fíler	Densidade do agregado graúdo
Normas	DNER-ME 035/98	DNER-ME 081/98	NBR 12583/17	DNER-ME 084/94	DNER-ME 081/98
Agregado Granítico 1	19mm	22	0,5	-	2,63
	12,5mm	39,5	0,8	-	2,60
	Pó	-	0,9	-	-
Agregado Granítico 2	19mm	31,3	0,7	-	2,61
	12,5mm	39,7	0,8	-	2,58
	Pó	-	0,9	-	2,66

Fonte: Elaborada pela autora.

Como observado na Tabela 2, a adesividade dos agregados aos ligantes asfálticos utilizados foi insatisfatória em todos os casos. Esse resultado é comumente obtido nos materiais utilizados na pavimentação na Região Metropolitana de Fortaleza, principalmente os de origem granítica. Geralmente, esses agregados possuem má adesividade com o ligante asfáltico puro e necessitam da utilização de aditivos melhoradores de adesividade (Cavalcanti e Parahyba, 2012; Lucas Júnior, 2018). Afim de reduzir todas as variáveis que possam interferir na análise principal da pesquisa, optou-se por não utilizar nenhum aditivo nas misturas asfálticas, mesmo que essas apresentem adesividade insatisfatória.

3.3 Caracterização Básica dos Ligantes

Os ligantes utilizados são: 50/70 processado na LUBNOR, foram coletados duas bateladas diferentes, denominados de ligantes L1 e L2; e o 50/70 processado na REFAP, denominado ligante R. Os resultados da caracterização dos ligantes encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização dos ligantes

Propriedades	L1	L2	R	Limites CAP 50/70	Limites CAP Modificado
Penetração a 25°C (dmm)	46	51	56	50 a 70	40 a 70
Ponto de amolecimento (°C)	49	47	49,5	Mín. 46	Mín. 60
Viscosidade Brookfield 135°C – sp21 20rpm (cP)	395	388	358	Mín. 274	Máx. 3000
Faixa de temperatura de usinagem (°C)	160 - 166	150-155	151 - 156	Máx. 177	Máx. 177
Faixa de temperatura de compactação (°C)	148 - 152	140-145	142 - 146	Máx. 177	Máx. 177

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4 Dosagem das Misturas Asfálticas

3.4.1 Procedimento

As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia *Superpave*, onde se fixa o volume de vazios desejado (V_v de 4%) e se estima o teor de projeto de CAP para um dado número de ciclos de compactação giratória.

As temperaturas de usinagem (T_U) e de compactação (T_C) utilizadas para a mistura M1L1 foram respectivamente 159°C e 144°C, para a mistura M1R foram 153°C e 142°C e para as misturas M2L2 e M2L2C foram 153°C e 143°C. Foram usados inicialmente os teores de CAP de 3,5%; 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5% em relação à massa total das misturas.

A seguir é descrito o passo a passo realizado durante a dosagem. Esses procedimentos foram realizados para todos os teores de CAP utilizados em cada mistura. A massa de ligante e de agregados é aquecida e logo após homogeneizada no misturador mecânico até o recobrimento total dos agregados pelo ligante. Para cada teor de CAP é necessário homogeneizar as misturas para a realização da densidade aparente medida (G_{mb}) e para a determinação da densidade máxima medida (G_{mm}).

As massas da mistura para a realização da G_{mb} são levadas a estufa, à temperatura de compactação determinada, por 2h, a fim de simular o envelhecimento que ocorre no material durante a usinagem e o transporte que ocorrem em campo. Após esse período, as misturas são compactadas através do Compactador Giratório *Superpave*, obtendo-se três CPs para cada teor

de CAP. Para a determinação da G_{mb} os CPs são pesados em três condições: (i) seca, (ii) submersa após 5 min e (iii) saturada, sendo que pela Equação 15 determina-se a G_{mb} .

$$G_{mb} = \frac{M_{seca}}{M_{saturada} - M_{imersa}} \cdot 0,9971 \quad (15)$$

Em que: M_{seca} : massa do CP seco (g);

$M_{saturada}$: massa do CP em condição saturada (g);

M_{imersa} : massa do CP em condição imersa (g).

As massas de mistura para a realização da G_{mm} também são levadas a estufa, à temperatura de compactação determinada, por 2h para simular o envelhecimento. Após este período, as bacias são retiradas e resfriadas. Durante o período em que a massa está em resfriamento, é necessário que ela seja revolvida constantemente evitando a aglutinação. Após o resfriamento, a massa é colocada dentro de um cilindro e a sua massa seca é medida, sendo logo após colocada em uma bomba de vácuo durante 15 min, a fim de retirar os vazios de ar existentes. Decorridos os 15 min a massa é imersa em água durante 10 min e é pesada na condição submersa. A determinação da G_{mm} é realizada através da Equação 16.

$$G_{mm} = \frac{MM_{seca}}{MM_{seca} + MM_{cilindro/imerso} - MM_{imersa}} \cdot 0,9971 \quad (16)$$

Em que: MM_{seca} : massa da mistura seca (g);

$MM_{cilindro/imerso}$: massa do cilindro imerso (g);

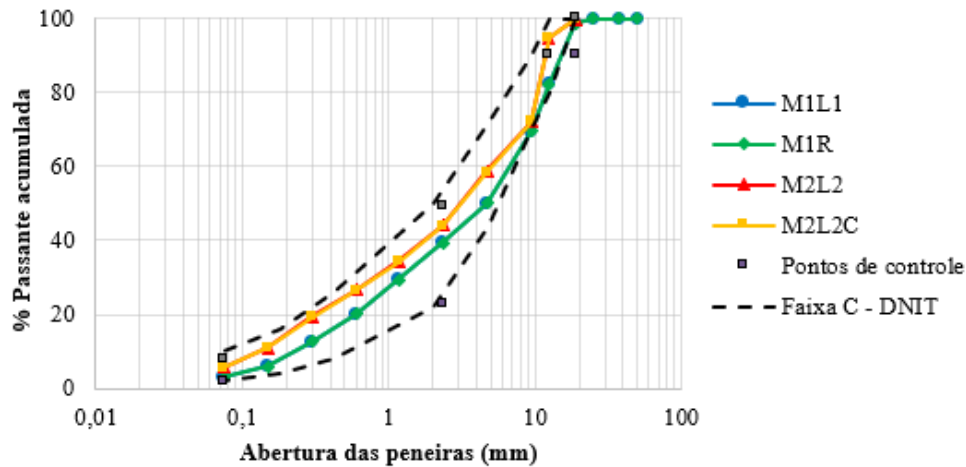
MM_{imersa} : massa da mistura + cilindro em condição imersa (g).

A partir da G_{mb} e da G_{mm} de cada teor é possível calcular todos os parâmetros volumétricos necessários para que se obtenha o teor de projeto que produzirá CPs com $V_v = 4,0\% \pm 0,5\%$. O teor de CAP na mistura será o correspondente ao $V_v = 4,0\%$ e onde a mistura se encontre dentro dos parâmetros estabelecidos na metodologia da dosagem utilizada, como por exemplo o valor da relação betume/vazios (RBV) esteja entre 65 e 75.

3.4.2 Enquadramento das curvas granulométricas e parâmetros volumétricos

As curvas granulométricas projetadas para as misturas possuem tamanho nominal (TNM) de 19mm, encaixando-se entre os limites da Faixa C do DNIT para misturas asfálticas, e dentro dos pontos de controle determinados pela metodologia *Superpave* (Figura 23).

Figura 23 – Curva granulométrica das misturas



Fonte: Elaborada pela autora.

Após a determinação do teor de CAP das misturas com a realização da dosagem, foi possível determinar a G_{mb} e a G_{mm} das misturas, bem como o V_v e demais parâmetros, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros volumétricos

	M1L1	M1R	M2L2	M2L2C	Limites
% CAP	4,2	4,2	4,8	5,3	Mín. 4
V_v (%)	4,07	4,02	5,00	4,20	3 - 5
RBV (%)	70,4	70,6	67,3	73,9	65 - 75
G_{mb}	2,370	2,359	2,298	2,307	-
G_{mm}	2,467	2,458	2,460	2,408	-

Fonte: Elaborada pela autora.

3.5 Processamento Digital de Imagem (PDI)

O Processamento Digital de Imagem (PDI) se estabeleceu como uma ferramenta para análise das propriedades de forma de agregados e também para análise da estrutura interna de misturas asfálticas. O *Aggregate Image Measurement System (AIMS)* é um sistema de PDI, com mecanismo de aquisição de imagens utilizado para analisar as propriedades de forma, angularidade e textura dos agregados. Existem diversas vantagens na utilização desse sistema,

entre elas: capacidade de analisar 2D e 3D; sistema operacional automatizado e de fácil operação; análises baseadas em métodos científicos já reconhecidos; utilização da distribuição cumulativa de propriedades ao invés de índices baseados em médias aritméticas (Castelo Branco *et al.*, 2006).

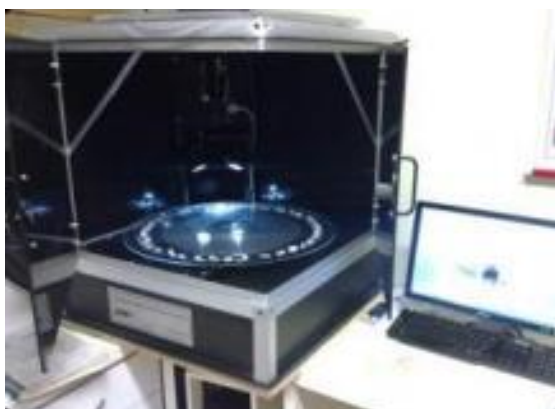
Atualmente existem três sistemas de classificação, Al-Rousan (2004), Ibiapina (2018) e Mahmoud *et al.* (2010). Como o foco do trabalho não é verificar as diferenças existentes entre esses sistemas, será usado o sistema de classificação de Ibiapina (2018). Essa escolha se deu em virtude do sistema utilizar o banco de dados com os agregados oriundos do Brasil, tornando-o mais adequado para as análises realizadas com os agregados brasileiros. A Tabela 5 contém os limites propostos pelo sistema de classificação Ibiapina (2018) para as propriedades dos agregados.

Tabela 5 – Valores limites para cada tipo de propriedade física segundo o sistema de classificação Ibiapina (2018)

Propriedades					
Forma 2D	< 4,0	4,0 - 11,0	11,0 - 15,5	> 15,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Angularidade	<1.260	1260 - 4.080	4.080 - 7.180	>7.180	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Esfericidade	> 0,5	0,5 - 0,7	0,7 - 0,9	> 0,9	-
	Achatado/Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	
Textura	< 260	260 - 440	440 - 660	660 - 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Adaptada de Ibiapina (2018).

Para a realização do ensaio os agregados foram posicionados na bandeja do equipamento, conforme Figura 24, sendo necessário realizar a análise para cada dimensão do agregado. O sistema possui bandejas que comportam agregados de dimensões entre 0,075 mm (peneira #200) e 25 mm (peneira 1”). O ensaio é iniciado quando a bandeja começa a girar no equipamento, onde ocorre a captura das imagens e as informações sobre as propriedades dos agregados são obtidas diretamente no computador.

Figura 24 – Equipamento *AIMS*

Fonte: Araújo (2016).

Os Anexos B e C apresentam os resumos dos relatórios obtidos dos agregados através da análise do AIMS. A partir do sistema de classificação de Ibiapina (2018), os agregados utilizados foram analisados segundo as suas propriedades e classificados conforme apresentados nas 6 e 7. A partir dos resultados, observa-se que os agregados possuem a mesma classificação em todas as propriedades analisadas (forma 2D, angularidade, esfericidade e textura superficial). Ambos os agregados são classificados como semicirculares, quanto a forma 2D; subarredondados, quanto a angularidade; de baixa esfericidade; e macios quanto a textura superficial.

Tabela 6 – Resultado da análise do agregado granítico 1

Tamanho das partículas (mm)	Forma 2D (Miúdos)	Angularidade (Miúdos e Graúdos)	Esfericidade (Graúdos)	Textura Superficial (Graúdos)
12,5 (1/2")		Subarredondado	Baixa	Macio
9,5 (3/8")		Subarredondado	Baixa	Macio
4,75 (#4)		Subarredondado	Baixa	Polido
2,36 (#8)	Semicircular	Subarredondado		
1,18 (#16)	Semicircular	Subangular		
0,60 (#30)	Semicircular	Subarredondado		
0,30 (#50)	Semicircular	Subarredondado		
0,150 (#100)	Semicircular	Subarredondado		
0,075 (#200)	Semicircular	Subarredondado		
Agregado Total	Semicircular	Subarredondado	Baixa	Macio

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 7 – Resultado da análise do agregado granítico 2

Tamanho das partículas (mm)	Forma 2D (Miúdos)	Angularidade (Miúdos e Graúdos)	Esfericidade (Graúdos)	Textura Superficial (Graúdos)
12,5 (1/2")		Subarredondado	Baixa	Macio
9,5 (3/8")		Subarredondado	Baixa	Macio
4,75 (#4)		Subarredondado	Baixa	Polido
2,36 (#8)	Semicircular	Subarredondado		
1,18 (#16)	Semicircular	Subangular		
0,60 (#30)	Semicircular	Subangular		
0,30 (#50)	Semicircular	Subarredondado		
0,150 (#100)	Semicircular	Subarredondado		
0,075 (#200)	Semicircular	Subarredondado		
Agregado Total	Semicircular	Subarredondado	Baixa	Macio

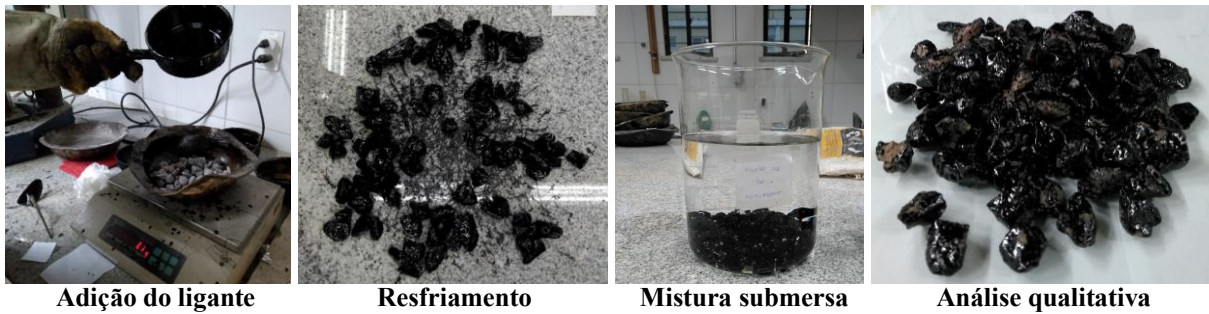
Fonte: Elaborada pela autora.

3.6 Adesividade ao Ligante Asfáltico

O ensaio de adesividade é normatizado pela NBR 12583 (2017). Na preparação das amostras utiliza-se os agregados passantes na peneira de 19 mm e retidos na peneira de 12,5 mm e então estes são lavados com água destilada e secos em estufa a 120°C por 2 h. Pesa-se em torno de 500 g de agregados e estes são levados à estufa e aquecidos a 100°C. Após atingirem essa temperatura, adiciona-se o ligante e então é realizada a homogeneização até o total recobrimento dos agregados pela película betuminosa. A mistura é colocada para resfriar em uma superfície lisa e constantemente deve ser revolvida para não aglutinar. Após seu resfriamento a mistura é colocada em um béquer e adiciona-se água destilada até que a mistura esteja completamente submersa na água. O béquer então é levado à estufa e condicionado a 40°C por 72 h, sendo subsequentemente realizada a análise qualitativa. Se o recobrimento for parcial a adesividade é considerada insatisfatória; e se o recobrimento for completo admite-se como satisfatória. O procedimento do ensaio é mostrado na Figura 25.

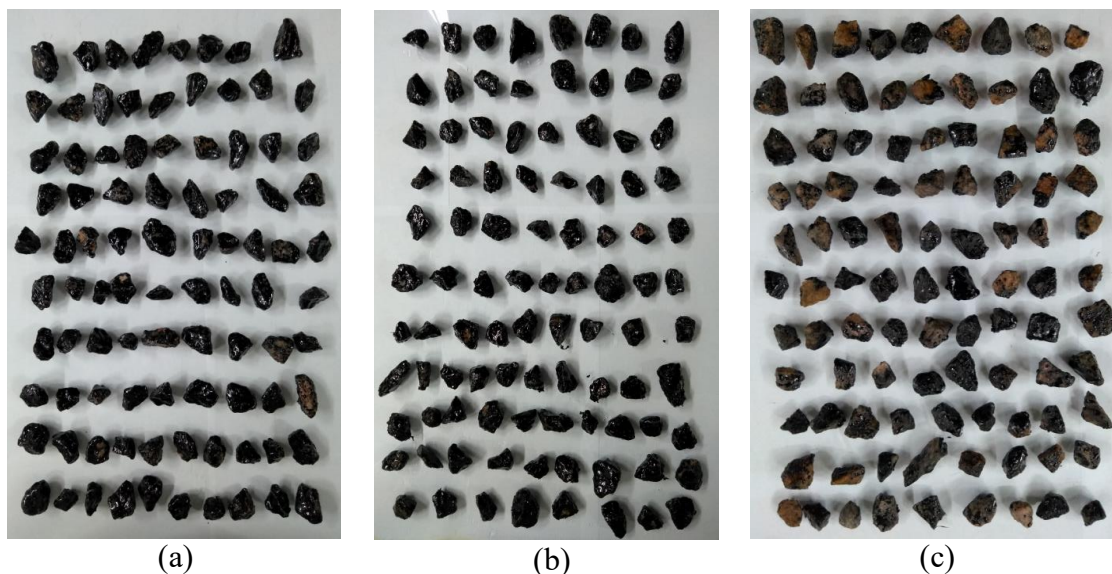
Conforme Figura 26, no ensaio de adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico, todos os agregados e ligantes asfálticos analisados apresentaram resultado insatisfatório, e, portanto, requerem a utilização de um melhorador de adesividade para a aplicação em campo. Em virtude de o objetivo do trabalho não ter seu foco em uma análise aprofundada sobre a adesividade, decidiu-se continuar as análises das misturas sem a adição de um melhorador de adesividade.

Figura 25 – Sequência do ensaio de adesividade



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26 – Resultado qualitativo do ensaio de adesividade: (a) M1L1; (b) M1R; (c) M2L2 e M2L2C



Fonte: Elaborada pela autora.

3.7 Percentual de Área de Agregado Recoberto por meio de PDI

Conforme mencionado, o ensaio de adesividade descrito pela NBR 12583 (2017) tem como resposta um resultado qualitativo. Lucas Júnior (2018) desenvolveu um método de processamento digital de imagem que possibilita a determinação do percentual de área recoberto pelo ligante (A_{PDI}) após o ensaio de adesividade (NBR 12583). É necessário realizar a aquisição das imagens dos agregados recobertos pelo ligante após o ensaio de adesividade. Estes são colocados sobre uma folha em branco em cima de uma superfície plana e a mistura é fotografada por uma câmera o mais paralelo possível ao plano em que se encontra, conforme Figura 27. As imagens são armazenadas e salvas em formato *Joint Photographic Experts Group* (.JPG).

O processamento é realizado a partir de imagens retiradas dos agregados recobertos pelo ligante e através do código desenvolvido, conforme o ANEXO D, no MATLAB R2017a, em que ocorre a realização das seguintes etapas: pré-processamento/realce; segmentação por limiarização, e; reconhecimento e classificação. As etapas descritas são realizadas automaticamente dentro do código desenvolvido quando este é processado no MATLAB. A partir desse método de processamento digital também é possível estimar a resistência à tração retida (RRT) das misturas, sendo RRT a relação entre a resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas (dano por umidade induzida). Esta estimativa é calculada através da Equação 17, proposta por Lucas Júnior (2018).

$$RRT = 1,002^{A_{PDI}} - 15,77 \quad (17)$$

Figura 27 – Imagem utilizada para o processamento digital



Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores de A_{PDI} das misturas analisadas estão dispostos na Tabela 8. De acordo com os resultados do processamento as misturas M2L2 e M2L2C apresentaram A_{PDI} abaixo de 50%, enquanto que a mistura M1L1 apresentou valor de 65,4% e M1R de 52,6%. Portanto, as misturas M2L2 e M2L2C possuem uma adesividade péssima para a utilização das mesmas em campo, sendo necessário a adição de algum melhorador de adesividade ou servindo apenas para análises laboratoriais.

Segundo Lucas Júnior (2018) são necessários cerca de 85% de A_{PDI} para se obter o valor mínimo de 70% de RRT. Para todas as misturas analisadas os valores de $RRT_{estimado}$ foram abaixo de 70%. Mesmo com os resultados abaixo do desejado, as misturas M1L1 e M1R que possuem o agregado 1 em sua composição, apresentaram resultados melhores do que as misturas com o agregado 2. Portanto, apesar de ambos os agregados apresentarem adesividade

insatisfatória com os CAPs utilizados, as misturas com o agregado 1 resultados melhores que as misturas com agregado 2.

Tabela 8 – Percentuais de áreas em PDI

Agregado	Agregado 1		Agregado 2	
	M1L1	M1R	M2L2	M2L2C
Limiar	0,200 e 0,800			
A _{PDI} 1	66,9%	70,4%	46,6%	
A _{PDI} 2	66,8%	65,3%	46,3%	
A _{PDI} 3	62,7%	68,9%	41,8%	
A _{PDI} média	65,4%	68,3%	44,9%	
Desvio Padrão	0,024	0,024	0,027	
RRT _{estimado}	49,8%	52,6%	29,2%	

Fonte: Elaborada pela autora.

3.8 Caracterização Mecânica Básica das Misturas Asfálticas

3.8.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração (RT) é um parâmetro para caracterizar as misturas asfálticas. Trata-se de um ensaio de ruptura onde o CP é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada de forma progressiva. O procedimento de ensaio é baseado na DNER ME 138/94, e consta em uma aplicação de carga gradual, à razão de 0,8mm/s \pm 0,1mm/s, até que se dê a ruptura do CP, segundo o plano diametral vertical. A temperatura de ensaio é de 25°C e a Tabela 9 apresenta os valores de RT para as misturas analisadas. Todos os valores obtidos são maiores que o mínimo exigido por norma (0,65MPa).

Tabela 9 – Resultados de RT das misturas asfálticas

Mistura	σ_R MÉDIO (MPa)
M1L1	1,20
M1R	1,42
M2L2	1,69
M2L2C	1,71

Fonte: Elaborada pela autora.

3.8.2 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência dos materiais que compõem o revestimento asfáltico dos pavimentos é um dos parâmetros mecânicos que podem ser utilizados para uma análise estrutural do sistema de camadas. Segundo a norma DNER – ME 133/94 o MR de misturas betuminosas o módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra e a deformação específica recuperável correspondente a tensão aplicada, em certa temperatura. Essa carga gera uma tensão de tração no plano transversal ao eixo de aplicação da carga dos eixos dos veículos. A temperatura de ensaio é de 25°C, com pulsos de duração de 0,1 aplicados a 1s, com repousos de 0,9s.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é utilizado para determinar a tensão de tração indireta máxima admissível (resistência a tração) e a carga compressiva correspondente a ser aplicada durante a determinação do MR. Os valores de MR obtidos para as misturas asfálticas analisadas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de MR das misturas asfálticas

Mistura	MR (MPa)
M1L1	4337
M1R	4502
M2L2	3643
M2L2C	3667

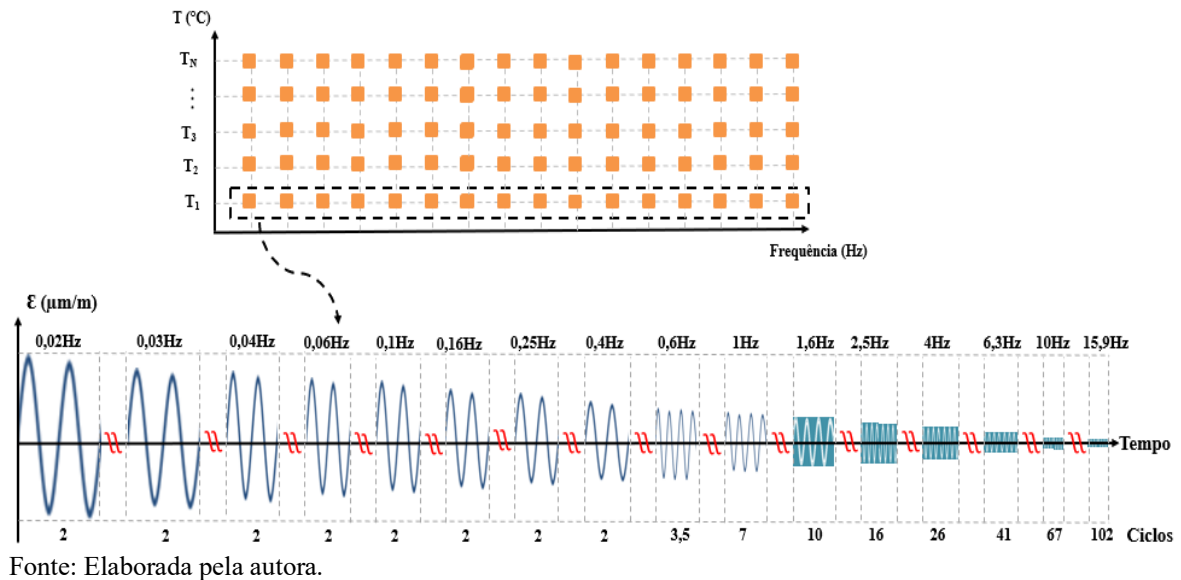
Fonte: Elaborada pela autora.

3.9 Caracterização Reológica do Ligante

Na caracterização reológica dos ligantes é utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer – DSR*) modelo TA AR 3000. De acordo com o procedimento estabelecido pela norma ASTM D 7175 (2015), é aplicada uma tensão controlada de 120Pa nas amostras de ligante, as quais são posicionadas entre duas placas paralelas, chamadas de *spindles*. O procedimento conhecido como *frequency sweep (FS)* prevê uma varredura de frequência e temperatura no ligante. O resumo do protocolo de ensaio pode ser observado conforme Figura 28. É necessário realizar dois procedimentos para cada ligante, um com varredura de temperaturas menores que 40°C (4 a 40°C), com incremento de 12°C a cada variação e outra de temperaturas maiores que 40°C (46 a 82°C), com incremento de 6°C a cada variação. Para as temperaturas menores que 40°C as amostras possuem dimensões de 2mm de espessura e 8 mm de diâmetro, enquanto que para as temperaturas maiores que 40°C as

amostras possuem 1mm de espessura e 25mm de diâmetro. A faixa de frequência utilizada é de 0,1 a 100rad/s (0,016 a 15,916Hz), totalizando 16 frequências analisadas. Os dados de saída do ensaio são o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (ϕ).

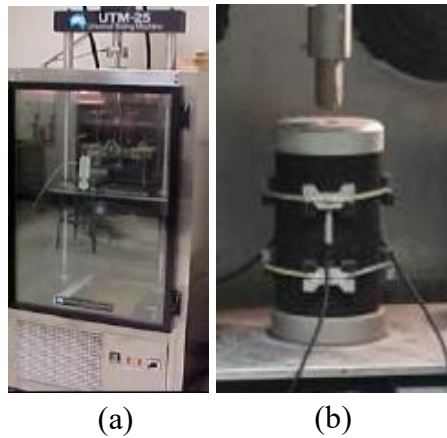
Figura 28 – Protocolo do ensaio de módulo dos ligantes asfálticos



3.10 Módulo Dinâmico por Compressão Axial

Para a determinação do Módulo Dinâmico das misturas asfálticas seguiu-se o procedimento da norma AASHTO T 342 (2011). Foi adotada a modelagem $2S2PID$, descrita em itens anteriores, para modelar os resultados do ensaio. Para a realização do ensaio, é necessário CPs com altura de $15,0\text{cm} \pm 0,25\text{cm}$ e diâmetro de $10,2\text{cm} \pm 0,2\text{cm}$, nos quais são colados seis *targets* com o auxílio de ar comprimido, onde são colocados sensores denominados de *Linear Variable Differential Transformers (LVDTs)* com o auxílio de presilhas, sendo espaçados angularmente a 120° , que vão medir as deformações durante o ensaio. Os CPs são então colocados no equipamento *Universal Testing Machine (UTM - 25)*, conforme Figura 29, para a realização do ensaio.

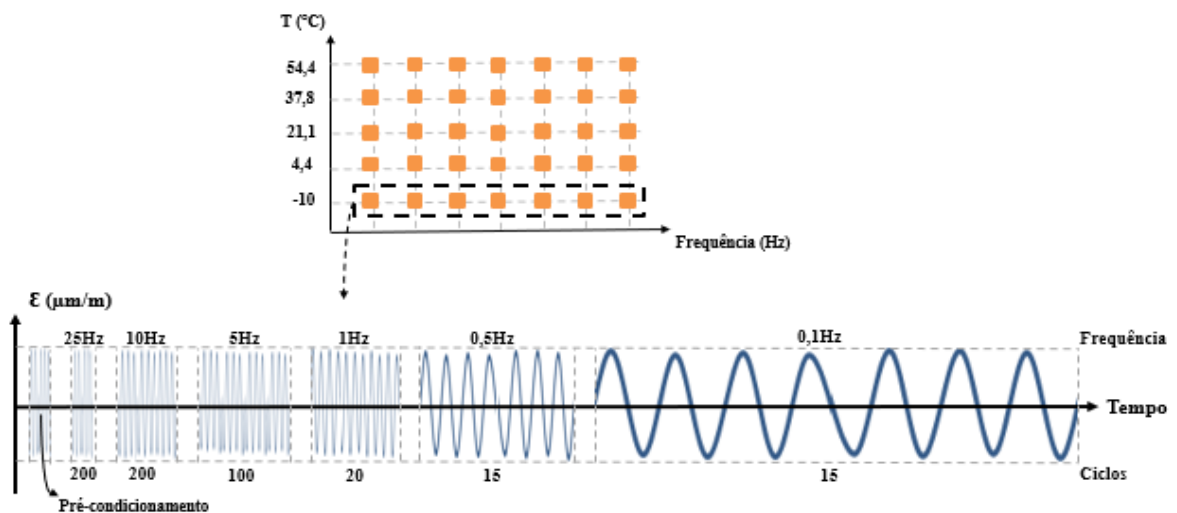
Figura 29 – (a) *Universal Testing Machine*; (b) CP montado dentro da UTM para a realização do ensaio



Fonte: Elaborada pela autora.

Durante a realização do ensaio os CPs são submetidos a várias combinações de frequência e temperatura, sendo o carregamento semi-senoidal na direção axial. As combinações começam com temperaturas mais baixas até chegar nas temperaturas mais altas (-10°C; 4,4°C; 21,1°C; 37,8°C e 54°C), e as frequências de carregamento iniciam-se nas mais altas, sendo reduzidas até se chegar na mais baixa (25Hz; 10Hz; 5Hz; 1Hz; 0,5Hz e 0,1Hz). O caminho de carga é apresentado na Figura 30. Para o equilíbrio da temperatura durante a realização do ensaio, é necessário seguir as recomendações descritas na norma AASHTO T 342 (2011) e que constam de forma resumida na Tabela 11.

Figura 30 – Protocolo do ensaio de módulo dinâmico das misturas asfálticas



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 11 – Recomendações descritas na norma AASHTO T 342 (2011) para a realização do ensaio

Temperatura de ensaio (°C)	Tempo de equilíbrio (h) a 25°C		Frequência (Hz)	Número de ciclos
	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura anterior (°C)		
			25	200
-10	Durante a noite	Durante a noite	10	200
4,4	Durante a noite	Durante a noite	5	100
21,1	1	3	1	20
37,8	2	2	0,5	15
54,4	3	1	0,1	15

Fonte: Adaptada de AASHTO T 342 (2011).

Para poder garantir que o ensaio seja realizado na zona viscoelástica linear do material, a AASHTO T 342 (2011) recomenda a aplicação de um carregamento que corresponda a uma deformação entre 50 a 150 *microstrain* ($\mu\text{m}/\text{m}$). Portanto, decidiu-se utilizar a deformação de $70\mu\text{m}/\text{m}$ como alvo. É necessária a realização de uma etapa prévia denominada *fingerprint* a fim de garantir o nível de tensão que corresponda a deformação desejada. Durante esta etapa preliminar são aplicadas tensões que correspondem a 50% das tensões máximas e mínimas de uma mistura conhecida e já ensaiada. Ao final da realização do *fingerprint* os resultados são analisados e as tensões máximas necessárias para se atingir a metade da amplitude desejada são determinadas. Essa etapa é necessária para cada combinação que será realizada, pois cada combinação de temperatura e frequência terá uma tensão máxima e uma tensão mínima aplicada diferente. A determinação da tensão mínima aplicada se dá devido a necessidade de sempre manter uma pressão de contato, sendo assim, é determinado o valor de 5% correspondente da tensão máxima aplicada. Os valores das tensões máximas e mínimas são apresentadas na Tabela 12. Os dados de saída ao final do ensaio são o Módulo Complexo $|E^*|$ e o ângulo de fase entre a carga aplicada e o deslocamento axial.

Tabela 12 – Tensões máximas e mínimas aplicadas no ensaio de módulo dinâmico

Condições de ensaio		Tensões máximas (kPa)				Tensões mínimas (kPa)			
T _{ENSAIO} (°C)	Frequência (Hz)	M1L1	M1R	M2L2	M2L2C	M1L1	M1R	M2L2	M2L2C
-10	25	2675	2468	2189	2150	134	120	109	108
	10	2637	2400	2110	2070	132	119	105	104
	5	2617	2371	2075	2020	131	112	104	102
	1	2463	2237	1923	1870	123	109	96	94
	0,5	2392	2176	1847	1785	120	100	92	90
	0,1	2253	2000	1642	1610	113	1	82	81
4,4	25	1927	2064	1893	1725	96	103	95	85
	10	1814	1898	1748	1600	91	95	87	80
	5	1720	1813	1656	1500	86	91	83	75
	1	1470	1560	1399	1245	74	78	70	60
	0,5	1356	1439	1274	1120	68	72	64	55
	0,1	1107	1185	1008	890	55	59	50	45
21,1	25	1099	1147	892	955	45	57	45	48
	10	907	918	734	773	39	46	37	39
	5	780	785	624	657	25	39	31	33
	1	506	512	373	407	20	26	19	20
	0,5	407	402	288	317	12	20	14	16
	0,1	232	222	143	165	55	11	7	8
37,8	25	335	365	338	310	17	18	17	15
	10	190	221	198	190	9	11	10	10
	5	154	156	130	140	8	8	7	7
	1	44	49	47	54	2	2	2	2
	0,5	33	36	34	37	2	2	2	1
	0,1	19	20	22	20	1	1	1	1
54,4	25	150	145	120	100	8	7	6	5
	10	70	58	53	70	3	3	3	2
	5	56	50	51	60	1	2	3	1
	1	15	9	13	10	1	1	1	1
	0,5	13	8	13	9	1	1	1	1
	0,1	8	7	6	6	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pela autora.

3.11 Curvas de Caracterização VEL

Após a realização dos ensaios de módulo em misturas asfálticas ($|E^*|$) e em ligantes ($|G^*|$) é necessário realizar a análise dos dados e construir a curva mestra. Os fatores de deslocamento (a_T) necessitam ser modelados, podendo ser usadas as equações de Arrhenius ou de Williams-Landel-Ferry – WLF, Equações 18 e 19 respectivamente. Para o presente trabalho optou-se por utilizar a equação WLF para a transladação das curvas mestras, pois esta é mais indicada quando a diferença entre a temperatura a ser deslocada e a temperatura de referência é maior que 20°C.

$$\log (a_T) = C. \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (18)$$

$$\log (a_T) = \frac{-C_1.(T-T_{REF})}{C_2+(T-T_{REF})} \quad (19)$$

Para o cálculo dos fatores de deslocamento é necessário plotar a curva mestra do módulo em escala logarítmica a partir das curvas isotérmicas do material e escolher uma temperatura de referência na qual as séries de dados serão deslocadas para direita, se forem acima do valor da temperatura de referência, e deslocadas para a esquerda, caso as séries de dados tenham valor inferior a temperatura de referência, conforme Figura 9 apresentada anteriormente. Além das curvas isotérmicas e das curvas mestras, foram plotadas também as curvas Cole-Cole e Espaço de Black, conforme Figura 8.

3.11.1 Aplicação do Modelo 2S2PID

Após a determinação dos fatores de deslocamento para as curvas mestras se dá início a modelagem através do modelo 2S2PID. Nove constantes são utilizadas: C_1 , C_2 , δ , β , τ_0 , k , h , G_0 ou E_0 e G_∞ ou E_∞ . Através do cálculo dos fatores de deslocamento, as constantes C_1 e C_2 são determinadas e as demais sete são determinadas através dos gráficos de caracterização VEL e através dos cálculos de G' ou E' , G'' ou E'' , $|G^*|$ ou $|E^*|$ e φ ou Φ , que são calculados acordo com as Equações 20 a 26. As aproximações dos valores das constantes podem ser feitas por minimização de um dos parâmetros que aproxime o modelo dos dados experimentais; ou por ajuste manual dos parâmetros, sendo necessário o conhecimento das constantes e a influência que cada uma tem sobre os gráficos. Independente de qual forma for utilizada para realizar a aproximação das constantes é necessário que $0 < k < h < 1$.

$$A(\omega) = \alpha(\omega\tau)^{-k} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{-h} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (20)$$

$$B(\omega) = -(\omega\beta\tau)^{-1} - \alpha(\omega\tau)^{-k} \cdot \sen\left(\frac{k\pi}{2}\right) - (\omega\tau)^{-h} \cdot \sen\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (21)$$

$$DEN = (1 + A(\omega))^2 + B^2(\omega) \quad (22)$$

$$G_1(\omega) = G_0 + \frac{(G_\omega - G_0) \cdot (1 + A(\omega))}{DEN} \quad \text{ou} \quad E_1(\omega) = E_0 + \frac{(E_\omega - E_0) \cdot (1 + A(\omega))}{DEN} \quad (23)$$

$$G_2(\omega) = \frac{(G_\omega - G_0) \cdot (-B(\omega))}{DEN} \quad \text{ou} \quad E_2(\omega) = \frac{(E_\omega - E) \cdot (-B(\omega))}{DEN} \quad (24)$$

$$|G^*|(\omega) = \sqrt{G_1^2(\omega) + G_2^2(\omega)} \quad \text{ou} \quad |E^*|(\omega) = \sqrt{E_1^2(\omega) + E_2^2(\omega)} \quad (25)$$

$$\delta(\omega) = \arctg\left(\frac{G_2}{G_1}\right) \quad \text{ou} \quad \delta(\omega) = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (26)$$

Após o ajuste das constantes é verificado através das curvas se a modelagem realizada é satisfatória. Tal verificação é feita através dos parâmetros estatísticos R^2 e S_e/S_y , conforme as Equações 27 a 29, em que R^2 representa a linearidade entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo, e S_e/S_y representa o desvio padrão que ocorre entre os valores experimentais e os previstos através do modelo. A classificação para saber se os parâmetros estatísticos ajustados são adequados é apresentada na Tabela 13 (Yusoff *et al.*, 2013).

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{(n - q)}} \quad (27)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{(n - q)}} \quad (28)$$

$$R^2 = 1 - \frac{(n - q)}{(n - 1)} \cdot \left(\frac{S_e}{S_y}\right)^2 \quad (29)$$

Em que: Y: valor experimental de $|G^*|$ ou $|E^*|$;

\hat{Y} : valor descritivo de $|G^*|$ ou $|E^*|$;

\bar{Y} : valor médio dos valores experimentais de $|G^*|$ ou $|E^*|$;

n: tamanho da amostra;

q: número de variáveis independentes do modelo.

Tabela 13 – Classificação dos critérios estatísticos de qualidade de ajuste das curvas de caracterização VEL

Classificação	R ²	S _e /S _y
Excelente	≥ 0,90	≤ 0,35
Bom	0,70 – 0,89	0,36 – 0,55
Justo	0,40 – 0,69	0,56 – 0,75
Pobre	0,20 – 0,39	0,76 – 0,89
Muito Pobre	≤ 0,19	≥ 0,90

Fonte: Yusoff et al. (2013).

3.11.2 Aplicação da Transformação SHStS

Com os dados de G_0 ou E_0 e G_∞ ou E_∞ obtidos da modelagem *2S2PID*, utiliza-se a metodologia *SHStS* em que a partir do material de origem, o ligante, é realizada a previsão da mistura asfáltica. Realiza-se a calibração do parâmetro δ_{SHStS} a fim de se obter o melhor ajuste entre as curvas de caracterização VEL. O parâmetro δ_{SHStS} é dependente do envelhecimento que o material sofre, principalmente durante a usinagem, e varia de acordo com a mistura utilizada.

3.12 Ensaio de Fadiga nos Ligantes

Com o intuito de investigar a vida de fadiga nos ligantes durante os testes cíclicos, assim como na caracterização reológica, foi utilizado o reômetro *DSR* modelo TA AR 3000. A frequência usada neste estudo é de 10Hz, valor comumente utilizado para realizar testes de fadiga, e com valores de amplitudes distintas (10.000 μ m/m e 20.000 μ m/m e 40.000 μ m/m). A amostra ensaiada faz uso da geometria de placas paralelas de 8mm de diâmetro com espaçamento de 2mm entre as placas.

A temperatura de ensaio pode ser determinada com base no Grau de Desempenho (PG) do ligante, a qual é determinada a partir da média das temperaturas máxima e mínima, menos três graus. A temperatura obtida não deve exceder 21°C e para este ensaio optou-se pela temperatura padronizada de 19°C para todos os ligantes.

Antes da realização do ensaio é necessário preparar a amostra no reômetro, o que requer aumento da temperatura para a correta moldagem do ligante nas placas paralelas, a fim de que este tenha as dimensões de ensaio desejadas. O ligante é aquecido até a temperatura de 70°C e assim que é realizado o corte da amostra, para deixa-la nas dimensões de ensaio, a temperatura é reduzida até a temperatura de ensaio desejada. Com o aquecimento e o

resfriamento rápido da amostra, as moléculas do ligante se reordenam a fim de encontrarem a melhor estrutura cristalina para a temperatura em que se encontram. Para que o ligante volte a sua estrutura molecular adequada estabeleceu-se tempo de três horas de condicionamento térmico para que o ligante asfáltico volte ao seu equilíbrio térmico. Sem o tempo adequado de condicionamento térmico as propriedades do material são alteradas e ocorrem distorções nos resultados. O tempo usado estabeleceu-se através de trabalhos anteriores (Babadopulos, 2017; Delaporte, 2007; Lamothe, 2014) e experimentalmente em laboratório, onde foram testados vários tempos até encontrar-se aquele adequado para a realização do ensaio, ou seja, 3h.

3.13 Ensaio de Fadiga Uniaxial de Tração-Compressão

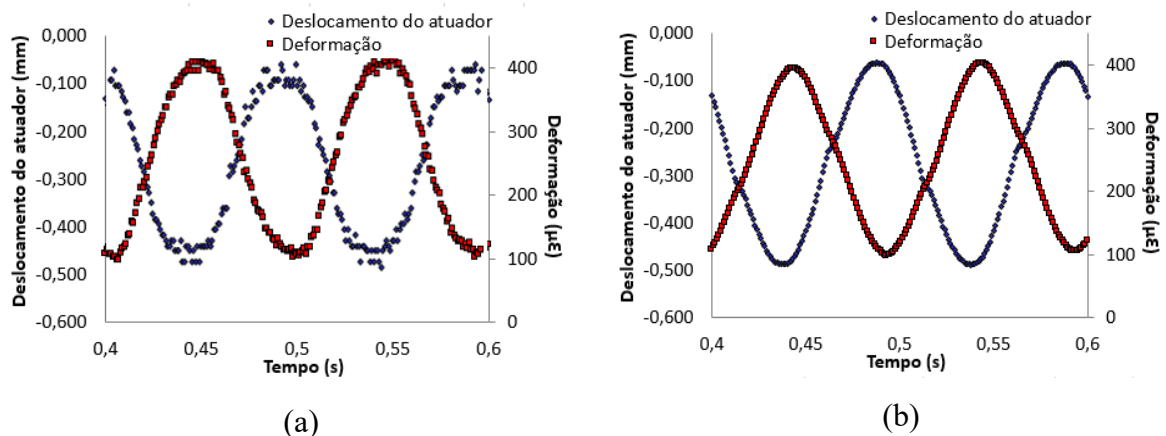
No ensaio de fadiga das misturas asfálticas o procedimento a ser seguido é o estabelecido pela norma AASHTO TP 107 (2014). Para a realização do ensaio é necessário estabelecer a temperatura que será utilizada, sendo esta obtida com base no Grau de Desempenho (PG), não devendo exceder 21°C. A fim de padronizar a temperatura de ensaio e evitar discrepâncias e diminuir as variáveis que influenciam os resultados por pequenas variações na temperatura decidiu-se utilizar a mesma temperatura do ensaio de fadiga dos ligantes, ou seja, 19°C. Durante o ensaio a temperatura deve ser monitorada no interior e na superfície do CP, o qual é realizado através de um CP instrumentado ao lado do CP que está sendo ensaiado. Ambas as temperaturas devem atingir a temperatura de ensaio especificada $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e não devem diferir por mais de $\pm 1,0^\circ\text{C}$.

As amostras são preparadas seguindo os mesmos procedimentos descritos em item 3.10 e após é necessário realizar a serragem das extremidades dos CPs, a fim de torna-lo mais homogêneo e evitar rupturas indesejadas. Ao final da serragem o CP deve ter uma altura de $13,0\text{cm} \pm 0,25\text{cm}$ e diâmetro de $10,2\text{cm} \pm 0,2\text{cm}$. Antes de colocar os CPs dentro do equipamento para realizar o ensaio, é necessário realizar outra etapa preliminar, a colagem das placas de topo e de fundo, que permitem a fixação dos mesmos na mesa de prensa hidráulica e no atuador do equipamento. Após a secagem, o conjunto CP + placas é levado ao equipamento e fixo na mesa da prensa, e o atuador é ajustado até a posição mais próxima de 0mm. A mesa da prensa é elevada e todas as conexões do conjunto são rosqueadas, então é aplicado no atuador uma carga de aproximadamente 0,09kN, a fim de evitar folgas no conjunto.

Ainda na etapa preliminar ao ensaio, faz-se necessário realizar um teste de sinal para analisar se o sinal das deformações está seguindo corretamente a função senoidal, pois se houver folgas no conjunto a função senoidal apresentará desvios em sua forma. O teste também

serve para estimar qual deve ser o deslocamento aplicado no atuador para que se atinja a amplitude de deformação desejada tanto no ensaio de fadiga, quanto no *fingerprint*. Para realizar o teste de sinais são aplicados 15 ciclos de carregamento a 10Hz de frequência e com baixa amplitude de deslocamento. Na Figura 31 é possível observar as diferenças existentes entre a função senoidal antes e depois da realização do teste de sinal.

Figura 31 – Teste de sinal (a) antes do ajuste e (b) depois do ajuste



Fonte: Elaborada pela autora.

Realiza-se o teste de amplitude para o *fingerprint* a fim de que se atinja amplitude de deformações de 50 a 75 $\mu\text{m}/\text{m}$ nas frequências descritas na norma AASTHO T 342 (2011). A frequência utilizada é a de 10 Hz e, portanto, o *fingerprint* é realizado durante 50 ciclos (5 segundos). O CP deve então descansar por um período entre 20 e 45 minutos em virtude do histórico de carregamento, para que este volte a sua condição inicial.

O ensaio de fadiga é realizado com carregamento senoidal e com amplitude constante no deslocamento do atuador, é necessário realizar vários ensaios com diferentes amplitudes. Babadopulos (2017) recomenda iniciar o teste com deformação no CP de 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ (ϵ_{0s1}), sendo os demais determinados de acordo com as condições de ensaio do primeiro, Tabela 14. Caso a primeira amostra possua um número de ciclos de falha (N_f) inferior a 500, é necessário refazer o ensaio com a amplitude de deformação de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$. Decidiu-se trabalhar com as deformações de 150 $\mu\text{m}/\text{m}$, 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ para a mistura M1L1; de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$, 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ para a mistura M1R e; de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$, 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ para a mistura M2L2 e M2L2C.

O teste de fadiga é interrompido quando há a propagação das microtrincas se tornando visível as macrotrincas na superfície da amostra. Quando há a ruptura do CP é possível observar a modificação do sinal do carregamento imposto pelo atuador, conforme Figura 32.

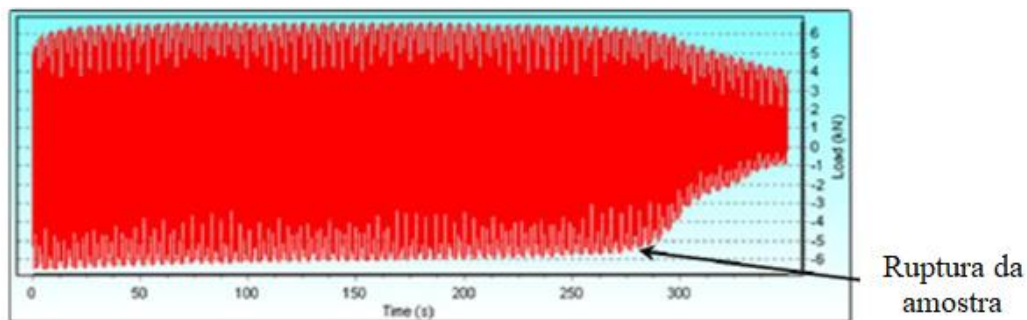
Portanto, quando se observa a mudança de sinal do carregamento, é possível observar também as macrotincas na superfície da amostra.

Tabela 14 – Condições para a determinação das demais amplitudes de deformações para realização do ensaio de fadiga

Caso	ϵ_{0s2}	ϵ_{0s3}
$500 < N_f < 1.000$	$\epsilon_{0s1} - 100$	$\epsilon_{0s1} - 150$
$1.000 < N_f < 5.000$	$\epsilon_{0s1} - 50$	$\epsilon_{0s1} - 100$
$5.000 < N_f < 20.000$	$\epsilon_{0s1} + 50$	$\epsilon_{0s1} - 50$
$20.000 < N_f < 20.000$	$\epsilon_{0s1} + 100$	$\epsilon_{0s1} + 50$
$100.00 < N_f$	$\epsilon_{0s1} + 150$	$\epsilon_{0s1} + 100$

Fonte: Adaptado de Lucas Júnior (2018).

Figura 32 – Análise da modificação do sinal do atuador durante a realização do ensaio



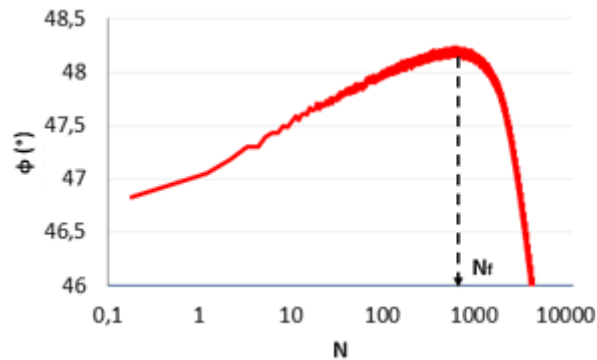
Fonte: Lucas Júnior (2018).

Após a realização do ensaio de fadiga é necessário o tratamento dos dados a fim de se obter as respostas do comportamento da mistura asfáltica no ensaio. Para essa análise é necessário o módulo dinâmico de cada amostra ensaiada, conforme a temperatura e a frequência de ensaio; a série de Prony da mistura; e as planilhas dos dados brutos obtidos durante a realização do ensaio de fadiga. A partir dos dados de entrada é possível determinar o N_f da mistura com o processamento dos sinais e da análise do ângulo de fase durante o ensaio, conforme Figura 33, e também proceder com o cálculo da acumulação do dano e da evolução da integridade do material, conforme Figura 34.

Em virtude das possíveis variações que possam existir entre os CPs utilizados nos ensaios de módulo dinâmico a compressão ($|E^*|_{LVE}$) e de fadiga ($|E^*|_{\text{fingerprint}}$) é necessário realizar uma correção e levar em consideração tais variações. Para corrigir esse possível desvio é realizado o cálculo da relação de módulo dinâmico (DMR), conforme Equação 30, o qual é utilizado para a determinação da pseudo-rigidez da mistura (C) e do dano (S).

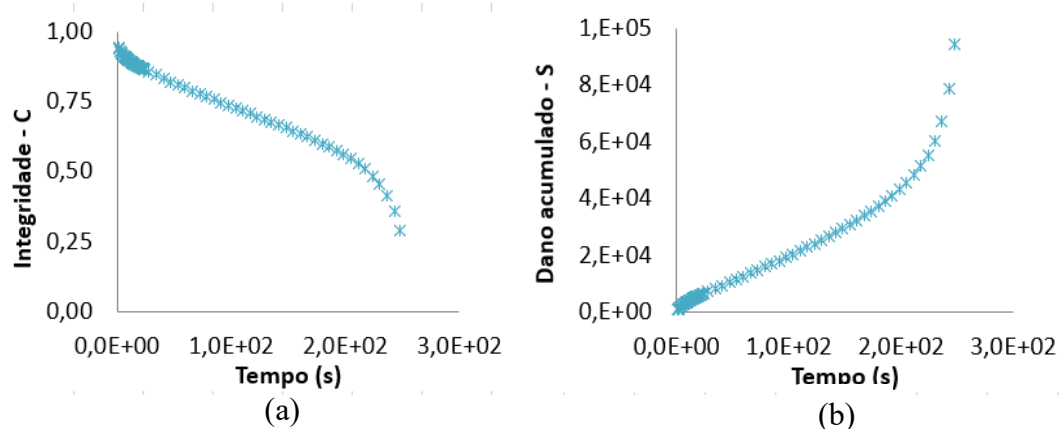
$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (30)$$

Figura 33 – Determinação do N_f em função do ângulo de fase



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 34 – Representação em função do tempo a (a) Integridade e (b) Dano



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a modelagem do ensaio e ajustar a curva da deformação da mistura em função do N_f e ajustar a evolução de integridade e da acumulação do dano, é necessária a determinação da amplitude inicial de deformação (AID) do CP durante o ensaio. No início do ensaio o CP não possui histórico de carregamento e em virtude disso, ao receber a carga de ensaio este responde se deformando em regime transiente. Somente após um tempo de sollicitação o CP entra no regime permanente de ensaio e devido à dificuldade de estabelecer o exato momento de mudança de regime frente a sollicitação, decidiu-se, escolher o intervalo de 2s a 12s de ensaio (contendo 10000 medições de deformação), sendo considerado que do ciclo 0 ao 20 o CP está no regime transiente, e a partir do ciclo 20 encontra-se em regime permanente.

3.14 Fator de Fadiga

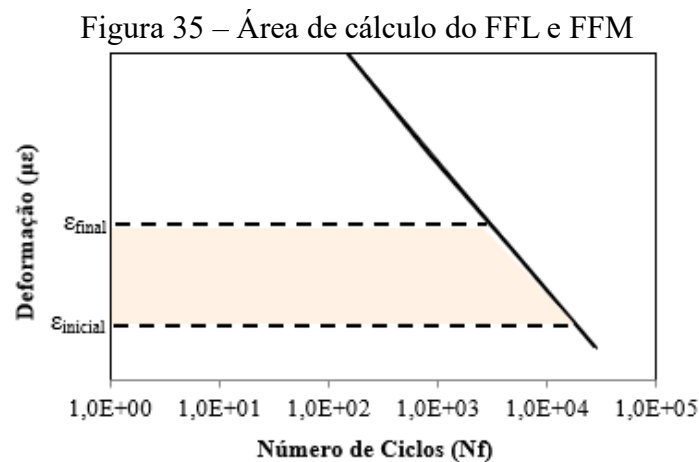
Para avaliar e classificar os ligantes e as misturas utilizadas fez-se o uso dos métodos de Fator de Fadiga do Ligante (FFL) e Fator de Fadiga da Mistura (FFM). Estes métodos se baseiam na utilização da Curva de Wöhler (deformação do material *vs* o número de ciclos).

O FFM foi proposto por Nascimento *et al.* (2014) e corresponde a área da curva de fadiga no espaço *log-log* entre as deformações de 100 e 200 *microstrains*, conforme Equação 31. Para os cálculos são consideradas temperatura de 20°C e frequência de 10Hz. Estes valores de deformações foram escolhidos em virtude da frequência em que são encontrados nas misturas aplicadas em pavimentos brasileiros.

O FFL é similar ao FFM e é numericamente igual à área definida entre 1,25% e 2,5% de deformação da Curva de Wöhler, conforme Equação 32. Este fator de fadiga é obtido a partir do ensaio de Varredura Linear de Amplitude de Deformação, conhecido tradicionalmente como *LAS*. Embora não seja utilizado o ensaio *LAS* na presente pesquisa, o ensaio possibilita também a obtenção da Curva de Wöhler e, portanto, utilizou-se este mesmo parâmetro. A Figura 35 ilustra a área em que se delimita os valores de FFL e FFM.

$$FFM = \frac{[\log(N_{f,100\mu\epsilon}) + \log(N_{f,200\mu\epsilon})]}{2} \times [\log(200) - \log(100)] \quad (31)$$

$$FFL = \frac{[\log(N_{f,1,25\%}) + \log(N_{f,2,5\%})]}{2} \times [\log(0,025) - \log(0,0125)] \quad (32)$$



Fonte: Elaborada pela autora.

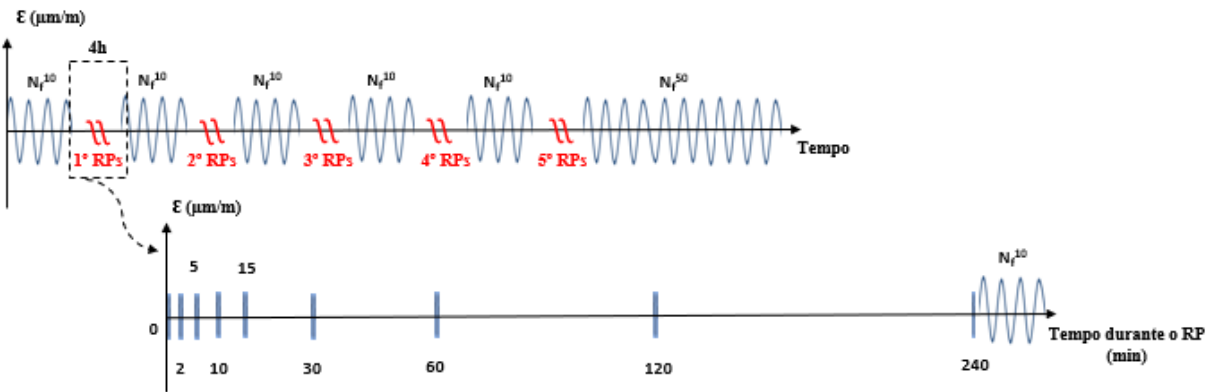
Com os valores de FFL e FFM os materiais são classificados quanto a fadiga. Nascimento (2018) propôs 4 classes de fadiga, correlacionando o fator de fadiga com a rigidez do material. A classificação se dá de 1 a 4, sendo que quanto menor a classe, menor a resistência do material.

3.15 Tempo de Repouso no Ensaio de Fadiga

Para a investigação da influência dos períodos de repouso no ensaio de fadiga uma série de carregamento e de descanso é aplicada no material. São usadas as mesmas amplitudes de carga e frequência do ensaio de fadiga sem a introdução dos períodos de repouso (tanto para ligante, quanto para mistura). O intervalo de tempo aos quais as amostras são submetidas serve para verificar se há recuperação das propriedades mecânicas e para isso, durante o repouso, testes de módulo serão realizados a fim de acompanhar a variação de rigidez que ocorre no material durante o teste de fadiga. A alteração do módulo dinâmico durante os testes de fadiga pode ser usada como um indicador da evolução dos danos por fadiga, visto que a perda de rigidez ocorre à medida que o dano se acumula com a eventual coalescência das macrotrincas.

O planejamento do protocolo de ensaio de fadiga com repouso se dá a partir do ensaio de fadiga sem repouso, com base nos N_f obtidos. O protocolo de ensaio é dividido em seis fases de carregamento e cinco fases de repouso, conforme Figura 36, onde as cinco primeiras fases de carregamento representam 10% do $N_{f\text{médio}}$ ($N_f^{10\%}$) de cada amplitude de deformação obtido no ensaio de fadiga sem *RPs* e a última fase de carregamento representa 50% do $N_{f\text{médio}}$ ($N_f^{50\%}$). O critério de parada nas cinco primeiras fases de carregamento é um determinado consumo de vida de fadiga (Lei de Miner) e não uma determinada perda de rigidez e, portanto, há apenas um acompanhamento da perda de rigidez do material. As cinco fases de repouso possuem duração de 4h cada e durante o período de repouso o módulo do material é medido durante 50 ciclos nos seguintes tempos: 0; 2; 5; 10; 15; 30; 60; 120 e 240min. O tempo total necessário para verificar o módulo do material durante o repouso é de aproximadamente 1min.

Figura 36 – Esquema de carga e repouso durante a realização do ensaio



Fonte: Elaborada pela autora.

3.16 Peculiaridades e Dificuldades na Realização do Ensaio de Fadiga Com e Sem Tempo de Repouso

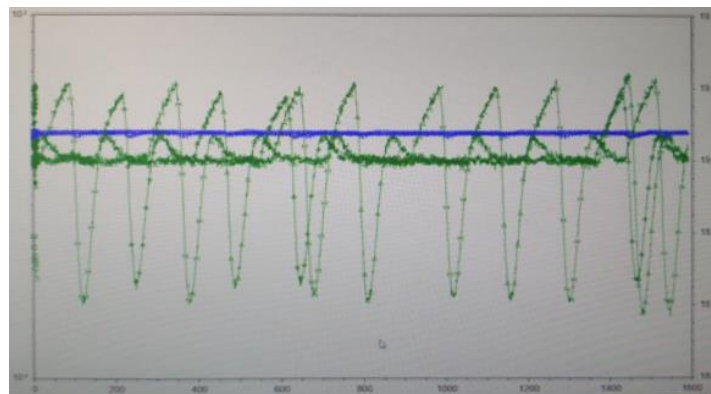
3.16.1 Ligantes Asfálticos

Em virtude do aquecimento da amostra para a moldagem no reômetro, demanda-se um tempo muito grande de condicionamento térmico para que o ligante asfáltico volte ao seu equilíbrio térmico, considerando também efeitos de enrijecimento estérico ou físico, conhecido como *steric hardenin* (Traxler e Schweiyer, 1936; Santagata *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2018). Esse tempo de condicionamento é um tempo no qual não se pode utilizar o reômetro para outros ensaios e o computador que armazena os dados de ensaio também fica impossibilitado de realizar outras funções. O programa elaborado para a realização do ensaio de fadiga com repouso é pesado e consome muita memória do sistema, o que o torna lento e suscetível ao travamento. Quando o computador foi utilizado para outros fins enquanto estava sendo rodado o ensaio ou quando a amostra estava sendo condicionada, este travou, necessitando ser reiniciado e, portanto, o ensaio era perdido. Também em virtude do espaço de memória utilizado pelo programa para realizar o ensaio de fadiga com repouso era necessário reiniciar o computador a cada novo ensaio, pois o computador travava na metade do ensaio e não armazenava mais nenhum resultado mesmo que o ensaio continuasse a rodar.

Outro problema encontrado está relacionado ao compressor que mantém a temperatura de ensaio à 19°C. Por conta do longo período de ensaio (3h de condicionamento + 5 loops de 4h de repouso + 5 loops de carregamento de duração dependente do ensaio – entre 10 e 250min) a tubulação que conduz o ar frio para o reômetro congela, necessitando a realização de uma purga (retirar a água na rede de ar comprimido). Para realizar a purga são

necessárias no mínimo 2,5h, o que demanda ainda mais tempo sem a possibilidade da realização do ensaio. Caso a purga não seja realizada, durante o ensaio, a temperatura começa a oscilar, variando em torno de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, o que ocasiona picos no ângulo de fase e no módulo dinâmico, conforme apresentado na Figura 37, não sendo possível a utilização desses resultados na análise.

Figura 37 – Exemplo de dificuldade de ensaio: Picos no ensaio de fadiga com *RPs* nos ligantes quando não se realiza a purga



Fonte: Elaborada pela autora.

3.16.2 Misturas Asfálticas

O processo de colagem dos CPs leva em torno 24h, sendo 6h no dispositivo de colagem e as 18h restantes em repouso. Em virtude da existência de apenas um dispositivo de colagem, uma placa superior e uma placa inferior no laboratório, só era possível ensaiar um CP a cada dois dias. Apenas na parte final do trabalho foi possível a confecção de mais quatro placas, o que reduziu para um dia o intervalo entre um ensaio e outro. Apesar de uma quantidade suficiente de placas para realizar vários ensaios ao dia, o ensaio de fadiga com repouso dura em torno de um dia e por isso não foi possível reduzir o intervalo de ensaio nos CPs. Com a realização do ensaio de fadiga sem os períodos de repouso é possível ensaiar de dois a três CPs por dia.

Para que o ensaio seja considerado válido, é necessário que a ruptura do CP ocorra entre os *taquets*, onde ocorre a leitura dos LVDTs. Caso a ruptura não ocorra nesse intervalo médio (de 32,5 a 97,5mm), o resultado deve ser descartado.

Quando ocorre a ruptura do CP, o carregamento imposto pelo atuador tem seu sinal modificado na tela do computador e é possível observar as macrotrincas na superfície do CP.

Porém, após cessado o carregamento o material volta a seu estado original e a ruptura não pode mais ser visualizada a olho nu.

Durante a realização do ensaio de fadiga são necessários cuidados quanto a oscilação de energia, uma vez que mesmo uma pequena oscilação, até mesmo imperceptível, causa interrupção no ensaio e, caso isso ocorra, é necessário descartar o resultado.

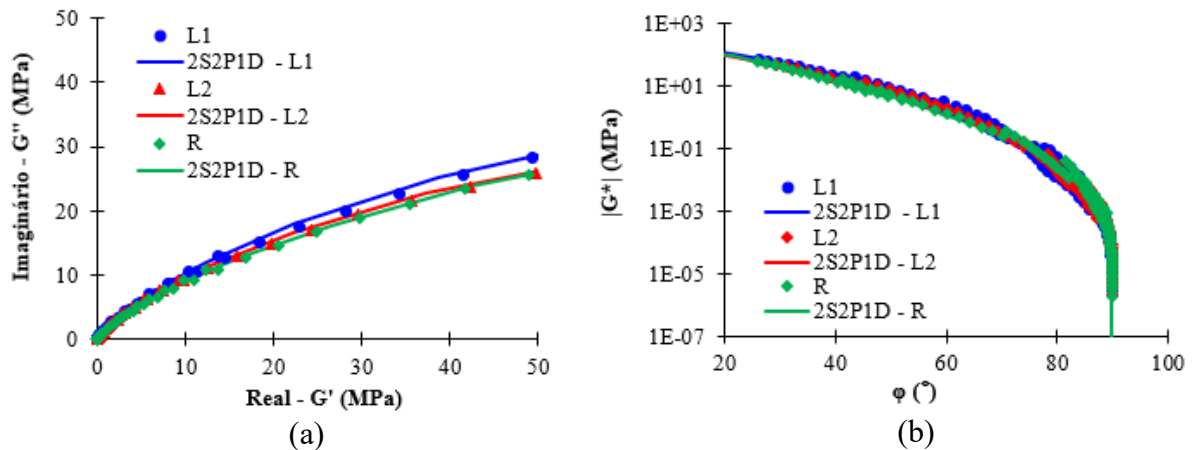
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização e Modelagem Viscoelástica Linear

4.1.1 Ligantes Asfálticos

As análises da caracterização viscoelástica linear dos ligantes foram realizadas utilizando-se, do modelo *2S2P1D*, e das curvas Cole-Cole e Espaço de Black, apresentadas nas Figura 38(a) e (b) respectivamente. Nas curvas são apresentados os dados experimentais de ensaio e a modelagem proposta pelo *2S2P1D*.

Figura 38 – (a) Cole-Cole dos ligante e (b) Curvas do Espaço de Black dos ligantes



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a construção das curvas mestras, calculou-se o fator a_T experimental e os parâmetros C de Arrhenius, C_1 e C_2 de WLF por otimização dos mínimos quadrados, os quais são mostrados na Tabela 15. Apesar dos dois modelos se adequarem bem para esses ligantes, optou-se por adotar o modelo WLF para realizar os ajustes do tempo característico, através do qual se plotaram os gráficos de comparação dos fatores de deslocamento experimentais a_T para os ligantes, conforme Figura 39. Como os valores de a_T para ambos os ligantes são semelhantes, não há mudança do intervalo de frequência coberta pelas suas curvas mestras.

O ligante L1 (apresentado na Figura 40(a)) se mostrou mais rígido que os ligantes L2 e R (apresentados nas Figura 40(b) e (c) respectivamente) em todas as temperaturas e frequências analisadas. Embora os ligantes L1 e L2 possuam a origem, sendo apenas a coleta realizada em lotes diferentes, o ligante L2 possui rigidez semelhante ao ligante R nas faixas de

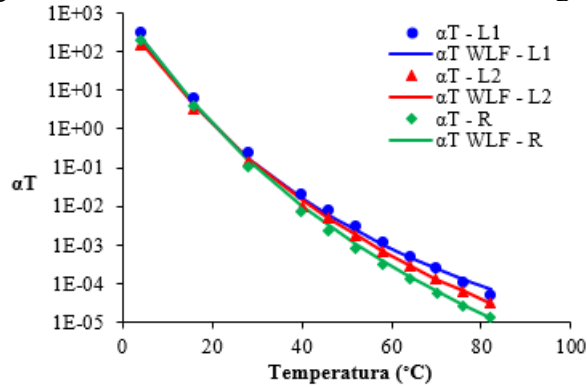
temperatura mais elevadas, entre 46°C e 82°C. Nas temperaturas mais baixas, entre 4°C e 28°C, o comportamento do ligante L2 se assemelha ao do ligante L1, enquanto que, na temperatura de 40°C ele começa a se distanciar do comportamento do ligante L1 e começa a se assemelhar à rigidez do ligante R.

Tabela 15 – Constantes de Arrhenius e WLF para o cálculo do α_T

Ligante	Arrhenius		WLF			T_{REF}
	C	R ²	C1	C2	R ²	
L1	7693,71	0,99	10,34	90,65	1,00	
L2	8287,63	0,98	12,85	113,00	1,00	21,1
R	8954,59	0,99	14,71	122,00	1,00	

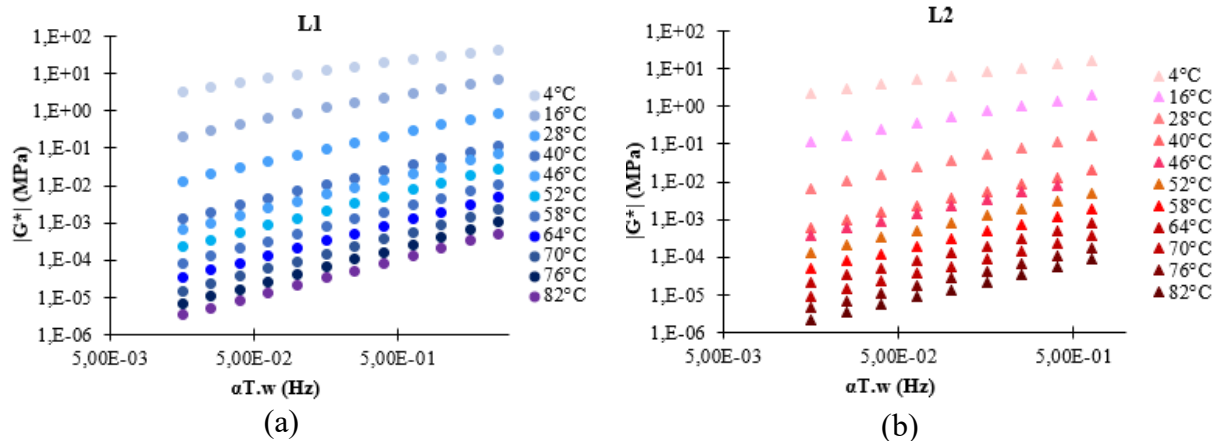
Fonte: Elaborada pela autora.

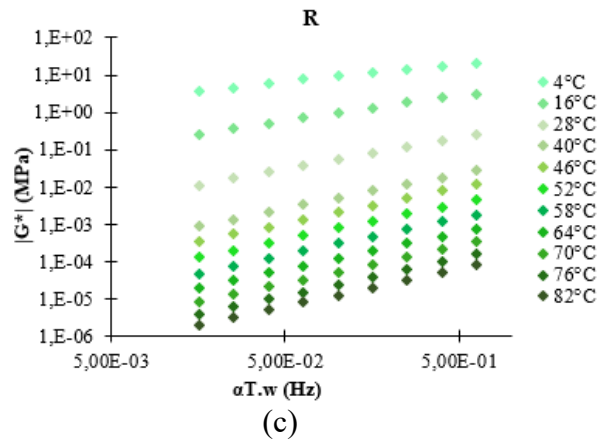
Figura 39 – Fatores de deslocamento α_T dos ligantes



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 40 – Curvas isotermas dos ligantes: (a) L1; (b) L2; (c) R

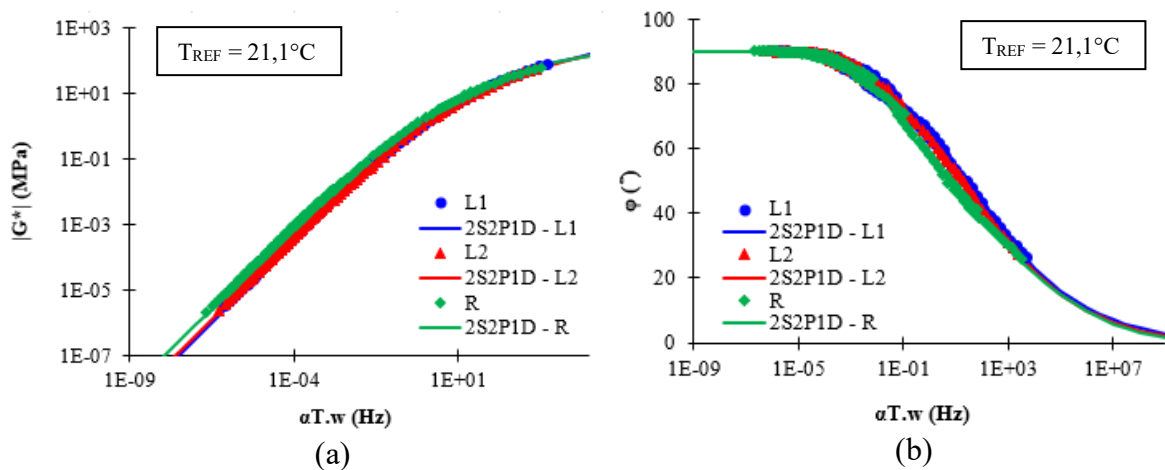




Fonte: Elaborada pela autora.

As curvas mestras de $|G^*|$ e de ϕ dos ligantes foram construídas com a equação WLF através do PSTT em que a temperatura de referência foi a $T_{REF} = 21,1^\circ\text{C}$, conforme Figura 41. Após a modelagem do comportamento VEL chegou-se aos parâmetros mostrados na Tabela 16, em que se observa que o módulo estático é nulo ($G_0 = 0$). Quando o módulo estático tende a zero este é um indicativo que não há presença de agregados ou de alta modificação por polímeros ou borracha na amostra, pois $G_0 > 0$ indica que o material não é constituído apenas de ligante, sendo considerado um mastique, MAF ou MAC.

Figura 41 – Curvas mestras na temperatura de $21,1^\circ\text{C}$ dos ligantes (a) módulo e (b) ângulo de fase



Fonte: Elaborada pela autora.

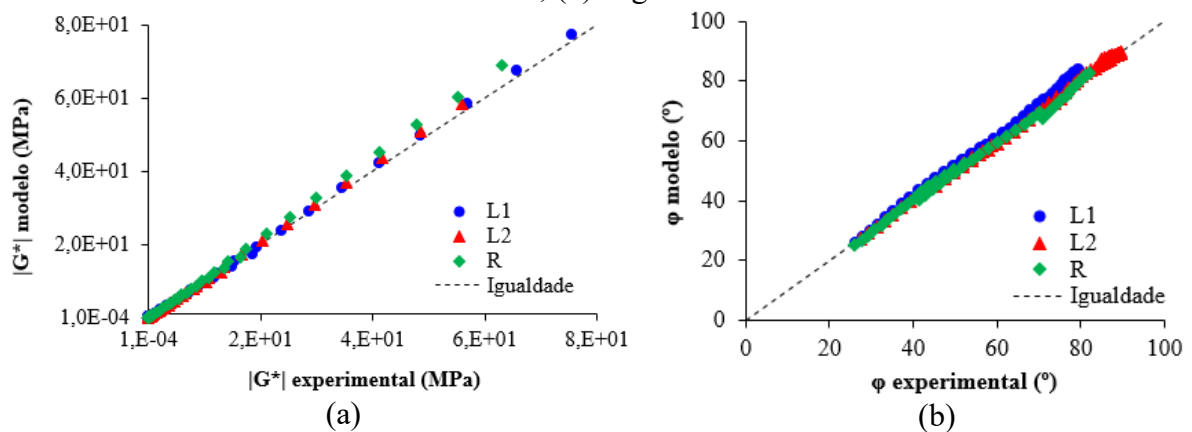
Tabela 16 – Parâmetros da modelagem dos ligantes

Ligante		L1	L2	R
Parâmetros	δ	2,7	2,7	3,0
	τ_0 (s)	2,5E-05	4,0E-05	6,93E-05
	k	0,25	0,26	0,28
	h	0,62	0,62	0,61
	G_∞ (Pa)	3,7E+08	3,0E+08	3,0E+08
	G_0 (Pa)	0	0	0
	β	55	55	66
Módulo Dinâmico	Se/Sy	0,0402	0,0300	0,0327
	R ²	1	1	1
Ângulo de fase	Se/Sy	0,0476	0,0181	0,0067
	R ²	1	1	1

Fonte: Elaborada pela autora.

As aproximações encontradas entre os valores experimentais e os modelados foram consideradas excelentes ($R^2 > 90$) para o módulo e para o ângulo de fase nos três ligantes. Os valores experimentais e previstos do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram plotados conforme pode ser observado na Figura 42. Nota-se que ambos os gráficos se aproximam da linha de igualdade entre os valores experimentais e os previstos através do modelo.

Figura 42 – Relação entre os valores experimentais dos ligantes e os previstos: (a) módulo dinâmico e; (b) ângulo de fase

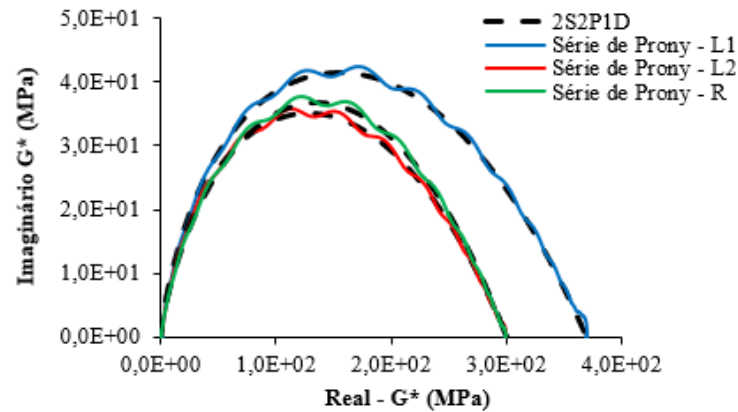


Fonte: Elaborada pela autora.

Após a utilização do modelo de espectro contínuo *2S2PID*, os dados dos ligantes foram usados para a previsão de propriedades por meio do modelo do espectro discreto (Série de Prony – KVG), conforme Figura 43. Foram utilizados 22 elementos na previsão com a Série de Prony, sendo possível notar que com esse número elementos o modelo de espectro discreto se aproxima consideravelmente do modelo de espectro contínuo. O espectro de relaxação e o

espectro de retardação determinados com 22 elementos para os ligantes investigados são apresentados nos Apêndices A e B respectivamente.

Figura 43 – Comparação da Série de Prony – KVG de 22 elementos com 2S2P1D dos ligantes



Fonte: Elaborada pela autora.

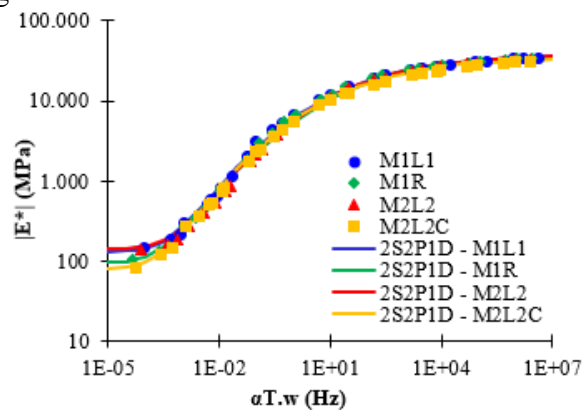
4.1.2 Misturas Asfálticas

As análises da caracterização viscoelástica linear das misturas foram realizadas, e a partir da caracterização viscoelástica do ligante com a aplicação do modelo 2S2P1D e da transformação SHStS, obtiveram as curvas mestras de $|E^*|$ e de Φ , além das curvas Cole-Cole e Espaço de Black, conforme Figura 44. Em virtude do pressuposto de que o ligante é a origem da dependência tempo-temperatura das misturas asfálticas, a análise do comportamento viscoelástico das misturas foi obtida a partir dos resultados do comportamento viscoelástico dos ligantes correspondentes as mesmas, buscando-se determinar se apenas com o ajuste de parte dos parâmetros do modelo 2S2P1D para as misturas seria possível modelar adequadamente seus comportamentos VEL. Dentre as nove constantes do modelo 2S2P1D ajustadas para os ligantes, apenas os módulos e τ_0 foram variadas para as respectivas misturas, conforme apresentado na Tabela 17.

. Os valores das constantes C_1 , C_2 , δ , k , h e o β mantiveram-se os mesmos dos ligantes. Observa-se que os parâmetros variados são semelhantes entre si apesar das misturas serem distintas. De acordo com Di Benedetto et al. (2004), estes parâmetros tendem a apresentar valores próximos entre si para misturas com formulações parecidas (TMN, granulometria, volumetria e mineralogia), independentemente do ligante utilizado. As misturas M1L1 e M1R possuem as mesmas formulações, tendo apenas a diferença entre os ligantes asfálticos usados, e apresentam variação de apenas 2,63% entre os valores de E_∞ e de 26,9% entre os valores de

E_0 . Nas misturas M1L1 e M2L2, que possuem poucas diferenças na granulometria e mineralogia, além de mesmo TMN e de possuírem mesmo ligante de origem, porém de bateladas diferentes, a variação entre os valores é ainda menor, de apenas 0,26% e 7,14% para os valores de E_∞ e E_0 , respectivamente. Porém, entre as misturas M2L2 e M2L2R, que possuem entre si diferença apenas na adição de 5% de cinza pesada, as diferenças entre os valores de E_∞ e E_0 são elevados, de 8,97% e de 42,86% respectivamente. Quando comparados os valores entre as misturas M1L1 e M2L2C, o valor de E_∞ é ainda mais elevado, de 9,21%, enquanto que, o valor de E_0 é de 38,46%.

Figura 44 – Curvas mestras do módulo das misturas



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 17 – Parâmetros da modelagem das misturas

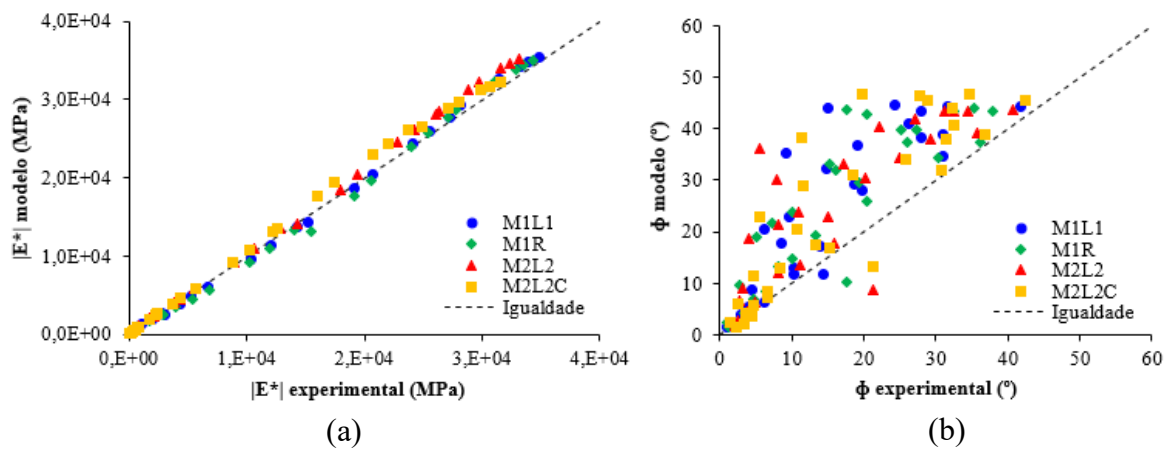
Mistura		M1L1	M1R	M2L2	M2L2C
Parâmetros	τ_0	0,05	0,05	0,043	0,06
	E_∞	3,80E+10	3,70E+10	3,79E+10	3,45E+10
	E_0	1,30E+08	9,50E+07	1,40E+08	0,80E+08
Módulo Dinâmico	Se/Sy	0,0471	0,0678	0,1041	0,1022
	R ²	1	1	0,99	0,99
Ângulo de fase	Se/Sy	1,1069	0,9737	0,9784	0,9105
	R ²	0,15	0,12	0,12	0,23

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 17, os parâmetros experimentais e os modelados apresentados possuem aproximações excelentes ($R^2 > 90$) para as curvas mestras do módulo, enquanto que para as curvas mestras do ângulo de fase os valores apresentaram um ajuste pobre ($0,20 < R^2 < 0,39$) ou muito pobre ($R^2 < 0,19$), devido as dificuldades experimentais de determinação com precisão do ângulo de fase da mistura com o equipamento e os *LVDTs* utilizados. A modelagem *2S2PID* em alguns casos exige que seja escolhido um gráfico alvo para a calibração dos parâmetros,

portanto, a calibração para o ajuste dos gráficos de caracterização viscoelástica não necessariamente implicará no bom ajuste do modelo nos quatro gráficos simultaneamente. Para a modelagem das misturas asfálticas escolheu-se a curva mestra do módulo para o ajuste alvo. Os valores experimentais e previstos do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram plotados conforme Figura 45, onde observa-se que o gráfico do módulo dinâmico se aproxima da linha de igualdade entre os valores experimentais e os previstos através do modelo, enquanto que o gráfico do ângulo de fase não, devido aos problemas já comentados na medida desse parâmetro.

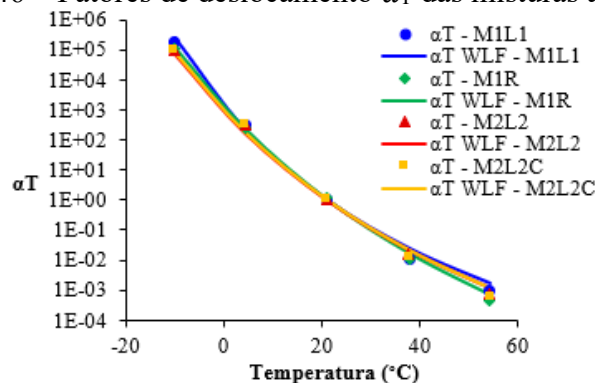
Figura 45 – Relação entre os valores experimentais das misturas e os previstos: (a) módulo dinâmico e ; (b) ângulo de fase



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a construção das curvas mestras, calculou-se o fator a_T experimental e utilizou-se os mesmos parâmetros C_1 e C_2 de WLF obtidos a partir da caracterização viscoelástica dos ligantes. Na Figura 46, os gráficos de comparação dos fatores de deslocamento experimentais a_T para as misturas são apresentados.

Figura 46 – Fatores de deslocamento a_T das misturas asfálticas

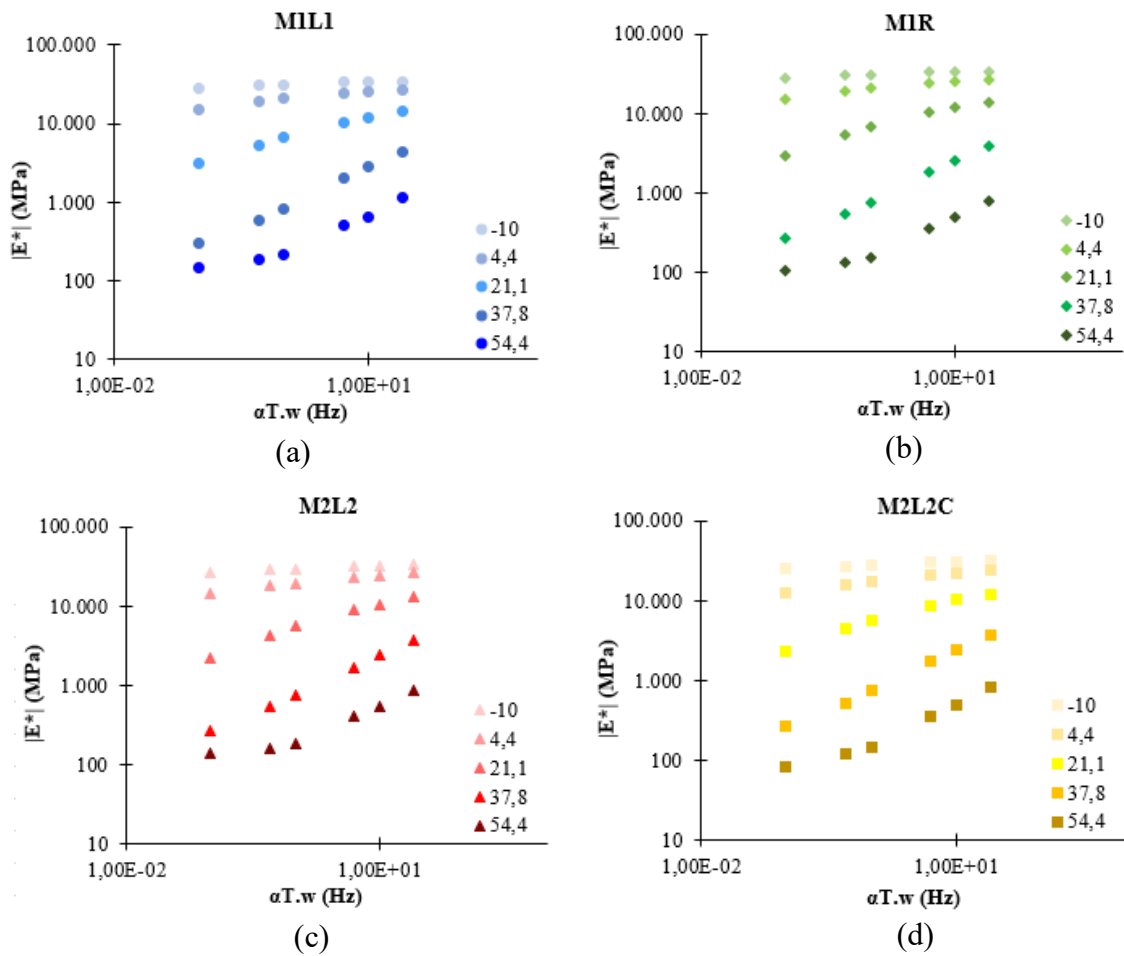


Fonte: Elaborada pela autora.

A mistura M1L1 se mostrou mais rígida que as demais, conforme Figura 47. Apesar de as misturas M1L1 e M1R possuírem o mesmo esqueleto pétreo, mesmos parâmetros volumétricos, tendo apenas os ligantes de origem diferente, e sendo ambos classificados como 50/70, foi possível observar pequenas variações na rigidez das misturas. A -10°C e $21,1^{\circ}\text{C}$ a rigidez da mistura M1L1 se apresentou maior que os valores de rigidez da mistura M1R, sendo esses valores maiores em torno de 1,5%. A $4,4^{\circ}\text{C}$ ambas as misturas, M1L1 e M1R, apresentaram rigidezes semelhantes. Porém, nas temperaturas mais elevadas, $37,8^{\circ}\text{C}$ e $54,4^{\circ}\text{C}$, as diferenças entre os valores de rigidez se distanciam em torno de 7,8% e 29,4% respectivamente. Em todas as temperaturas analisadas, a mistura M2L2 apresenta valores de rigidez em torno de 4,1% menor em relação aos valores da mistura M1R, enquanto que em relação a mistura M1L1 esses valores variam conforme a temperatura analisada. A -10°C e $4,4^{\circ}\text{C}$ a mistura M1L1 apresenta valores de rigidez maiores em torno de 4,5% em relação a mistura M2L2, enquanto que nas temperaturas de $21,1^{\circ}\text{C}$, $37,8^{\circ}\text{C}$ e $54,4^{\circ}\text{C}$ esses valores são maiores em torno de 9,6%, 11,9% e 24,6%, respectivamente. Já entre as misturas M2L2 e M2L2C, a mistura M2L2 apresenta valores de rigidez maiores em todas as temperaturas, a -10°C em torno de 4,9%, a $4,4^{\circ}\text{C}$ em torno de 8,7%, a $21,1^{\circ}\text{C}$ em torno de 5,4% e nas temperaturas de $37,8^{\circ}\text{C}$ e $54,4^{\circ}\text{C}$ os valores são de 3,18% maiores. Quando comparada a mistura M1L1, a mistura M2L2 apresenta valores de rigidez menores, na temperatura de -10°C esses valores são de 9,38%, a $4,4^{\circ}\text{C}$ de 12,8%, a $21,1^{\circ}\text{C}$ e a $37,8^{\circ}\text{C}$ de 14,6%, e na temperatura de $54,4^{\circ}\text{C}$ os valores são ainda menores, em torno de 27%.

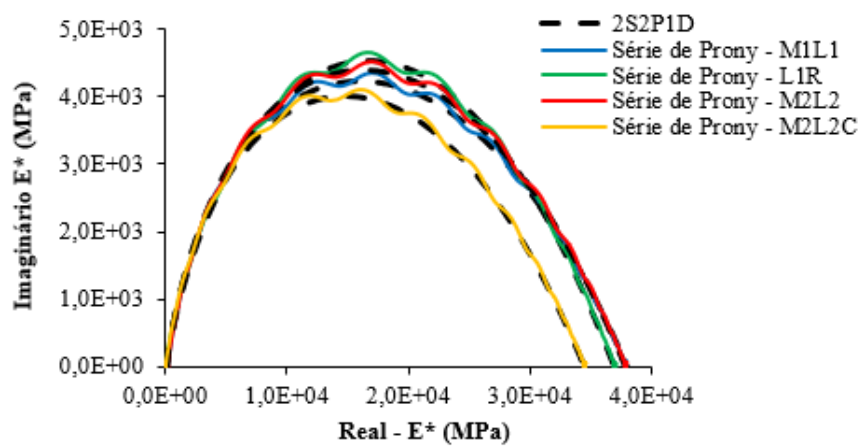
Assim como nos ligantes, nas misturas asfálticas os dados analisados foram utilizados para a previsão de propriedades por meio da Série de Prony – KVG, conforme Figura 48, no qual também foram utilizados 22 elementos. Com esta quantidade de elementos é possível notar a aproximação considerável dos modelos utilizados. O espectro de relaxação e o espectro de retardação das misturas asfálticas são apresentados nos Apêndices C e D respectivamente.

Figura 47 – Curvas isotérmicas das misturas: (a) M1L1; (b) M1R; (c) M2L2 e; (d) M2L2R



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 48 – Comparação da Série de Prony – KVG com $2S2PID$ das misturas

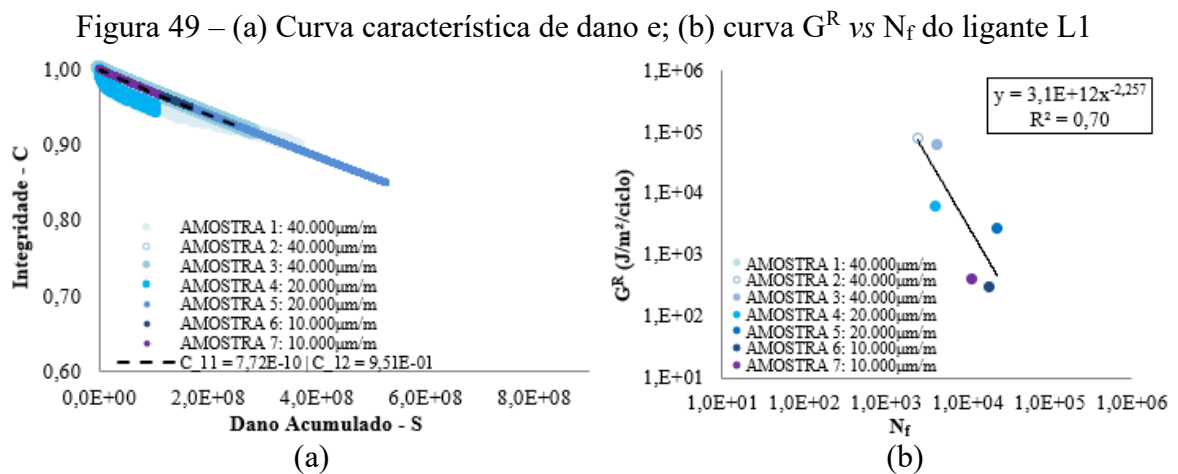


Fonte: Elaborada pela autora.

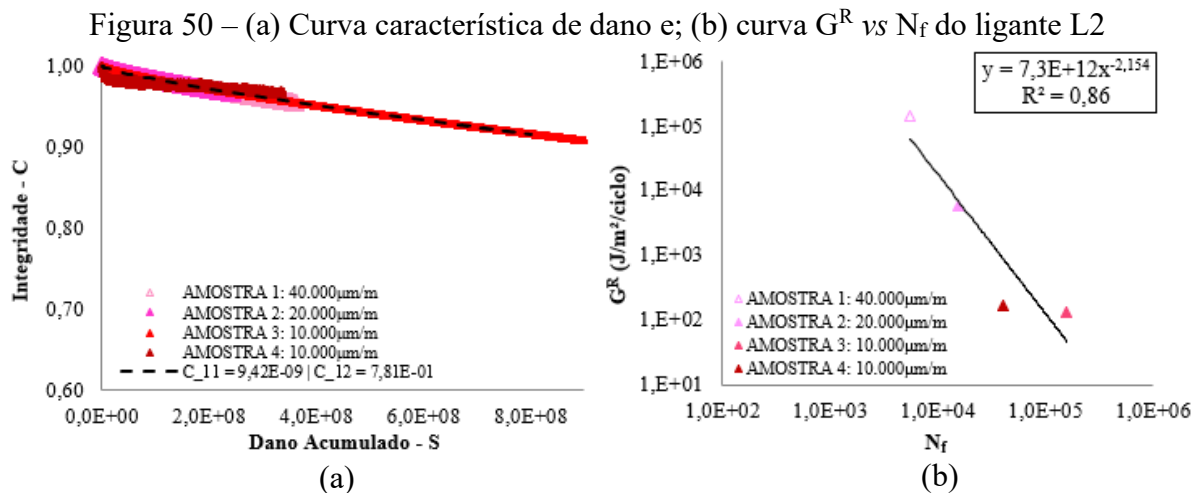
4.2 Dano por Fadiga

4.2.1 Fadiga nos Ligantes Asfálticos

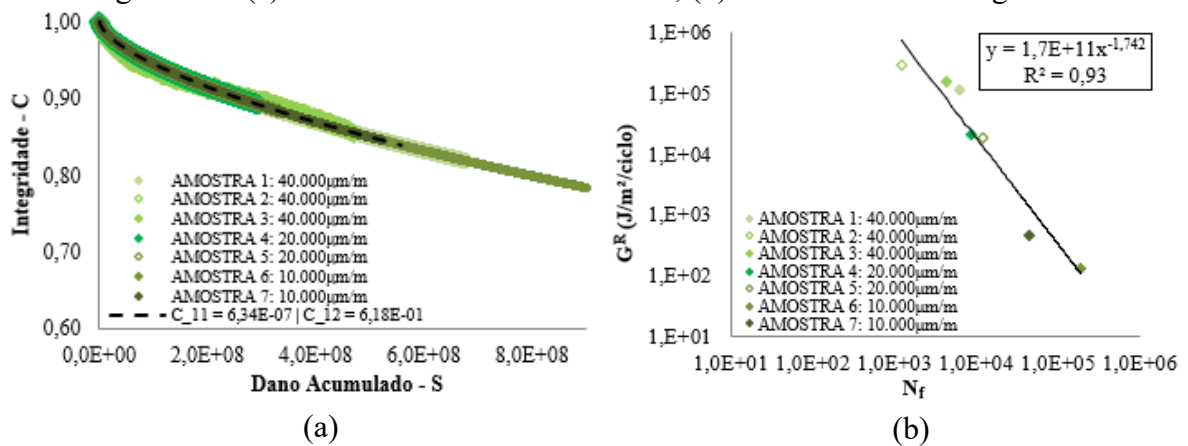
Com base nos dados experimentais e da Série de Prony após a realização do ensaio de módulo as curvas de caracterização de dano e G^R vs N_f dos ligantes asfálticos são ajustadas, conforme Figura 49 a 51. Observa-se que a correlação da dissipação média de energia de pseudo-deformação com a vida de fadiga mostra valor bom de R^2 para o ligante L1 e L2 e um valor excelente de R^2 para o ligante R. Na Tabela 18 são apresentados os valores médios da relação de módulo dinâmico ($DMR_{\text{médio}}$), da integridade ($C_{\text{médio}}$) e do dano acumulado ($S_{\text{médio}}$) utilizados na falha dos materiais, e os seus coeficientes de variação.



Fonte: Elaborada pela autora.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 51 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f do ligante R

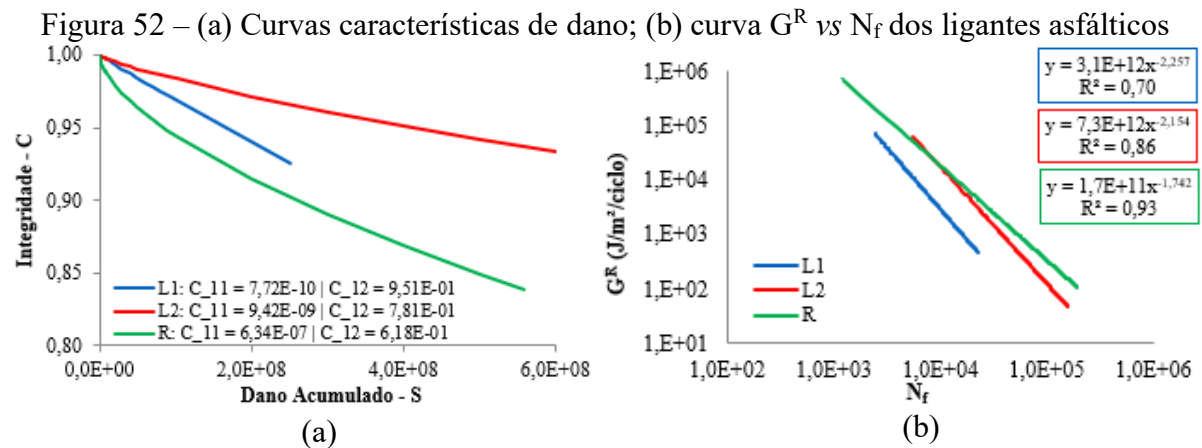
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 18 – $C_{\text{médio}}$, $S_{\text{médio}}$ e $DMR_{\text{médio}}$ dos ligantes asfálticos

Ligante	$C_{\text{médio}}$		$S_{\text{médio}}$		$DMR_{\text{médio}}$	
	Valor médio	CV (%)	Valor médio	CV (%)	Valor médio	CV (%)
L1	0,93	5%	188764363	63%	1,64	13%
L2	0,93	7%	736739261	99%	1,56	19%
R	0,95	2%	631323713	99%	1,44	10%

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme apresentado na Tabela 18 nota-se que os valores de $DMR_{\text{médio}}$ são maiores que 1, pois para a realização do ensaio de módulo utilizou-se a amostra de ligante com apenas 1 processo de aquecimento, enquanto que para os ensaios de fadiga os ligantes sofreram um pouco mais de aquecimento já que estes foram realizados tempos depois do ensaio de módulo. Analisando as curvas apresentadas na Figura 52, nota-se que para os mesmos valores de dano acumulado, o ligante R apresenta menores valores de integridade que o ligante L1. Enquanto isso, para um mesmo valor de N_f o ligante L1 apresenta menores valores de G^R que o ligante R. Os valores dos coeficientes de ajuste das curvas de dano (C_{11} e C_{12}) e o parâmetro de dano α utilizados no ajuste das curvas são apresentados na Tabela 19.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 19 – Parâmetros de fadiga dos ligantes asfálticos

Mistura	Parâmetros		
	C_{11}	C_{12}	α
L1	7,72E-10	9,51E-01	2,507
L2	9,42E-09	7,81E-01	2,517
R	6,34E-07	6,18E-01	2,579

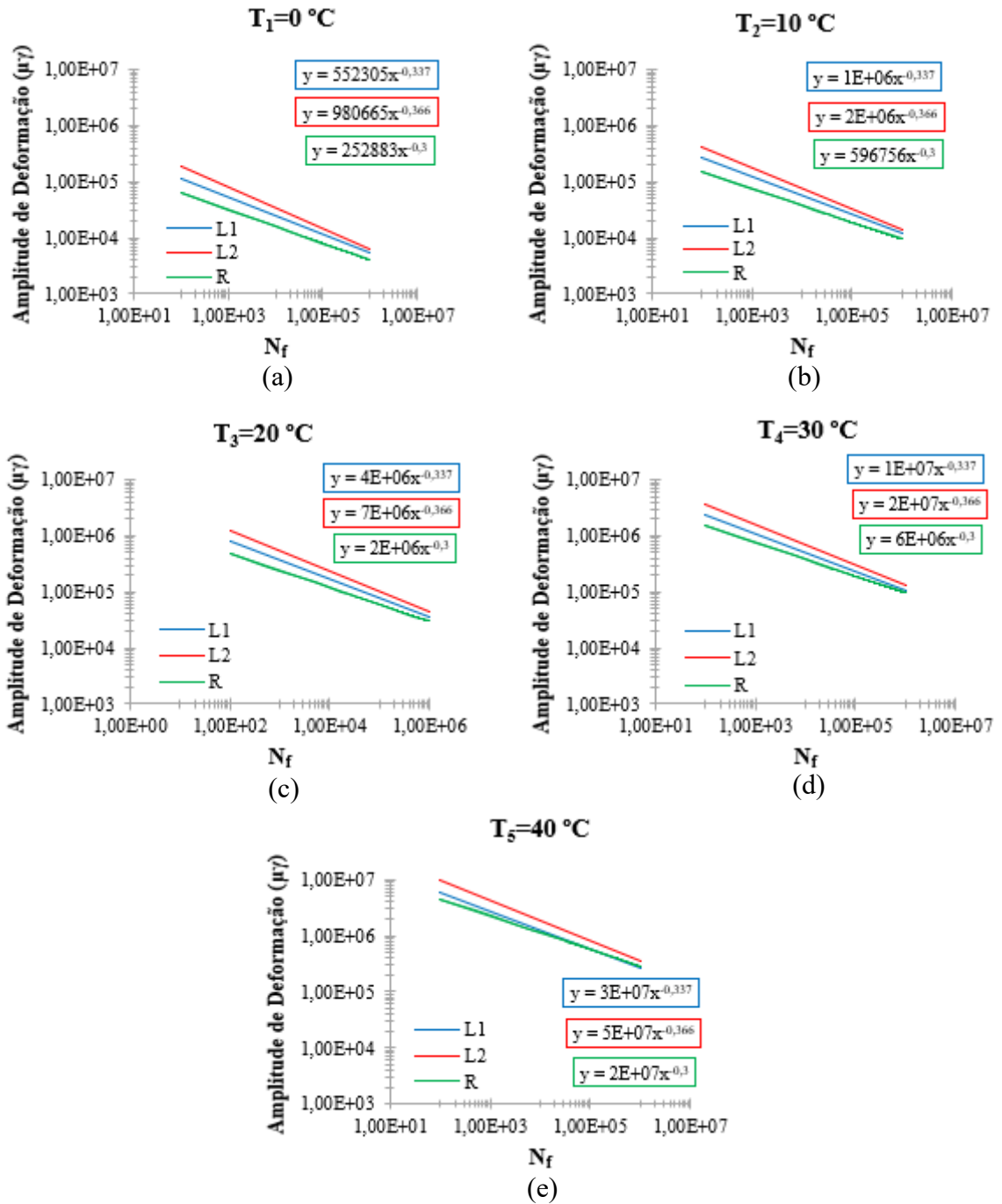
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.2 Simulação do Comportamento dos Ligantes Asfálticos

Devido à diferença de rigidez dos ligantes investigados só é possível determinar qual ligante possui melhor comportamento quanto à fadiga após as simulações, não sendo possível fazer essas determinações apenas observando os resultados de ensaio. A simulação do comportamento quanto à fadiga dos ligantes é realizada após a obtenção dos modelos de danos, obtidos a partir dos dados experimentais de ensaio. A Figura 53 apresenta as simulações das deformações suportadas por cada mistura analisada. Para realizar as simulações escolheu-se nove diferentes N_f alvo e cinco temperaturas diferentes para se obter as respectivas respostas de deformações em cada situação. Os valores escolhidos para o N_f foram $1,0 \cdot 10^6$; $5,0 \cdot 10^5$; $1,0 \cdot 10^5$; $5,0 \cdot 10^4$; $1,0 \cdot 10^4$; $5,0 \cdot 10^3$; $1,0 \cdot 10^3$; $5,0 \cdot 10^2$ e $1,0 \cdot 10^2$, e as temperaturas escolhidas foram de 0°C , 10°C , 20°C , 30°C e 40°C .

Analisando a Figura 53 observa-se que, o ligante L2 resiste a maiores deformações que os demais ligantes em todas as temperaturas analisadas. À medida que a temperatura aumenta, a diferença de desempenho entre os ligantes L1 e R se torna menor, apresentando mesmo desempenho na temperatura de 40°C com o aumento do valor do N_f . Enquanto que, a diferença entre os ligante L1 e L2 nos valores mais elevados de N_f aumenta à medida que a temperatura também aumenta.

Figura 53 – Curvas de simulação da fadiga a N_f constante a partir dos dados experimentais de ensaio dos ligantes asfálticos para as seguintes temperaturas: (a) 0°C; (b) 10°C; (c) 20°C; (d) 30°C; (e) 40°C



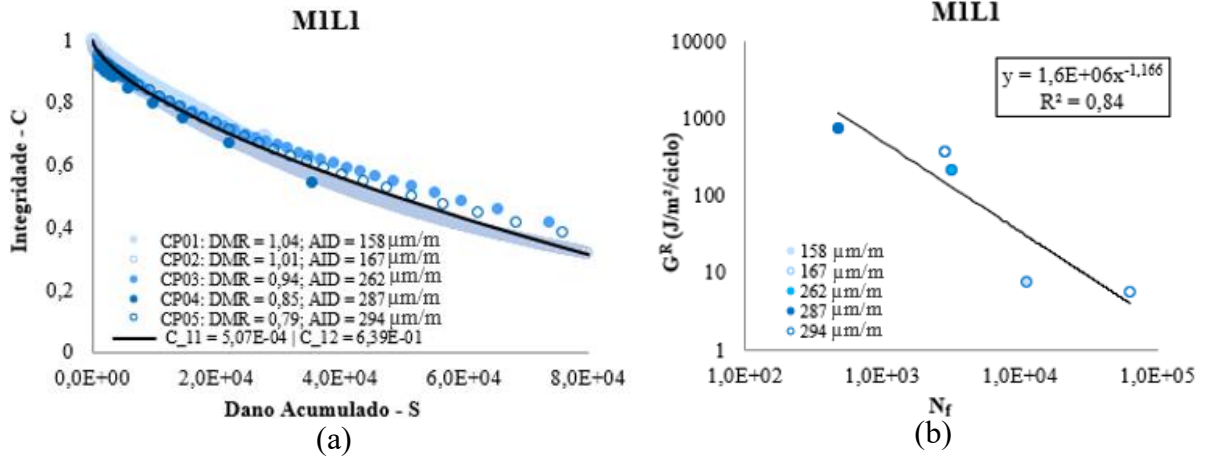
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Fadiga nas Misturas Asfálticas

A partir dos dados experimentais e da Série de Prony obtida após a realização do ensaio de módulo dinâmico, as curvas características de dano das misturas são ajustadas

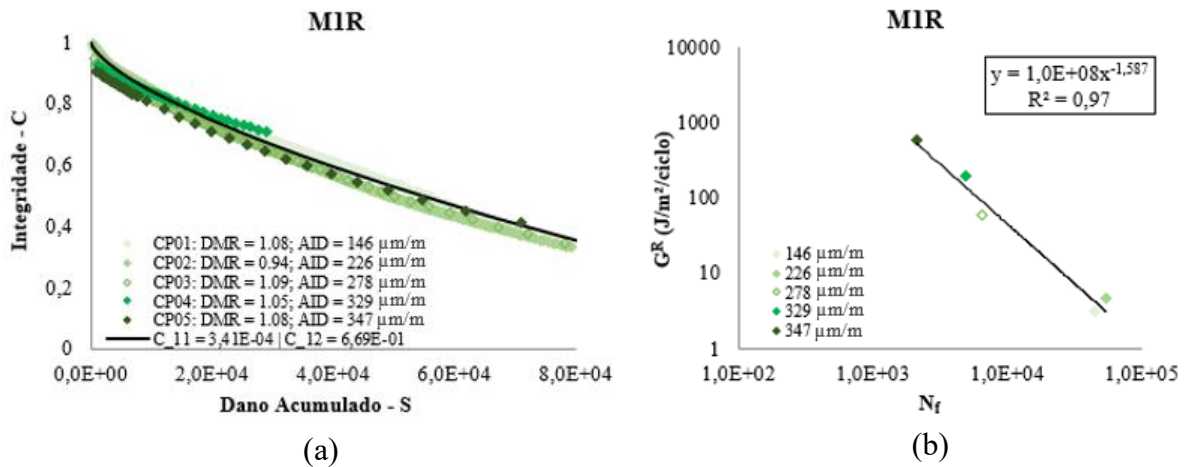
utilizando-se a Lei de Potência e as curvas G^R vs N_f , conforme Figura 54 a 57. Os valores da correlação da dissipação de energia de pseudo-deformação com a vida de fadiga mostram valores elevados de R^2 para todas as misturas analisadas.

Figura 54 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura MIL1



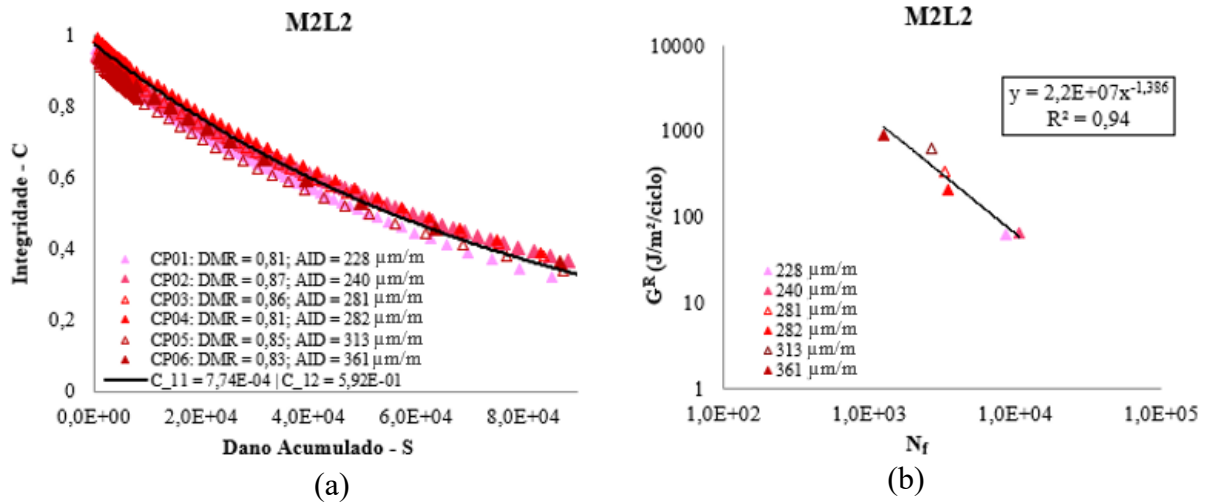
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 55 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M1R



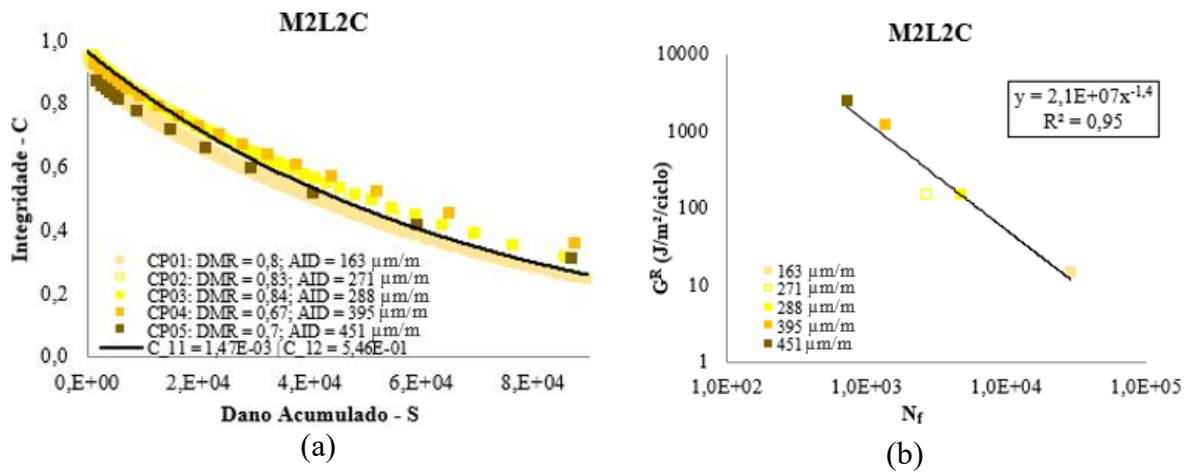
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 56 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M2L2



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 57 – (a) Curva característica de dano e; (b) curva G^R vs N_f da mistura M2L2C



Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores médios da relação de módulo dinâmico ($DMR_{\text{médio}}$), da integridade ($C_{\text{médio}}$) e do dano acumulado ($S_{\text{médio}}$) utilizados na falha dos materiais, e os seus coeficientes de variação, em ambas as temperaturas analisadas, são apresentados na Tabela 20.

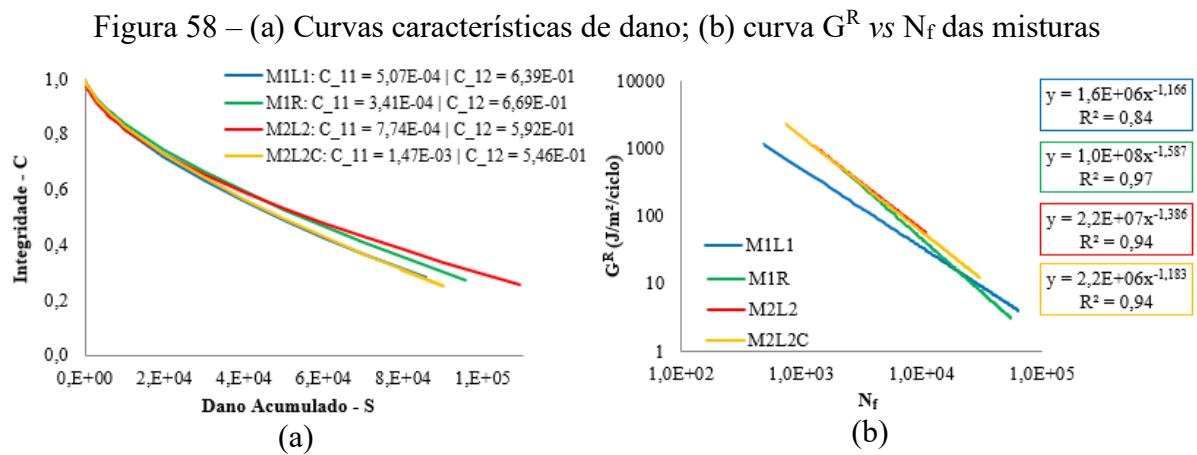
Tabela 20 – $C_{\text{médio}}$, $S_{\text{médio}}$ e $DMR_{\text{médio}}$ das misturas

Mistura	$C_{\text{médio}}$		$S_{\text{médio}}$		$DMR_{\text{médio}}$	
	Valor médio	CV (%)	Valor médio	CV (%)	Valor médio	CV (%)
M1L1	0,39	50%	79243	55%	0,93	42%
M1R	0,27	21%	112587	26%	1,01	11%
M2L2	0,25	19%	125056	18%	0,84	3%
M2L2C	0,31	25%	88549	24%	0,77	10%

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 58, nota-se que para os mesmos valores de dano acumulado a mistura M2L2 apresenta maiores valores de integridade, acompanhada da mistura M2L2C. As misturas M1L1 e M1R, apesar de serem misturas com formulações parecidas, apresentam curvas com comportamento diferente, enquanto que, as misturas M1L1 e M2L2C apresentam semelhanças na curva de dano, apesar de não serem misturas com as mesmas formulações. Observa-se que a adição de 5% de cinzas em uma mistura, quase não altera o seu comportamento quanto a vida de fadiga.

Com base no ajuste dos dados experimentais nas duas temperaturas utilizadas e a partir da série de Prony de cada mistura obteve-se os valores dos coeficientes de ajuste das curvas de dano (C_{11} e C_{12}) e o parâmetro de dano α , conforme apresentado na Tabela 21.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 21 – Parâmetros de fadiga das misturas

Mistura	Parâmetros		
	C_{11}	C_{12}	α
M1L1	5,07E-04	6,39E-01	3,053
M1R	3,41E-04	6,69E-01	3,076
M2L2	7,74E-04	5,92E-01	3,086
M2L2C	1,47E-03	5,46E-01	2,943

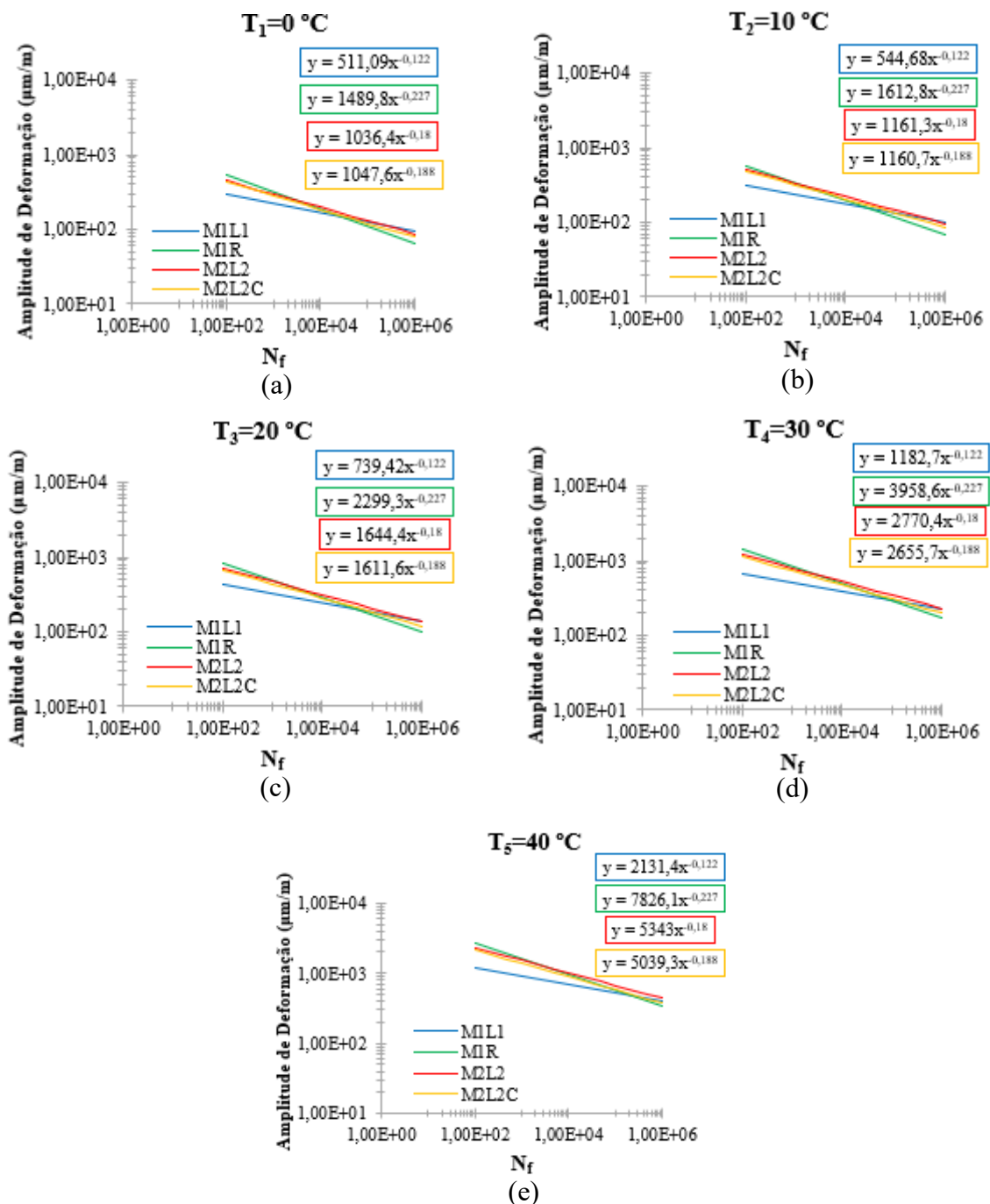
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.4 Simulação do Comportamento das Misturas Asfálticas

Assim como no dano por fadiga nos ligantes asfálticos, nas misturas também há diferenças de rigidez entre as misturas testadas, sendo necessário realizar as simulações para poder determinar qual mistura possui o melhor comportamento quanto à fadiga. A simulação

do comportamento quanto à fadiga das misturas asfálticas também é realizada após a obtenção dos modelos de dano. A Figura 59 apresenta as simulações das deformações suportadas por cada mistura analisada. Os valores escolhidos para o N_f alvo e as temperaturas utilizadas na simulação são os mesmos escolhidos para os ligantes asfálticos.

Figura 59 – Curvas de simulação da fadiga a N_f constante a partir dos dados experimentais de ensaio das misturas asfálticas para as seguintes temperaturas: (a) 0°C; (b) 10°C; (c) 20°C; (d) 30°C; (e) 40°C



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a Figura 59 observa-se que, a mistura M1R resiste a maiores deformações que as demais quando os valores de N_f são baixos. À medida que o valor de N_f sobe, a mistura perde mais rapidamente a capacidade de resistir as deformações se comparada as demais misturas. Isso ocorre em todas as 5 temperaturas simuladas. Observa-se também que, em todas as temperaturas simuladas, as misturas se cruzam em algum ponto do gráfico, demonstrando que a mistura que aparentemente tem melhor desempenho em um determinado valor de N_f , não necessariamente também terá melhor resultado em outros valores.

De acordo com a norma Europeia EN 12697-24 (2012), determina-se o valor de nível 6 (1.10^6 ciclos) como o que está associado a vida de fadiga. No valor de N_f igual a 1.10^6 ciclos observa-se que nas simulações à 0°C , 10°C e 20°C os melhores resultados na vida de fadiga das misturas analisadas foram $M1L1 > M2L2 > M2L2C > M1R$. Nas simulações à 30°C e 40°C essa ordem de resultados muda levemente, sendo $M2L2 > M1L1 > M2L2C > M1R$.

À medida que as temperaturas simuladas aumentam, a diferença da capacidade de resistir as deformações diminui entre as misturas M1L1 e M2L2, e entre as misturas M1R e M2L2C, enquanto que, a diferença entre a mistura M2L2 e M2L2C aumenta levemente, principalmente nos valores mais elevados de N_f . A cada aumento de temperatura, as misturas asfálticas apresentam uma maior capacidade de resistir a deformações, por volta de 8,6%, 28,4% 39,8% e 47,3% para os intervalos de 0°C para 10°C , 10°C para 20°C , 20°C para 30°C e 30°C para 40°C , respectivamente. Portanto, quanto mais elevada a temperatura, maior a capacidade da mistura resistir ao dano por fadiga. Trata-se de um resultado bastante relevante, sobretudo quando se vem apontando a importância da consideração da temperatura e também frequência das cargas em dimensionamentos mecânico-empíricos no Brasil (Santiago, 2017; Santiago *et al.*, 2018; Oliveira, 2019; Santos *et al.*, 2019).

4.2.5 Fator de Fadiga

A comparação do desempenho de ligantes asfálticos quanto à vida de fadiga com o de suas respectivas misturas é desejável. Desta forma foi verificado se o procedimento utilizado no ligante representa o seu comportamento quando aplicado nas misturas asfálticas. Para isto determinou-se o FFL e o FFM a partir das curvas de fadiga a 20°C dos materiais, conforme Tabela 22.

A partir dos dados apresentados verifica-se que os ligantes possuem praticamente o mesmo valor de FFL, sendo a diferença entre os valores muito pequena. Todavia é possível ranquear os resultados, que ficam da seguinte forma: $L2 > L1 > R$ (L2 sendo o ligante mais

resistente quanto a fadiga). As respectivas misturas dos ligantes também apresentam a mesma tendência: $M2L2 > M1L1 > M2L2C > M1R$, com os valores com pouca variação entre si. Observa-se que a mistura M2L2 e M2L2C, apesar de possuírem o mesmo ligante e o mesmo agregado, possuem diferença apenas na adição da cinza, o que leva a uma variação de 5% entre os valores de FFM. A classificação dos ligantes e das misturas que apresentam uma maior resistência ao dano, com maior vida de fadiga para as deformações simuladas, são as mesmas apresentadas pelos valores de FFL e FFM. Porém, com esses valores é possível apenas ranquear os materiais, não sendo possível determinar qual pode ou não ser utilizado na pavimentação.

Tabela 22 – Fatores de fadiga dos ligantes e das misturas a 19°C

Mistura	FFL	FFM	Classe
M1L1	2,09	1,77	2
M1R	2,04	1,61	2
M2L2	2,13	1,78	2
M2L2C		1,69	2

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Fadiga com Repouso

4.3.1 Ligante Asfáltico

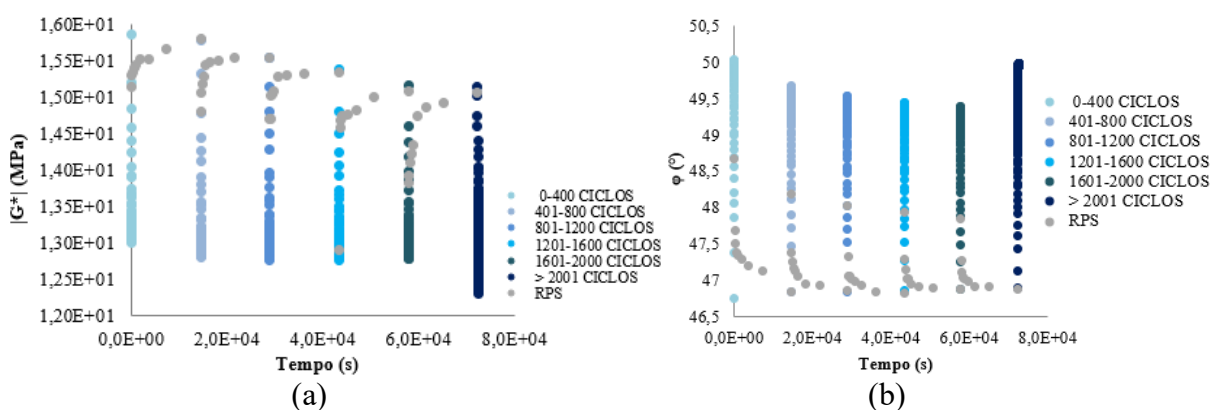
Os resultados para exemplificar o teste realizado são discutidos em detalhes nessa seção, para o ligante L1 na amplitude de $40.000\mu\text{m/m}$ e temperatura de 19°C. Esta parte do documento restringe-se a apresentar os resultados de apenas um ligante a fim de facilitar a compreensão do leitor, os demais resultados dos ligantes são apresentados no Apêndice E e seguem as mesmas tendências apresentadas para o ligante L1.

No ensaio de fadiga sem *RPs* o ligante L1 apresentou valor médio de N_f igual a 4000 ciclos na amplitude de $40.000\mu\text{m/m}$. No ensaio com *RPs* foram realizados cinco fases de repouso e seis fases de carregamento, tendo sido o material submetido a 400 ciclos ($N_f^{10\%}$) com amplitude de deformação de $40.000\mu\text{m/m}$, seguido de 4h de repouso (com quatro outras repetições de carregamento e repouso) e a última fase de carga até o rompimento da amostra.

A Figura 60 apresenta os *loops* de carga e de descanso do ensaio. Observa-se que o módulo complexo e o ângulo de fase não são totalmente recuperados após as 4h de descanso. Além disso, o valor inicial do módulo complexo em cada ciclo de carregamento parece formar uma linha reta, enquanto que o ângulo de fase se recupera quase que totalmente após o repouso.

O valor final do ângulo de fase em cada ciclo de carregamento de $N_f^{10\%}$ decaí, também formando uma linha reta entre os valores. Durante os *RPs*, os valores do módulo complexo e do ângulo de fase se recuperam à medida em que o tempo de descanso aumenta.

Figura 60 – Resultados experimentais do ligante L1 para testes de *RPs* com 5 fases de carregamento com $N_f^{10\%}$ à amplitude de $40.000\mu\text{m/m}$ e repouso de 4h entre os carregamentos e uma fase de carga até o rompimento: (a) módulo complexo em função do tempo e; (b) o ângulo de fase em função do tempo

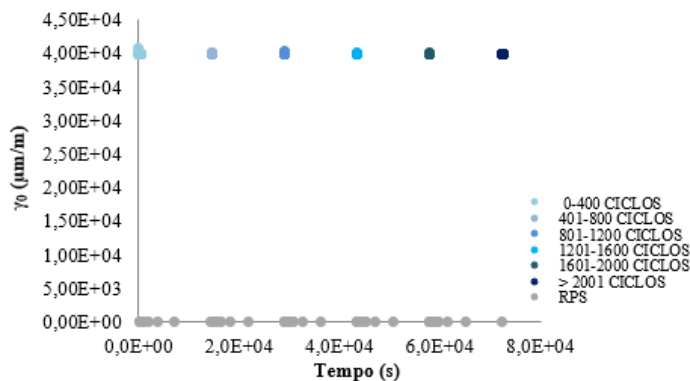


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 61, é visto que a amplitude de deformação na amostra é bem controlada em torno do que foi planejado para o ensaio. Portanto, o carregamento utilizado é com amplitude constante ao longo dos períodos de carregamento. Observa-se também que durante os períodos de repouso, a amplitude de deformação usada para medir o módulo complexo é desprezível se comparada à amplitude de deformação utilizada nos ciclos de carregamento, demonstrando que o carregamento utilizado para medir o módulo complexo não causa dano à amostra.

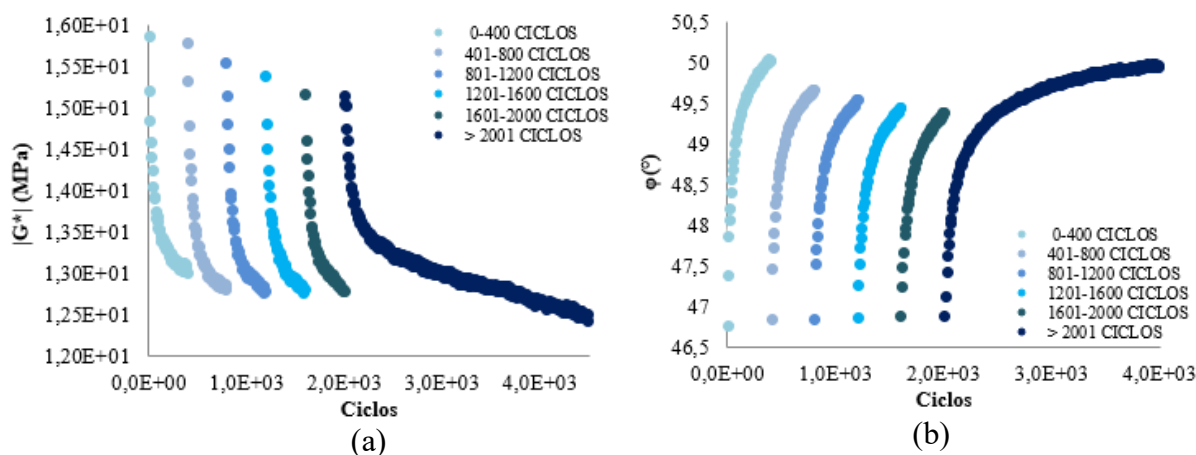
O valor de $N_{f\text{ médio}}$ para o ensaio de fadiga com *RPs* foi de 4020 ciclos para o teste com as mesmas características de carregamento do ensaio de fadiga sem *RPs*. Não houve incremento de N_f (adição de vida de fadiga) quando se utilizou períodos de repouso entre os carregamentos de ensaio, o que sugere que o ligante asfáltico não tem a capacidade de se regenerar entre os períodos de repouso de 4h a 19°C (com um total de $5 \times 4 = 20\text{h}$ de repouso ao longo do ensaio) e que a recuperação parcial do módulo complexo e do ângulo de fase do material deve decorrer principalmente de outros fenômenos, como por exemplo a tixotropia ou a mudança de temperatura interna do material durante o ensaio. Trata-se de fenômenos diferentes do dano por fadiga em natureza, pois são essencialmente reversíveis.

Figura 61 – Resultados experimentais da amplitude de deformação em função do tempo do ligante L1 para testes de *RPs*: 5 fases de carregamento com $N_f^{10\%}$ à amplitude de $40.000\mu\text{m}/\text{m}$ e repouso de 4h entre os carregamentos e uma fase de carga até o rompimento



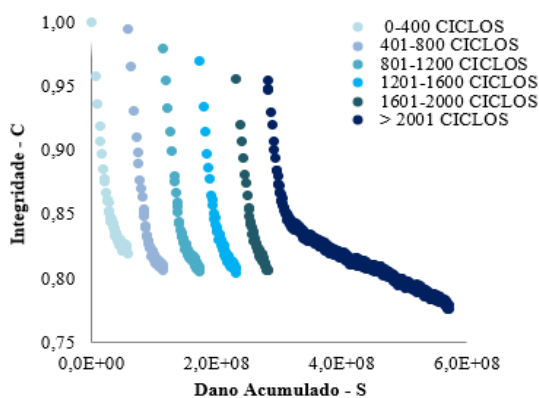
Na Figura 62, são apresentados os resultados experimentais a partir dos ciclos de carregamento. Na Figura 62(a), é possível observar que o módulo complexo inicial em cada ciclo de carga é menor que o módulo complexo inicial do ciclo de carga anterior. Os valores nos ciclos iniciais, plotados em função do número de ciclos, parecem formar uma linha reta em declínio. Na Figura 62(b), mostra-se que o ângulo de fase parece se recuperar quase por completo após o repouso de 4h, havendo apenas uma leve inclinação entre os valores iniciais após os *RPs*. Os valores de ângulo de fase se recuperam em torno de 99%, após o repouso de 4h, em relação aos valores variados durante o carregamento. Observações semelhantes foram feitas por Babadopulos *et al.* (2019).

Figura 62 – Resultados experimentais do ligante L1 para testes de *RPs* à amplitude de $40.000\mu\text{m}/\text{m}$: (a) módulo complexo em função do número de ciclos aplicados e; (b) o ângulo de fase em função do número de ciclos aplicados



A partir dos dados experimentais e da Série de Prony obtida após a realização do ensaio de módulo dinâmico, também foram construídas as curvas características de dano para os ensaios de fadiga com repouso. Foi construída a curva característica de dano, que apresenta valor de integridade recuperado (já que é função do valor de módulo) para cada *loop* de carregamento, conforme Figura 63. Assim como ocorreu com o valor do módulo complexo ao longo do ensaio de fadiga, o valor inicial de integridade (C) das curvas experimentais de cada *loop* de carregamento é menor que o valor inicial da curva do ciclo de carga anterior. Fica evidenciado então que durante o período de descanso há uma recuperação parcial do módulo complexo e consequentemente do valor calculado da integridade do material. É possível que parte do valor não recuperado seja devido ao dano por fadiga, enquanto os valores recuperados durante o descanso podem ser em virtude de fenômenos reversíveis. Isto poderá ser verificado mais adiante a partir da análise dos valores de número de ciclos de ruptura, comparando resultados com e sem períodos de repouso.

Figura 63 – Curva de característica de dano do ligante L1 para testes de *RPs* à amplitude de à amplitude de $40.000\mu\text{m}/\text{m}$



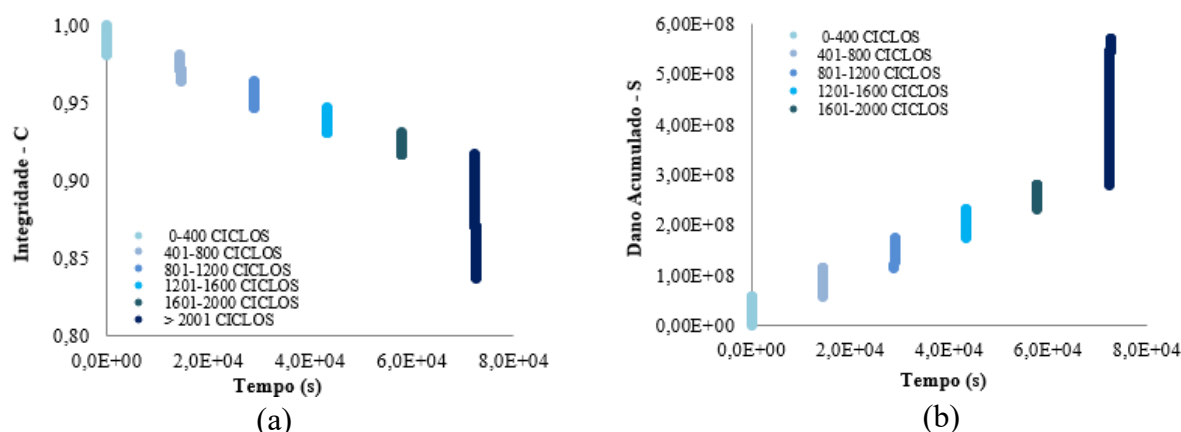
Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores de integridade (C) e do dano acumulado (S) em função do tempo constam na Figura 64. Estes apresentam a mesma tendência observada na curva característica de dano, onde há a recuperação parcial dos valores após os períodos de repouso. Os valores iniciais em cada ciclo de carregamento formam uma linha reta em declínio para a curva da integridade e uma linha reta em ascensão para a curva do dano acumulado.

A energia dissipada durante os ciclos de carregamento é apresentada na Figura 65, a qual diminui à medida que o número de ciclos aumenta, em virtude da diminuição do módulo complexo e do aumento do ângulo de fase. Babadopulos *et al.* (2019) demonstrou que a energia dissipada se transforma parcialmente em calor, induzindo o aumento da temperatura durante os

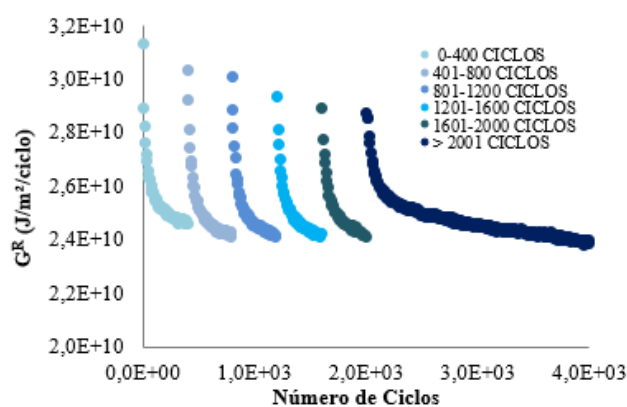
ciclos de carregamento. O referido aumento de temperatura depende da geometria de ensaio. Na geometria utilizada no referido trabalho, que apresenta maior volume que os ensaios no *DSR*, observou-se a um aumento em torno de 5°C para amplitudes de deformação de $20.000\mu\text{m/m}$. Devido à termo-susceptibilidade do ligante asfáltico, para que a variação no módulo complexo pudesse ser um parâmetro utilizado como indicador para o fenômeno de dano, seria necessário manter a temperatura constante durante todo o período de ensaio, o que na prática não é possível.

Figura 64 – Dados do ligante L1 para testes de *RPs* à amplitude de $40.000\mu\text{m/m}$ e repouso de 4h entre os carregamentos: (a) Integridade do material em função do tempo e; (b) o dano acumulado em função do tempo



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 65 – Energia dissipada do ligante L1 em função do número de ciclos aplicados durante as fases de carregamento à amplitude de $40.000\mu\text{m/m}$



Fonte: Elaborada pela autora.

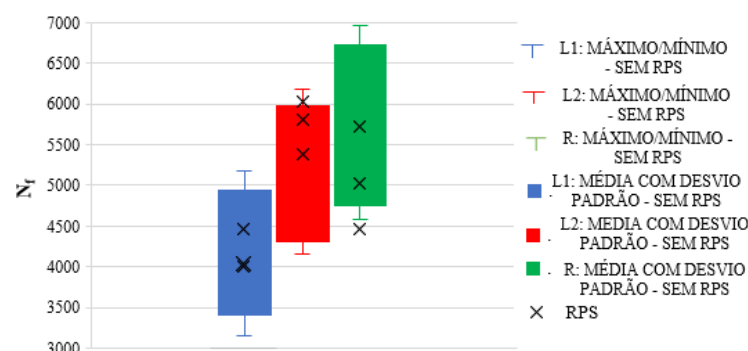
Devido à intervenção de diferentes fenômenos no valor de rigidez do material, e consequentemente do valor calculado de integridade, apenas a observação dos gráficos resumo

dos resultados do ensaio de fadiga com *RPs* não é suficiente para determinar a existência ou não do fenômeno designado como *healing*. Para a consideração da existência do *healing*, em que há expectativa de uma cicatrização de trincas durante *RPs* é necessário observar um incremento do valor do número de ciclos até a falha do material (N_f), de maneira que o valor de N_f com repouso precisa ser maior que o valor do N_f sem repouso.

Para realizar esta análise, utilizou-se a média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos dos resultados do N_f obtidos em laboratório. Sendo o desvio padrão usado na soma e na subtração com a média em cada situação. Das Figura 66 a Figura 68 são apresentados os resultados dos valores de N_f para cada amplitude de deformação usada no ensaio. Observa-se que em todas as amostras dos ligantes (L1, L2 e R) e em todas as amplitudes de deformação aplicadas, os valores de N_f para o ensaio com *RPs* se encontram dentro dos limites de valores médios e dos desvios padrões, de maneira que não houve observação de incremento significativo de N_f com o repouso. Foi observada apenas uma amostra do ligante L2 um pouco acima desses valores, porém menor que o valor máximo obtido no ensaio de fadiga sem *RPs*.

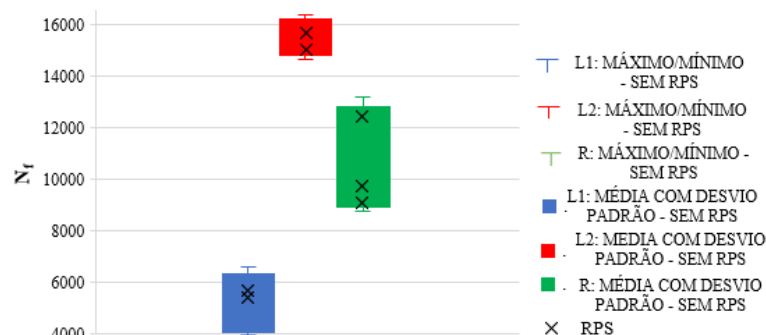
Apesar da aplicação do descanso e da observação de uma recuperação do módulo complexo durante este período, é observado que não há incremento do valor de N_f nos ligantes investigados na pesquisa. De acordo com a literatura os fenômenos reversíveis são capazes de produzir essa variação no módulo complexo do material durante o período de carregamento e de serem reversíveis durante o período de descanso. Tal variação leva a alterações na curva C vs S calculada (e que poderia ser utilizada em modelagem de fadiga), mas não há aumento no valor da vida de fadiga obtida experimentalmente do material. Diversos autores consideram que esta variação do módulo complexo por vezes pode ser maior do que a variação do módulo devido ao dano por fadiga (Di Benedetto *et al.*, 1996; Di Benedetto *et al.*, 2004; Gauthier *et al.*, 2010; Mangiafico, 2014; Canestrari *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2015; Babadopulos, 2017; Phan *et al.*, 2017).

Figura 66 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de $40.000\mu\text{m}/\text{m}$



Fonte: Elaborada pela autora.

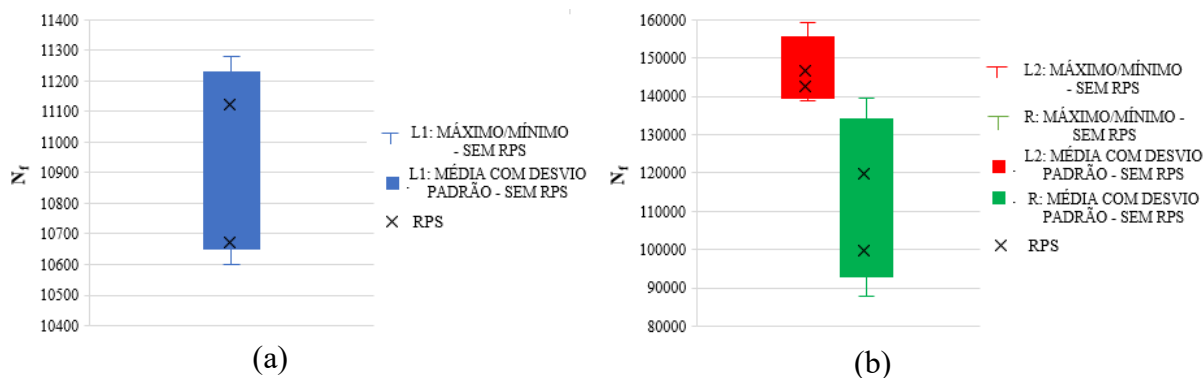
Figura 67 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de 20.000 $\mu\text{m}/\text{m}$



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 68 – Valores de N_f dos ligantes para a amplitude de deformação de 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a)

L1; (b) L2 e R



Fonte: Elaborada pela autora.

Alguns pesquisadores avaliaram a capacidade de recuperação dos materiais asfálticos através da aplicação de *RPs* na realização dos ensaios cíclicos em laboratório, alguns apontam para a existência de auto-cicatrização no material asfáltico, enquanto outros concluem que os fenômenos reversíveis podem ser confundidos com a auto-cicatrização (Daniel e Kim, 2001; Mangiafico, 2014; Moreno-Navarro *et al.*, 2015; Ayar *et al.*, 2016; Babadopulos, 2017; Lv *et al.*, 2017; Moreno-Navarro *et al.*, 2017). Na presente pesquisa verificou-se que os *RPs* para este ensaio não influenciam no resultado experimental de vida de fadiga (N_f) dos ligantes.

4.3.2 Mistura Asfáltica

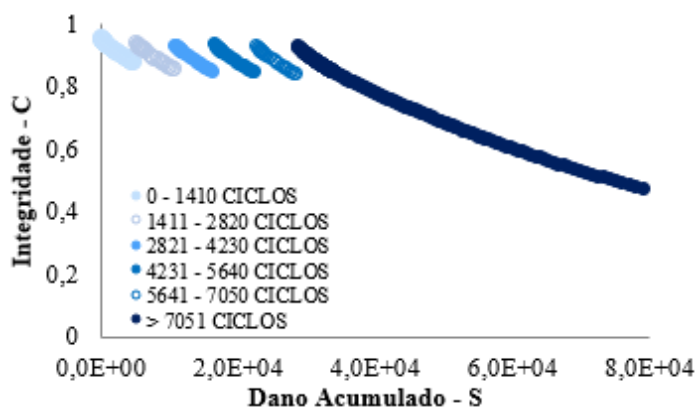
Os resultados para exemplificar o teste realizado nas misturas asfálticas são discutidos em detalhe nessa seção para a mistura M1L1. Restringe-se a uma única mistura esta parte do documento para facilitar a compreensão do leitor, sendo que os resultados das demais

misturas são colocados no Apêndice F, adiantando-se que os mesmos estão bastante alinhados com as observações aqui apresentadas.

No ensaio de fadiga sem *RPs* a mistura M1L1 apresentou valor médio de N_f igual a 14100 ciclos na amplitude de $200\mu\text{m/m}$. Assim como no ensaio de fadiga nos ligantes, nas misturas asfálticas foram realizadas cinco fases de repouso e seis fases de carregamento, submetido a 1410 ciclos ($N_f^{10\%}$) nas cinco primeiras fases de carregamento, seguido de 4h de repouso entre as fases de carregamento e a última fase de carga que vai até ao rompimento do material.

A curva característica de dano para cada *loop* de carregamento é apresentada na Figura 69. Observa-se que a configuração da curva acompanha os resultados apresentados nos ligantes, em que o valor inicial das curvas experimentais de cada *loop* de carregamento é menor que o valor inicial da curva do ciclo de carga anterior. Portanto, nas misturas também não há uma recuperação total do módulo complexo e da integridade do material.

Figura 69 – Curva de característica de dano da mistura M1L1 com AID $200\mu\text{m/m}$



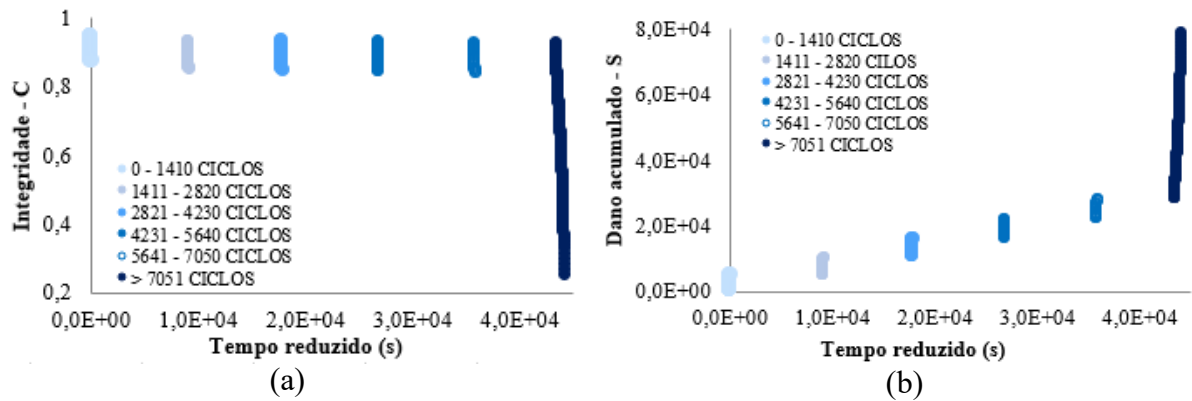
Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores de integridade (C) e do dano acumulado (S) em função do tempo constam na Figura 70. Estes apresentam a mesma tendência observada nos dados dos ligantes, onde há a recuperação parcial dos valores após os períodos de repouso. Os valores iniciais em cada ciclo de carregamento formam levemente uma linha reta em declínio para a curva da integridade e uma linha reta em ascensão para a curva do dano acumulado.

Para as misturas também foi realizada a análise dos valores de N_f utilizando-se a média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos dos resultados do N_f obtidos em laboratório. Cada mistura asfáltica usada possui as deformações iniciais estabelecidas, não sendo as mesmas para todas as misturas. As deformações de $200\mu\text{m/m}$ e de $300\mu\text{m/m}$ são

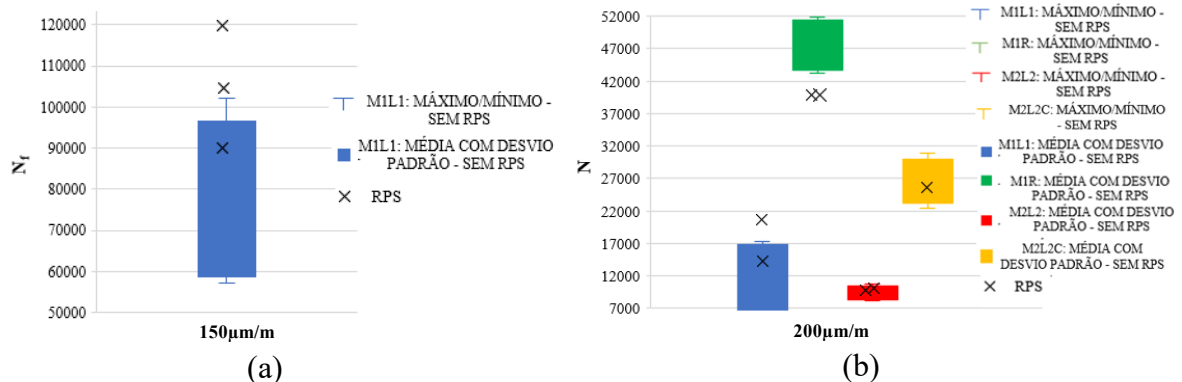
comuns entre todas e os resultados de N_f para estas deformações são apresentados nas Figura 71(b) e Figura 71(d) respectivamente. Os resultados relativos as demais AID estão apresentados nas Figura 71(a), (c) e (e). Observa-se que em todas as misturas e em todas as amplitudes de deformação inicial os valores de N_f estão abaixo ou dentro dos limites dos valores médios e dos desvios padrões apresentados pelos resultados de fadiga sem repouso. Observou-se apenas alguns CPs apresentando valor de N_f maior do que o valor máximo apontado pelos resultados de fadiga sem repouso.

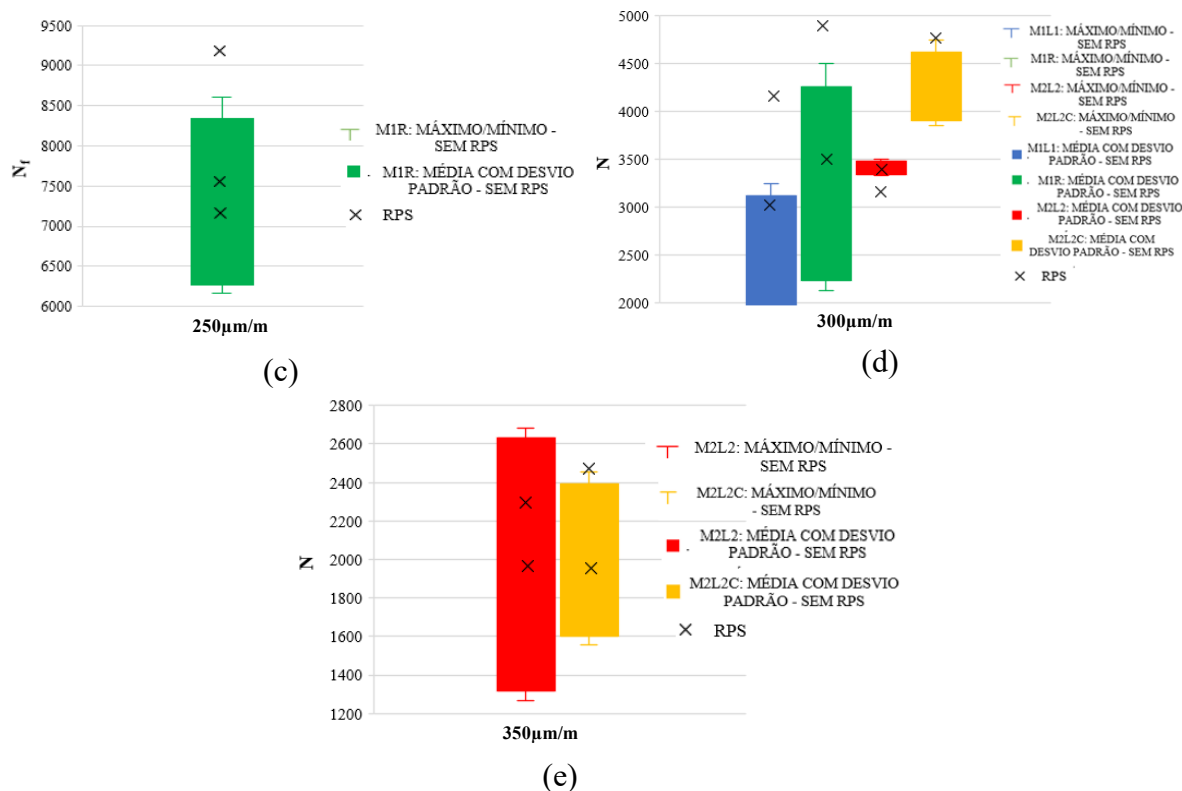
Figura 70 – Dados da mistura MIL1: (a) Integridade do material em função do tempo e; (b) o dano acumulado em função do tempo



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 71 – Valores de N_f das misturas para as amplitudes de deformação de: (a) 150 μ m/m; (b) 200 μ m/m; (c) 250 μ m/m; (d) 300 μ m/m; (e) 350 μ m/m





Fonte: Elaborada pela autora.

Assim como observado no resultado final de fadiga dos ligantes, nas misturas a variação do N_f do ensaio com repouso em relação ao ensaio sem repouso foi muito baixa, onde apenas algumas amostras apresentaram valores de N_f acima do esperado. Para um total de 24 amostras analisadas, apenas seis apresentaram valores de N_f acima do valor de referência obtido a partir do ensaio de fadiga sem período de repouso. Assim como apresentaram-se resultados acima do valor de referência, algumas (três) amostras apresentaram valor abaixo do de referência, 20,1% para a mistura M1L1 à amplitude de 200µm/m e 6,9% para a mistura M2L2 à amplitude de 200µm/m. As amostras com N_f acima do valor de referência apresentam entre 7,1% e 19,5% de acréscimo de vida de fadiga. Essa diferença de valores de N_f pode ser explicada pela variação natural existente entre os CPs. Apesar de as amostras possuírem os mesmos parâmetros volumétricos e mesmos materiais, sempre há variação entre a moldagem das amostras. Há também a variação que pode surgir durante a serragem dos CPs, em que alguns podem apresentar pequenas variações nas faces. Finalmente, dado que o controle do carregamento nos ensaios é feito na posição do pistão, são esperadas variações na amplitude de deformação aplicada de fato no CP, de maneira que se faz necessário um estudo específico sobre este parâmetro.

A análise da amplitude média de deformação durante cada bloco de carregamento foi realizada em todas as misturas e os resultados são apresentados na Tabela 23. Observa-se

que as amplitudes de deformação nos primeiros blocos de carregamento tendem a ser maiores. Portanto, à medida que o ensaio avança, as amplitudes de deformação diminuem.

Tabela 23 – Amplitudes médias de deformação das misturas asfálticas em cada bloco de carregamento

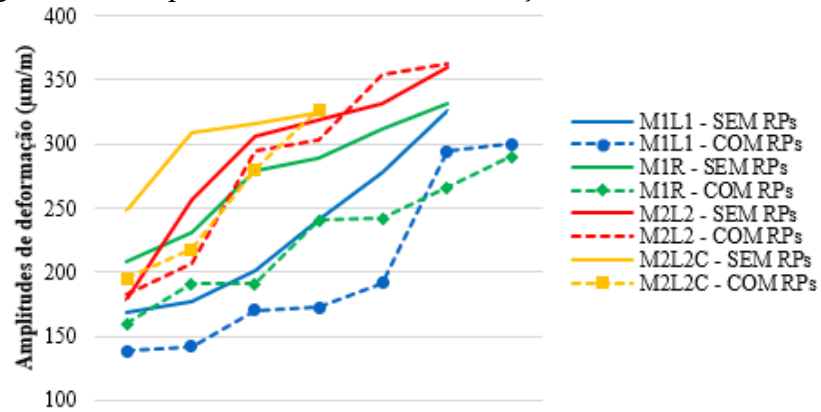
MISTURA	AMD	BLOCOS DE CARREGAMENTO					
		1	2	3	4	5	6
M1L1	150µm/m	166	149	136	129	127	123
		147	137	126	122	122	199
		177	171	171	169	167	166
	200µm/m	208	171	165	165	164	163
		199	191	190	192	192	186
		316	311	304	300	293	242
300µm/m	327	327	312	311	270	253	
	200µm/m	219	194	186	182	182	181
M1R		250µm/m	214	155	151	150	145
	230		224	215	162	161	155
	250µm/m	258	257	242	238	231	215
		257	249	220	266	230	228
		298	294	292	292	284	282
	300µm/m	274	269	267	267	264	255
200µm/m		224	175	174	173	173	173
	M2L2	300µm/m	233	204	199	199	200
334			330	315	310	288	245
350µm/m		379	385	363	349	331	318
		316	301	295	295	284	276
350µm/m		391	387	383	369	332	313
		200µm/m	285	210	244	240	261
M2L2C	300µm/m		337	329	327	290	287
		369	364	318	314	279	253
	350µm/m	360	354	318	314	306	294

Fonte: Elaborada pela autora.

Com o intuito de comparar as amplitudes de deformação dos ensaios de fadiga com e sem repouso, calculou-se a amplitude média de deformação de cada ensaio, cujos resultados são apresentados na Figura 72. Nota-se que as amplitudes de ensaio sem repouso são levemente mais severas do que as amplitudes de ensaio com repouso (de maneira que seria de se esperar vidas de fadiga um pouco maiores para os ensaios com repouso). Nos ensaios com repouso as amplitudes médias são menores, o que poderia induzir a observações que sugeririam erroneamente a existência de *healing*. Porém, o que se observa é que mesmo com valores menores, isso não foi suficiente para haver um aumento significativo do valor de N_f nas misturas. Optou-se por apresentar os valores médios totais das amplitudes de deformação dos

ensaios no lugar dos valores médios em cada bloco de carregamento (seis), pois, no ensaio sem repouso este parâmetro é melhor controlado, de maneira que não varia ao longo dos blocos de carregamento.

Figura 72 – Amplitudes médias de deformação das misturas asfálticas



Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram estudados: i) as relações de comportamento viscoelástico linear entre os ligantes asfálticos e as misturas asfálticas; e ii) o comportamento de fadiga de ligantes e misturas asfálticas; e iii) o efeito de períodos de repouso no ensaio de fadiga para ligantes e misturas asfálticas, contribuindo assim com a investigação dessas relações entre diferentes escalas e do comportamento de fadiga e recuperação de materiais asfálticos. Foram estudados também esses materiais com relação a propriedades básicas e propriedades mecânicas utilizadas no estado da prática do dimensionamento de pavimentos. Sublinha-se ainda a investigação de uma mistura asfáltica contendo cinzas como material de enchimento.

O modelo utilizado para a representação do comportamento viscoelástico linear (pequenas amplitudes e poucas repetições de carga), conhecido na literatura como *2S2PID*, se mostrou satisfatório para a modelagem do comportamento das misturas e dos ligantes asfálticos. Das 9 constantes do modelo *2S2PID* (associadas às duas constantes independentes da equação WLF que representa a superposição tempo temperatura) ajustado ao G^* de ligantes, 6 puderam ser mantidas para as suas respectivas misturas, todas ligadas a propriedades dependentes do tempo, confirmando algo já reportado na literatura, que é o fato de o comportamento viscoelástico da mistura ser herdado do ligante asfáltico. A variação das demais constantes foi descrita pela transformação conhecida na literatura como SHStS, que apresentou ajustes satisfatórios.

O ensaio de fadiga nos ligantes se mostrou satisfatório para avaliar a tolerância ao dano e previsão da curva de fadiga dos ligantes asfálticos, apesar deste possuir limitações em virtude da geometria do ensaio, que provoca distribuição não homogênea de tensões e deformações. A comparação do desempenho dos ligantes asfálticos quanto à vida de fadiga com o de suas respectivas misturas foi verificado, em que o desempenho apresentado pelos ligantes possui semelhanças com o desempenho apresentado pelas misturas. Portanto, o procedimento utilizado no ligante representa de forma satisfatória o seu comportamento quando aplicado nas misturas asfálticas. O conhecimento preliminar dos ligantes asfálticos a fim de que se conheça como este se comportará na mistura facilita a seleção e a classificação dos produtos de acordo com o seu desempenho. Conclui-se que os resultados apresentados mostram que os ligantes asfálticos podem ser adequadamente classificados quanto ao seu desempenho à fadiga utilizando as técnicas adotadas nesta pesquisa, correlacionando-se com a classificação das misturas asfálticas quanto à fadiga.

A utilização de cinzas volantes é uma alternativa para uso como aditivo em misturas asfálticas, visto que a sua utilização na pesquisa demonstrou que a mistura asfáltica com cinza se enrijeceu a baixas frequências e altas temperaturas, produzindo assim misturas com tendência de resistirem melhor a carregamentos lentos em temperaturas elevadas. Em comparação às misturas asfálticas utilizadas na pesquisa, a mistura com adição de cinza apresentou desempenho em relação ao dano por fadiga melhor do que algumas misturas produzidas sem o uso da cinza em sua composição.

Este trabalho apresenta evidências experimentais de que os valores de N_f para os ensaios de fadiga com repouso (5 ciclos de 4h cada) em ligantes são praticamente idênticos aos dos ensaios de fadiga sem repouso, tampouco tendo variação significativa nas misturas, com os mesmos períodos de repouso. Apesar de haver uma recuperação do módulo durante o período de repouso adotado (4h), esta recuperação não é observada no valor final da vida de fadiga, principalmente na escala do ligante. Portanto, a recuperação do módulo provavelmente não está associada ao fenômeno de auto-cicatrização, conhecido na literatura como *healing*, devendo estar mais relacionada a outros efeitos (de fenômenos reversíveis), como a não-linearidade, o auto-aquecimento e a tixotropia.

Observa-se que, comumente, utiliza-se a diminuição do módulo como indicador da evolução do dano, sem a consideração de outros fenômenos, de maneira que toda a recuperação do módulo deveria ser causada apenas pelo *healing*. Porém, efeitos como a variação da temperatura alteram significativamente o comportamento reológico e mecânico dos materiais viscoelásticos influenciando assim a mudança do módulo durante os ensaios. Este trabalho apresenta evidência experimental de que isto não é uma descrição adequada do comportamento do material. Para a referida consideração, seria necessária a observação de um aumento da vida de fadiga dos materiais com o repouso, indicando a re-selagem das trincas, o que não ocorreu na presente pesquisa, que considerou relativamente longos períodos de repouso em comparação a outros trabalhos na literatura. Acredita-se que o *healing* talvez possa ser observado na interface entre o agregado e o ligante, quando esta interface for testada em estudo focado nela, visto que na escala de ligante não há acréscimo do valor de N_f para nenhum dos materiais estudados e que nas misturas (onde a interface está sendo solicitada, mas talvez não contribua com a necessária relevância para produzir efeito mensurável no comportamento da mistura) a observação não produz elevações significativas de N_f . Alternativamente, talvez o efeito do *healing* requeira períodos de repouso significativamente superiores a 4h nos ensaios a temperaturas em torno dos 19°C.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se a realização de testes com mais materiais, o que poderá levar à corroboração dos resultados aqui apresentados ou à identificação de alguns materiais que possam apresentar auto-cicatrização nas condições de ensaio testadas neste trabalho. Complementarmente, faz-se necessário realizar as análises em outras temperaturas e frequências, de maneira a determinar se em outras condições de repouso e de temperatura seria possível observar a auto-cicatrização. É importante, ainda, observar se há o efeito da temperatura e da frequência de carregamento no ensaio de fadiga com períodos de repouso, principalmente no que se diz respeito a previsão de desempenho. Os resultados de fadiga com e sem repouso aqui apresentados podem ainda ser utilizados para o ajuste de modelos que representem as variações medidas de módulo (como modelos de tixotropia). Ensaio em novas temperaturas e tempos de repouso poderiam, em seguida, ser utilizados para a validação desses modelos.

O efeito da temperatura sobre o comportamento reológico e mecânico (como para o módulo complexo e fadiga do material) não pode ser negligenciado durante a caracterização. Em futuras pesquisas, para realizar o adequado estudo sobre o efeito da temperatura na rigidez do material ao longo do ensaio de fadiga sugere-se a utilização de termopares acoplados no interior e na extremidade das amostras, a fim de se observar a variação de temperatura e quantificar seu efeito na rigidez. A partir da determinação da temperatura na amostra ao longo do ensaio será possível corrigir o seu efeito durante o ensaio, evitando assim interpretações errôneas com a sobreposição dos efeitos.

Realizar testes com períodos de repouso superiores a 4 horas, a fim de se investigar mais a fundo o *healing*, visto que na pesquisa este fenômeno não produziu efeito significativo na quantidade de ciclos para a falha para o tempo de repouso (5 ciclos de 4h cada) utilizado.

Com o avanço de estudos na linha deste desenvolvimento, considerando outras questões, será possível obter uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o ensaio de fadiga e que produzem alterações no módulo complexo dos materiais. Trata-se de algo fundamental para a compreensão quanto ao efeito que a temperatura e a frequência podem ocasionar nos resultados do ensaio. Para além do ganho na compreensão, que já justifica esta linha de pesquisa, espera-se que tal compreensão possa eventualmente servir para o aperfeiçoamento de instrumentos práticos como os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, que devem considerar o efeito da temperatura e da frequência de carga nos pavimentos.

REFERÊNCIAS

AASHTO T 342. American Association of State Highway and Transportation Officials. **Determining Dynamic Modulus of HotMix Asphalt (HMA)**. Washington, 2011.

AASHTO TP 107. American Association of State Highway and Transportation Officials. **Determining the damage characteristic curve of asphalt concrete from direct tension cyclic fatigue tests**. Provisional standard, Washington, 2014.

ABO-QUDAIS S.; SULEIMAN, A. Monitoring fatigue damage and crack healing by ultrasound wave velocity. **Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 20, n. 2, p. 125–145, 2005.

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Tese (Doutorado) – Texas A&M University, College Station, Texas, 2004.

ALLEN, D. H.; SEARCY, C. R.; BERTHELOT, C. F. A Micromechanical Model for the Accelerated Characterization of Viscoelastic Constitutive Behavior of Asphaltic Concrete. **TEES Report No. CMC-2001-1**, Texas Engineering Experiment Station, College Station, 2001.

APOSTOLIDIS, P.; KASBERGEN, C.; BHASIN, A.; SCARPAS, A.; ERKENS, S. Study of Asphalt Binder Fatigue with a New Dynamic Shear Rheometer Geometry. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2018. doi: 10.1177/0361198118781378.

ARAÚJO, V. M. C. **Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas para Uso em Revestimentos Aeroportuários a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

ASTM D 7175. American Society for Testing and Materials. **Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer**. West Conshohocken, 2015.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of rest periods. **Journal Materials and Structures**, v. 51, n. 25, p. 1-10, 2018.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 28-40, 2016.

BAAJ, H.; MILHAILENKO, P.; ALMUTAIRI, H.; DI BENEDETTO, H. Recovery of asphalt mixture stiffness during fatigue loading rest periods. **Construction and Building Materials**, n. 158, p. 591-600, 2017.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **Phenomena occurring during cyclic loading and fatigue tests on bituminous materials: Identification and quantification**. 2017. 303 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Lyon (ENTPE), Lyon, 2017.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; OROZCO, G.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen, **International Journal of Fatigue**, 2019. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.008.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. **Revista Transportes**, v. 23, n. 2, 2015. ISSN: 22371346. doi: 10.14295/transportes.v23i2.898

BAHIA, H.U.; HANSON, D.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M.; ANDERSON, R. Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design. **Transportation Research Board**, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 459, 2001. ISSN: 00775614.

BARI, J.; WITCZAK, M. W. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, p. 381–423, 2006.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, v. 1, p. 520, 2007.

BOLTZMANN, L. Zur Theorie der Elastischen Nachwirkung. **Poggendorf's Annalen Physik**, v. 7, p. 624, 1876.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral. **Revista Transportes**, v. 16, n. 1, p. 36–44, 2008.

CANESTRARI, F.; VIRGILI, A.; GRAZIANI, A.; STIMILLI, A. Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders. **International Journal of Fatigue**, v. 70, p. 351–360, 2015. doi:10.1016/j.ijfatigue.2014.08.004.

CASTELO BRANCO, V. T. F.; MASAD, E.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o Aggregate Imaging System (AIMS). In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20º, 2006, Brasília. **Anais XX ANPET 2006**. Brasília: ANPET, 2006.

CASTRO, M.; SANCHEZ, J. A. Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. 2, p. 167–174, 2006.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **A indústria de agregados para construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2012.

CHRISTENSEN, R.M. **Theory of Viscoelasticity**. Academic, 2nd ed. New York, 1982.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2018.

COUTINHO, R. P. **Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. **Journal Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 71, p. 619–650, 2002.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 434–440, 2001.

DELAPORTE, B. **Étude de la rhéologie des mastics bitumineux à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement annulaire**. 2007. 248 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Lyon (ENTPE), Lyon, 2007.

DELAPORTE, B.; DI BENEDETTO, H.; CHAVEROT, P.; GAUTHIER, G. Linear viscoelastic properties of bituminous materials including new products made with ultrafine particles. **Road Materials and Pavement Design**, v. 10, p. 7–38, 2009. doi:10.1080/14680629.2009.9690180

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 133: mistura betuminosa – determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro, 5 p, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 138: misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 4 p, 1994.

DI BENEDETTO H.; NGUYEN, Q. T.; SAUZÉAT, C. Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 1, p. 129–158, 2011.

DI BENEDETTO, H.; ASHAYER SOLTANI, A.; CHAVEROT, P. Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach. **Journal Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 65, p. 142–158, 1996.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C. State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures. **Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behavior and Mix Design**, E&FN Spon, Editora L. Francken, p. 137–180, 1998.

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

DI BENEDETTO, H.; NGUYEN, H.M.; POUGET, S.; SAUZÉAT, C. Time-temperature superposition principle for bituminous mixtures: three dimensional approach and extension in the nonlinear domain. INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE, 1º, 2008, Beijing. **Proceedings I ICTI** Beijing: ICTI, 2008.

DI BENEDETTO, H.; NGUYEN, Q. T.; SAUZÉAT, C. Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 1, p. 129–158, 2011.

DIAS, D. M. **Estimativa de Propriedades Viscoelásticas Lineares de Misturas Asfálticas Completas a partir da Caracterização da Matriz de Agregados Finos**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

EUROPEIA EN 12697-24: 2012. **Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – part 24: resistance to fatigue**, [s.l. s. n.], 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Superpave binder specification**. FHWA. Washington, 115 p, 2002.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3rd ed. Editora John Wiley & Sons, Nova York, 1980.

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

GAUTHIER, G.; BODIN, D.; CHAILLEUX, E.; GALLET, T. Non Linearity in Bituminous Materials during Cyclic Tests. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, p. 379–410, 2010. doi:10.1080/14680629.2010.969033.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GRANT, T. P. **Determination of Asphalt Mixture Healing Rate Using the Superpave Indirect Tensile Test**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade da Florida, Ocala, 2001.

GRAZIANI, A.; CARDONE, F.; VIRGILI, A. Characterization of the three-dimensional linear viscoelastic behavior of asphalt concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 356–364, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.094>.

GROSS, B. **Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity**. Hermann & Cie, Paris, 1968.

HINTZ, C. e BAHIA, H. U. Understanding mechanisms leading to asphalt binder in the dynamic shear rheometer. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. 2, p. 251–251, 2013.

HOPMAN, P. C.; KUNST, P. A. J.; PRONK, A. C. A renewed interpretation method for fatigue measurements: verification of Miner's rule. In: EUROBITUME SYMPOSIUM, 4th, 1989, **Proceedings 4th Eurobitume Symposium**, 1989. p. 557–561.

HUANG, S. C.; DI BENEDETTO, H. **Advances in asphalt materials: road and pavement construction**. Woodhead Publishing, Oxford, 2015.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell Bitumen handbook**. Published for Shell Bitumen by ICE Publishing, Westminster, London, 2015.

IBIAPINA, D. S. **Proposição de um Sistema de Classificação das Propriedades de Forma de Agregados Caracterizados com o Uso do Processamento Digital de Imagens para a**

Seleção de Materiais Brasileiros. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

KIM Y. R. Modeling of Asphalt Concrete, ASCE Press, McGraw-Hill Construction, Reston, VA: New York, 2009.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) to Evaluate the Fatigue and Healing Potential of Asphalt Binders in Sand Asphalt Mixtures. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT,** Proceedings of the Technical Sessions, v. 71, p. 176-206, 2002.

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. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(75)

LAMOTHE, S. **Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques.** 2014. 414 f. Tese (Doutorado) – Escola de Tecnologia Superior de Montreal, Universidade do Quebec, Montreal, 2014.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of Solid Materials.** 15th ed. Foreword to English, Cambridge University Press, p. 584, 1990.

LITTLE, D. N.; BHASIN, A. Exploring mechanisms of healing in asphalt mixtures and quantifying its impact. **Self-healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science.** Springer series in materials Science, Dordrecht: Springer Netherlands, v. 100, p. 205–218, 2007.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da Adesividade Agregado-Ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LUNDSTRÖM, R.; EKBLAND, J. Fatigue characterization of asphalt concrete using Schapery's Work Potential Model. In: Nordic Rheology Conference, 2006, Stockholm. **Annual Transactions of the Nordic Rheology Society.** Stockholm: v. 14, 2006.

LV, Q.; HUANG, W.; ZHU, X.; XIAO, F. On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors. **Materials & Design**, v. 117, p. 7-17, 2017.

MAHMOUD, E. M.; GATES, L.; MASAD, E. A.; ERDOGAN, S.; GARBOCZI, E. Comprehensive Evaluation of AIMS Texture, Angularity, and Dimension Measurements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 369–379, 2010.

MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de Lyon (ENTPE), Lyon, 2014.

MELLO, L. G. R. **A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. 2008. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MENSCH, N. G. **Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MORENO-NAVARRO, F.; AYAR, P.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures at macro-crack level: the influence of temperature, time, and external loads. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, p. 293–303, 2017. doi:10.1080/14680629.2017.1305149.

MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of healing. **Road Materials and Pavement Design**, v. 16, v. 1, p. 75–89, 2015. doi:10.1080/14680629.2015.1029706.

NASCIMENTO, L. A. H. **Previsão da vida de fadiga a partir do modelo S-VECD. Apresentação realizada no Departamento de Engenharia de Transportes na Universidade Federal do Ceará**. Data: 21 de dezembro de 2016, Fortaleza.

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

NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. In: ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS, 21º, 2014, Rio de Janeiro. **Anais do 21º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP**. Rio de Janeiro: IBP, 2014.

NBR 12583. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado Graúdo – Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**, 2017.

NGUYEN, Q. T. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux sous sollicitations cycliques dans les domaines linéaire et non-linéaire**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de Lyon (ENTPE), Lyon, 2011.

NGUYEN, Q. T.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. **Materials and Structures**, v. 48, p. 2339–2351, 2015. doi: 10.1617/s11527-014-0316-5.

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, p. 185–224, 2003. doi:10.1080/14680629.2003.9689946.

OLIVEIRA, J. A. **Uso de ensaios laboratoriais para avaliação da vida de fadiga de misturas asfálticas**. 2017. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

PARK, S. W.; KIM, Y. R. Fitting Prony-Series Viscoelastic Models with Power-Law Presmoothing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 1, p. 26–32, 2001.

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A. Viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. **Mechanics of Materials**, v. 24, n. 4, p. 241–255, 1996. doi: 10.1016/S0167-6636(96)00042-7.

PHAN, C. V.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; DAYDE, J.; POUGET, S. Quantification of different effects occurring during fatigue tests on bituminous mixtures. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, p. 1–14, 2017. doi: 10.1111/ffe.12646.

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

POUGET, S.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H.; OLARD, F. Prediction of isotropic linear viscoelastic behavior for bituminous materials – forward and inverse problems. In: EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, 5^o, 2012, Istambul. **Proceedings V EEC**. Istambul: EEC, 2012.

PRITZ, T. Frequency Dependences of Complex Moduli and Complex Poisson's Ratio of Real Solid Materials. **Journal of Sound and Vibration**, n. 214, p. 83–104, 1998.

PRONK, A. C.; HOPMAN, P. C. Energy dissipation: The leading factor of fatigue. **Proceedings of a Conf of the United States Strategic Highway Research: Sharing the Benefits**, Thomas Telford, London, p. 255–267, 1991. doi:10.1680/hrstb.16354.0021.

ROBERTS, F. L.; KHANDAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. NAPA Education Foundation, Lanham, MD, 1996.

SABOURI, M.; KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. In: Transportation Research Board, 2014, Washington. **TRB Annual Meeting**. Washington: United States, 2014.

SAFAEI, F.; CASTORENA, C. Improved interpretation of asphalt binder parallel plate dynamic shear rheometer fatigue tests. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1–14. doi:10.1080/10298436.2018.1438611.

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, 2016. doi:10.1007/s11043-016-9304-1.

SANTAGATA, E.; BAGLIERI, O.; TSANTILIS, L.; DALMAZZO, D. Evaluation of self healing properties of bituminous binders taking into account steric hardening effects. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 60-67, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.118.

SANTIAGO, L. S. **Contribuição para o desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2017. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SANTIAGO, L. S.; SILVA, S. A. T.; SOARES, J. B. Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. **Revista Transportes**, v. 28, n. 2, p. 31–43, 2018. doi:10.14295/transportes.v26i2.1446.

SANTOS, A. B. V.; SOARES, J. B.; BABADOPULOS, L. F. A. L. Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada e dimensionamento de pavimentos nacionais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33°, 2019, Balneário Camboriú. **Anais XXXIII ANPET 2019**. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

SCHAPERLY, R. A. Simplifications in the behavior of viscoelastic composites with growing damage. In: SYMPOSIUM ON INELASTIC DEFORMATION OF COMPOSITE MATERIALS, MECHANICS AND MATERIALS CENTER, 1990, Texas. Proceedings **Symposium on Inelastic Deformation of Composite Materials, Mechanics and Materials Center**. Texas: A&M University, College Station, 1990.

SHAN, L.; TIAN, S.; HE, H.; REN, N.; Internal crack growth of asphalt binders during shear fatigue process. **Fuel**, v. 189, p. 293–300, 2017.

SHEN, S. H.; CHIU, H-M.; HUANG, H. Characterization of fatigue and healing in asphalt binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 9, p. 846–852, 2010.

SI, Z.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 6, p. 461–470, 2002(a). doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(461).

SI, Z.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Evaluation of Fatigue Healing Effect of Asphalt Concrete by Pseudostiffness. **Transportation Research Record**, n. 2, p.73–78, 2002(b). doi:10.3141/1789-08.

SILVA, H. N. **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SOLTANI, M. A. A.; ANDERSON, D. A. New Test Protocol to Measure Fatigue Damage in Asphalt Mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 6, n. 4, p. 485–514, 2005.

SONG, I.; LITTLE, D.; MASAD, E.; LYTTON, R. Comprehensive evaluation of damage in asphalt mastics using X-ray CT, continuum mechanics, and micromechanics. **Journal Association Asphalt Paving Technologists**, v. 74, p. 885–920, 2005.

TAPSOBA, N.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; ECH, M. Three-dimensional analysis of fatigue tests on bituminous mixtures. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 38, n. 6, p. 730–741, 2015. doi:10.1111/ffe.12278.

TAYEBALI, A. A.; DEACON, J. A.; COPLANTZ, J. S.; FINN, F. N.; MONISMITH, C. L. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. **National Research Council**, Part I – Test Method Selection. Strategic Highway Research Program – SHRP-A-404, Washington, 1994.

TRAXLER, R. N. e SCHWEYER, H. E. Increase in viscosity of asphalt with time. In: Annual Meeting American Society for Testing and Materials, 1936, Atlantic City. **Proceeding of the Thirty-Ninth Annual Meeting ASTM**. Atlantic City: v. 36, n. 2, 1936. p. 544–51.

UNDERWOOD, B. S. A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue. **International Journal of Fatigue**, v. 82, p. 387–401, 2016. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.08.020.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2296, p. 36–45, 2012. doi:10.3141/2296-04.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. **Construction and Building Materials**, v. 49, p.672–681, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.045.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; SAVADATTI, S.; THIRUNAVUKKARASU, S.; GUDDATI, M. Response and fatigue performance modeling of ALF pavements using 3-D finite element analysis and a simplified viscoelastic continuum damage model. **Asphalt Paving Technology**, AAPT, v. 78, p. 829–868, 2009.

WANG, C.; CASTORENA, C.; ZHANG, J.; KIM, Y. R. Unified Failure Criterion for Asphalt Binder under Cyclic Fatigue Loading. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 16, p. 125–148, 2015. doi: 10.1080/14680629.2015.1077010.

WANG, C.; ZHANG, H.; CASTORENA, C.; ZHANG, J.; KIM, Y. R. Identifying fatigue failure in asphalt binder time sweep tests. **Construction and Building Materials**, n. 121, p. 535–546, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.020.

XU, Q.; SOLAIMANIAN, M. Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model. **Pavement Engineering**, v. 10, p. 401–422, 2009. doi:10.1080/10298430802524784.

YU, X.; GRANADOS-FOCIL, S.; TAO, M.; BURNHAM, N. A. Time- and Composition-Dependent Evolution of Distinctive Microstructures in Bitumen. **Energy & Fuels**, v. 32, n. 1, p. 67-80, 2018. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b02467.

YUSOFF, N.I.M.; MOUNIER, D.; MARC-STÉPHANE, G.; HAININ, M.R.; AIREY, G.D.; DI BENEDETTO, H. Modeling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 395–406, jan. 2013. doi:dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.038.

ZEIADA, W. A.; GUDIPUDI, P. P.; UNDERWOOD, B. S.; SOULIMAN, M. I. Effect of Loading Waveform Pattern and Rest Period on Fatigue Life of Asphalt Concrete Using Viscoelastic Continuum Damage Model. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, 2018. doi:10.1177/0361198118773892.

APÊNDICE A – ESPECTRO DE RELAXAÇÃO DOS LIGANTES

Série de Prony de Maxwell				
N _o	ρ_i (s)	G _i		
		L1	L2	R
∞	-	1,60E-03	1,72E-03	2,90E-03
1	1,13E-14	4,59E+00	2,74E+00	1,78E+00
2	8,08E-14	4,54E+00	2,72E+00	1,75E+00
3	5,77E-13	5,14E+00	3,22E+00	2,32E+00
4	4,10E-12	8,97E+00	5,87E+00	4,40E+00
5	2,90E-11	1,32E+01	8,82E+00	6,97E+00
6	2,03E-10	2,03E+01	1,42E+01	1,18E+01
7	1,41E-09	2,86E+01	2,07E+01	1,84E+01
8	9,71E-09	3,86E+01	2,92E+01	2,76E+01
9	6,51E-08	4,66E+01	3,72E+01	3,73E+01
10	4,31E-07	5,15E+01	4,29E+01	4,50E+01
11	2,78E-06	5,02E+01	4,31E+01	4,59E+01
12	1,74E-05	4,26E+01	3,76E+01	3,96E+01
13	1,05E-04	2,97E+01	2,69E+01	2,83E+01
14	6,27E-04	1,58E+01	1,50E+01	1,65E+01
15	3,88E-03	6,47E+00	6,50E+00	7,79E+00
16	2,54E-02	2,22E+00	2,31E+00	3,05E+00
17	1,74E-01	6,98E-01	7,43E-01	1,05E+00
18	1,22E+00	2,12E-01	2,28E-01	3,43E-01
19	8,74E+00	6,46E-02	6,95E-02	1,07E-01
20	6,40E+01	1,95E-02	2,10E-02	3,33E-02
21	3,98E+03	1,82E-03	1,97E-03	3,23E-03
22	4,84E+02	5,95E-03	6,45E-03	1,04E-02

APÊNDICE B – ESPECTRO DE RETARDAÇÃO DOS LIGANTES

Série de Prony de Kelvin - Voigt				
N _o	τ_j (s)	D _j		
		L1	L2	R
∞	-	2,70E-03	3,33E-03	3,33E-03
1	1,14E-14	3,37E-05	3,06E-05	1,99E-05
2	8,19E-14	3,43E-05	3,10E-05	1,97E-05
3	5,87E-13	3,98E-05	3,73E-05	2,64E-05
4	4,21E-12	7,21E-05	6,99E-05	5,13E-05
5	3,02E-11	1,12E-04	1,10E-04	8,42E-05
6	2,17E-10	1,90E-04	1,90E-04	1,51E-04
7	1,55E-09	3,08E-04	3,15E-04	2,60E-04
8	1,11E-08	5,17E-04	5,38E-04	4,61E-04
9	7,99E-08	8,71E-04	9,20E-04	8,16E-04
10	5,73E-07	1,53E-03	1,63E-03	1,48E-03
11	4,11E-06	2,83E-03	3,02E-03	2,78E-03
12	2,95E-05	5,76E-03	6,05E-03	5,52E-03
13	2,11E-04	1,32E-02	1,35E-02	1,19E-02
14	1,52E-03	3,45E-02	3,43E-02	2,83E-02
15	1,09E-02	1,01E-01	9,70E-02	7,45E-02
16	7,80E-02	3,15E-01	2,98E-01	2,15E-01
17	5,59E-01	1,03E+00	9,60E-01	6,59E-01
18	4,01E+00	3,42E+00	3,17E+00	2,09E+00
19	2,88E+01	1,15E+01	1,06E+01	6,79E+00
20	2,06E+02	3,87E+01	3,57E+01	2,23E+01
21	1,48E+03	1,31E+02	1,21E+02	7,35E+01
22	1,06E+04	4,44E+02	4,09E+02	2,43E+02

APÊNDICE C – ESPECTRO DE RELAXAÇÃO DAS MISTURAS

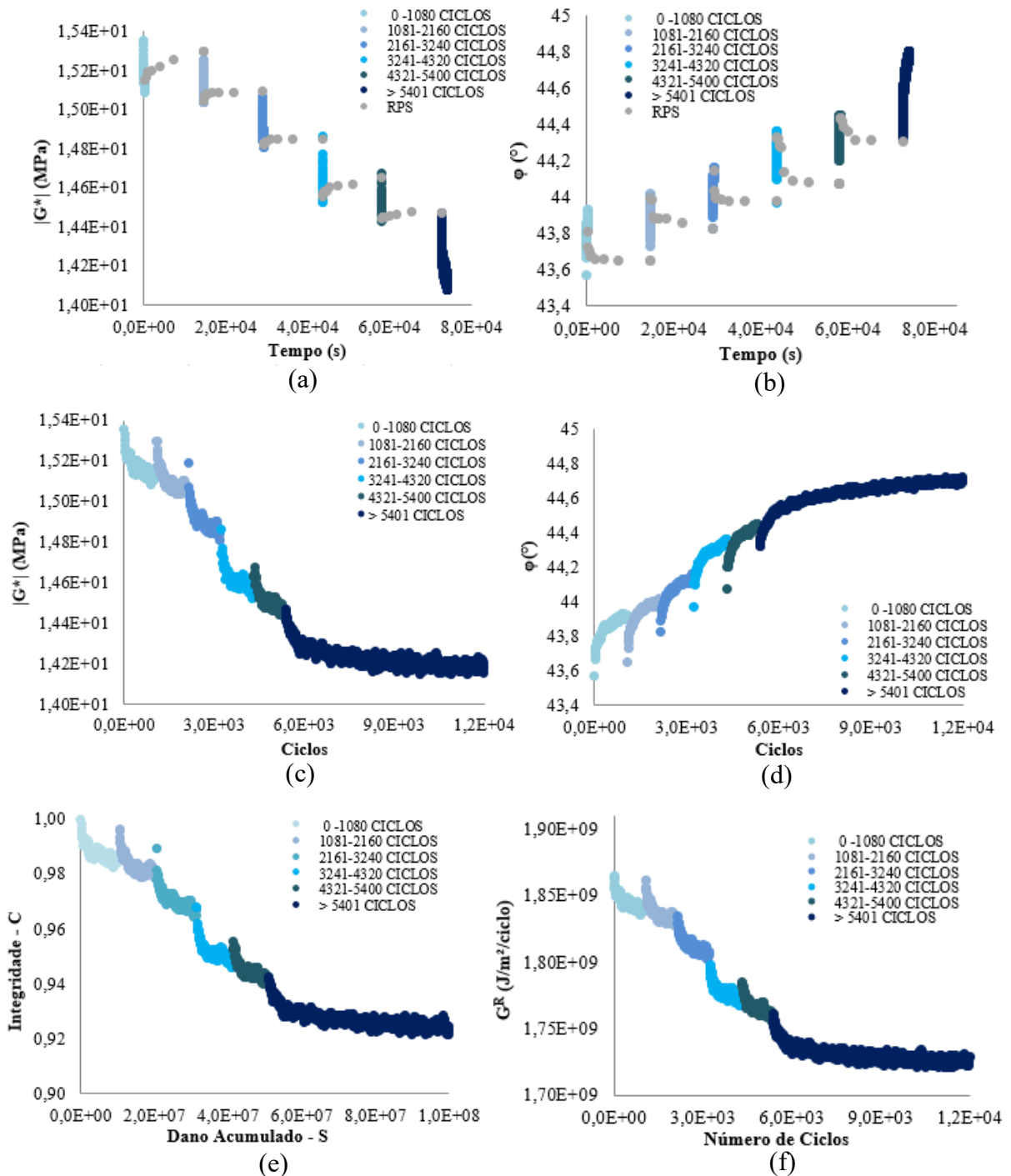
Série de Prony de Maxwell					
N _o	ρ _i (s)	E _i			
		M1L1	M1R	M2L2	M2L2C
∞	-	1,29E+02	9,52E+01	1,39E+02	8,02E+01
1	1,14E-14	7,03E+01	3,46E+01	5,60E+01	4,70E+01
2	8,14E-14	7,08E+01	3,41E+01	5,60E+01	4,73E+01
3	5,88E-13	8,34E+01	4,64E+01	6,90E+01	5,74E+01
4	4,19E-12	1,49E+02	8,92E+01	1,28E+02	1,06E+02
5	3,00E-11	2,28E+02	1,45E+02	1,98E+02	1,66E+02
6	2,15E-10	3,79E+02	2,57E+02	3,37E+02	2,83E+02
7	1,53E-09	5,99E+02	4,34E+02	5,44E+02	4,56E+02
8	1,08E-08	9,48E+02	7,40E+02	8,84E+02	7,47E+02
9	7,66E-08	1,46E+03	1,22E+03	1,39E+03	1,17E+03
10	5,36E-07	2,17E+03	1,96E+03	2,13E+03	1,81E+03
11	3,74E-06	3,08E+03	2,98E+03	3,08E+03	2,65E+03
12	2,54E-05	4,06E+03	4,20E+03	4,17E+03	3,64E+03
13	1,71E-04	4,87E+03	5,27E+03	5,07E+03	4,50E+03
14	1,13E-03	5,29E+03	5,72E+03	5,50E+03	4,99E+03
15	7,26E-03	5,08E+03	5,23E+03	5,21E+03	4,85E+03
16	4,54E-02	4,24E+03	4,00E+03	4,18E+03	4,01E+03
17	2,73E-01	2,84E+03	2,51E+03	2,71E+03	2,70E+03
18	1,65E+00	1,46E+03	1,28E+03	1,33E+03	1,40E+03
19	1,06E+01	5,66E+02	5,25E+02	5,15E+02	5,53E+02
20	8,40E+01	1,88E+02	1,83E+02	3,58E-01	1,82E+02
21	1,10E+03	3,76E+01	4,99E+01	2,85E+01	5,01E+01
22	1,06E+04	4,15E-01	3,60E-02	1,71E+02	1,16E-01

APÊNDICE D – ESPECTRO DE RETARDAÇÃO DAS MISTURAS

Série de Prony de Kelvin - Voigt					
N _o	τ_j (s)	D _j			
		M1L1	M1R	M2L2	M2L2C
∞	-	2,63E-05	2,70E-05	2,64E-05	2,90E-05
1	1,14E-14	4,89E-08	2,54E-08	3,93E-08	3,97E-08
2	8,19E-14	4,98E-08	2,52E-08	3,98E-08	4,01E-08
3	5,87E-13	5,78E-08	3,38E-08	4,79E-08	4,83E-08
4	4,21E-12	1,04E-07	6,56E-08	8,96E-08	9,04E-08
5	3,02E-11	1,62E-07	1,08E-07	1,41E-07	1,42E-07
6	2,17E-10	2,73E-07	1,92E-07	2,43E-07	2,45E-07
7	1,55E-09	4,40E-07	3,29E-07	3,99E-07	4,02E-07
8	1,11E-08	7,27E-07	5,77E-07	6,73E-07	6,78E-07
9	7,99E-08	1,19E-06	1,00E-06	1,12E-06	1,13E-06
10	5,73E-07	1,95E-06	1,75E-06	1,88E-06	1,90E-06
11	4,11E-06	3,22E-06	3,06E-06	3,17E-06	3,19E-06
12	2,95E-05	5,37E-06	5,42E-06	5,39E-06	5,42E-06
13	2,11E-04	9,11E-06	9,73E-06	9,35E-06	9,36E-06
14	1,52E-03	1,60E-05	1,80E-05	1,68E-05	1,67E-05
15	1,09E-02	2,99E-05	3,48E-05	3,20E-05	3,15E-05
16	7,80E-02	6,16E-05	7,25E-05	6,70E-05	6,49E-05
17	5,59E-01	1,44E-04	1,66E-04	1,59E-04	1,50E-04
18	4,01E+00	3,91E-04	4,26E-04	4,34E-04	3,99E-04
19	2,88E+01	1,25E-03	1,26E-03	1,38E-03	1,25E-03
20	2,06E+02	3,62E-03	3,92E-03	3,54E-03	4,39E-03
21	1,48E+03	2,22E-03	4,54E-03	1,54E-03	6,09E-03
22	1,06E+04	1,36E-06	3,59E-05	8,49E-06	5,56E-05

APÊNDICE E – RESULTADOS DO TESTE DE FADIGA COM REPOUSO DOS LIGANTES

Figura E-1 – Dados do ligante L1 com amplitude de $10.000\mu\text{m/m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo



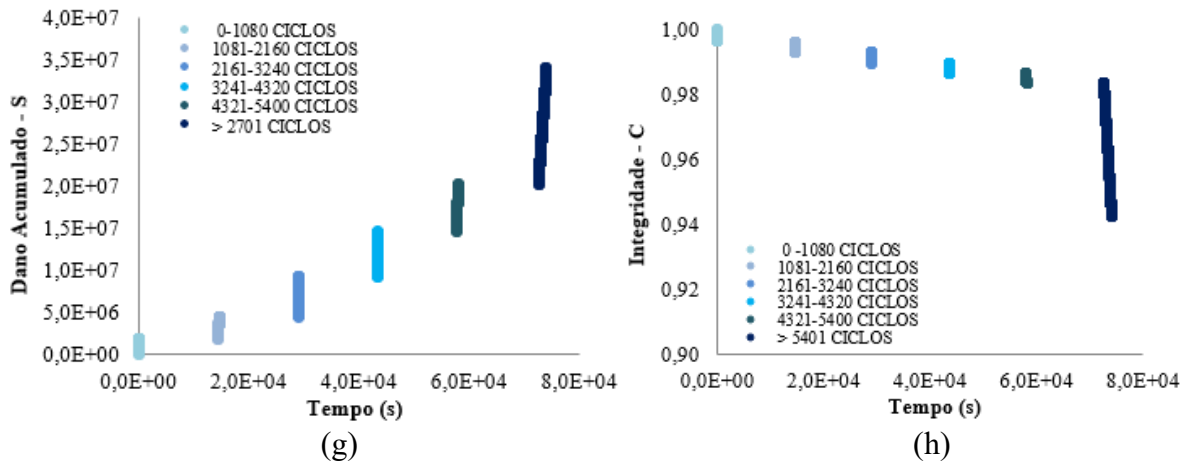
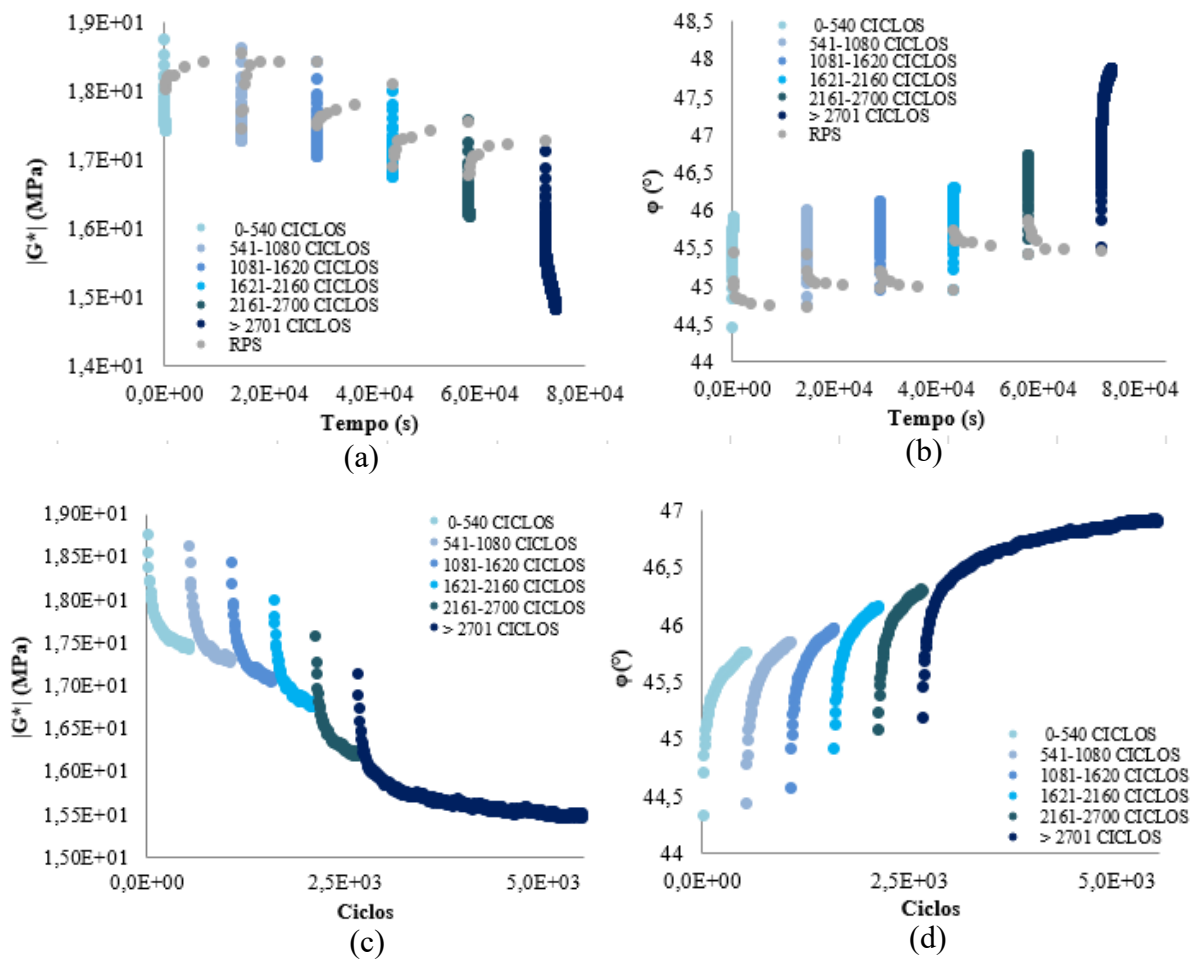


Figura E-2 – Dados do ligante L1 com amplitude de 20.000 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo



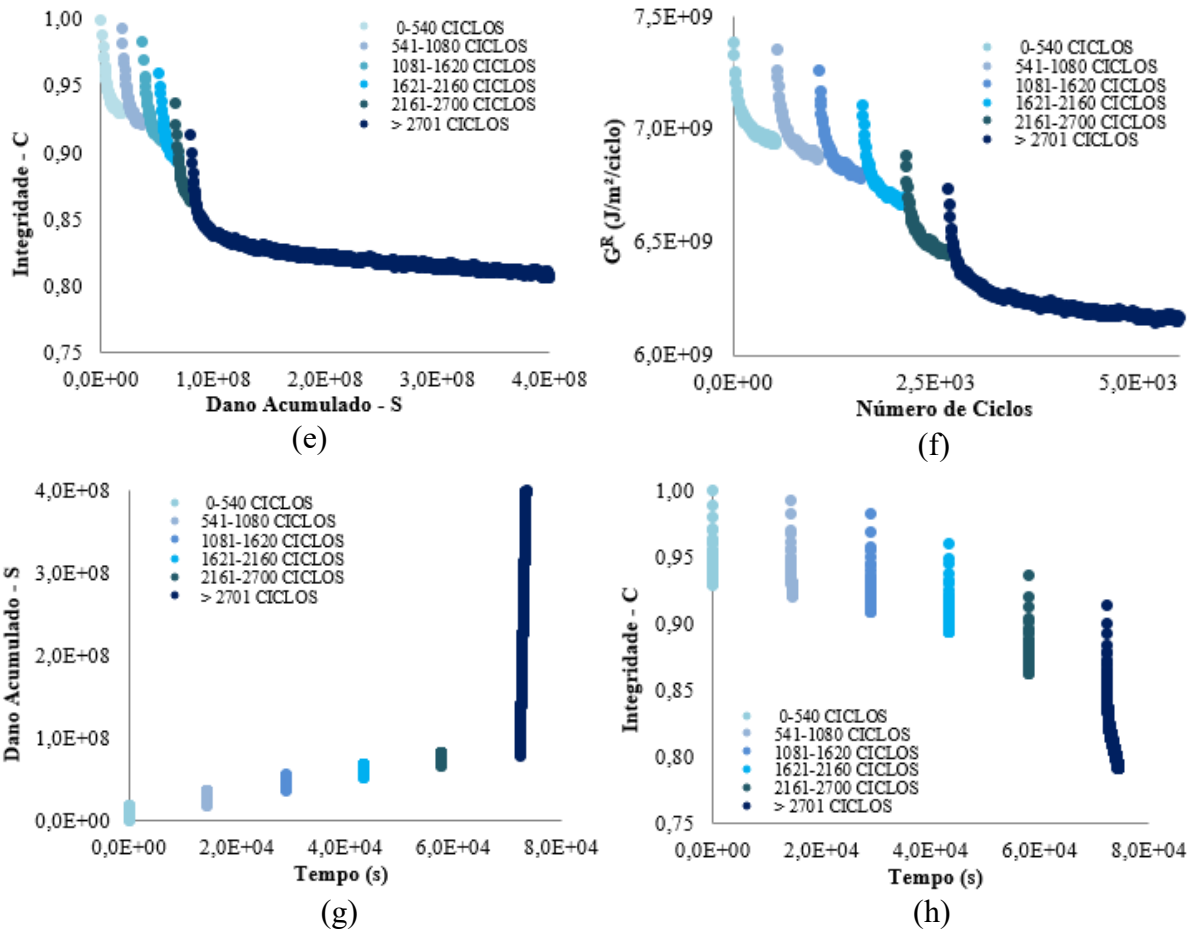
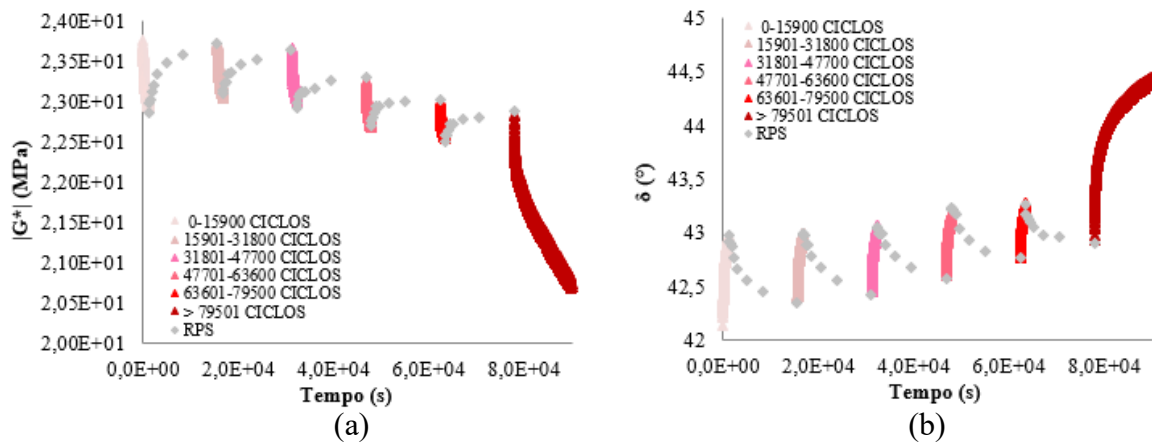


Figura E-3 – Dados do ligante L2 com amplitude de 10.000 μ m/m: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo



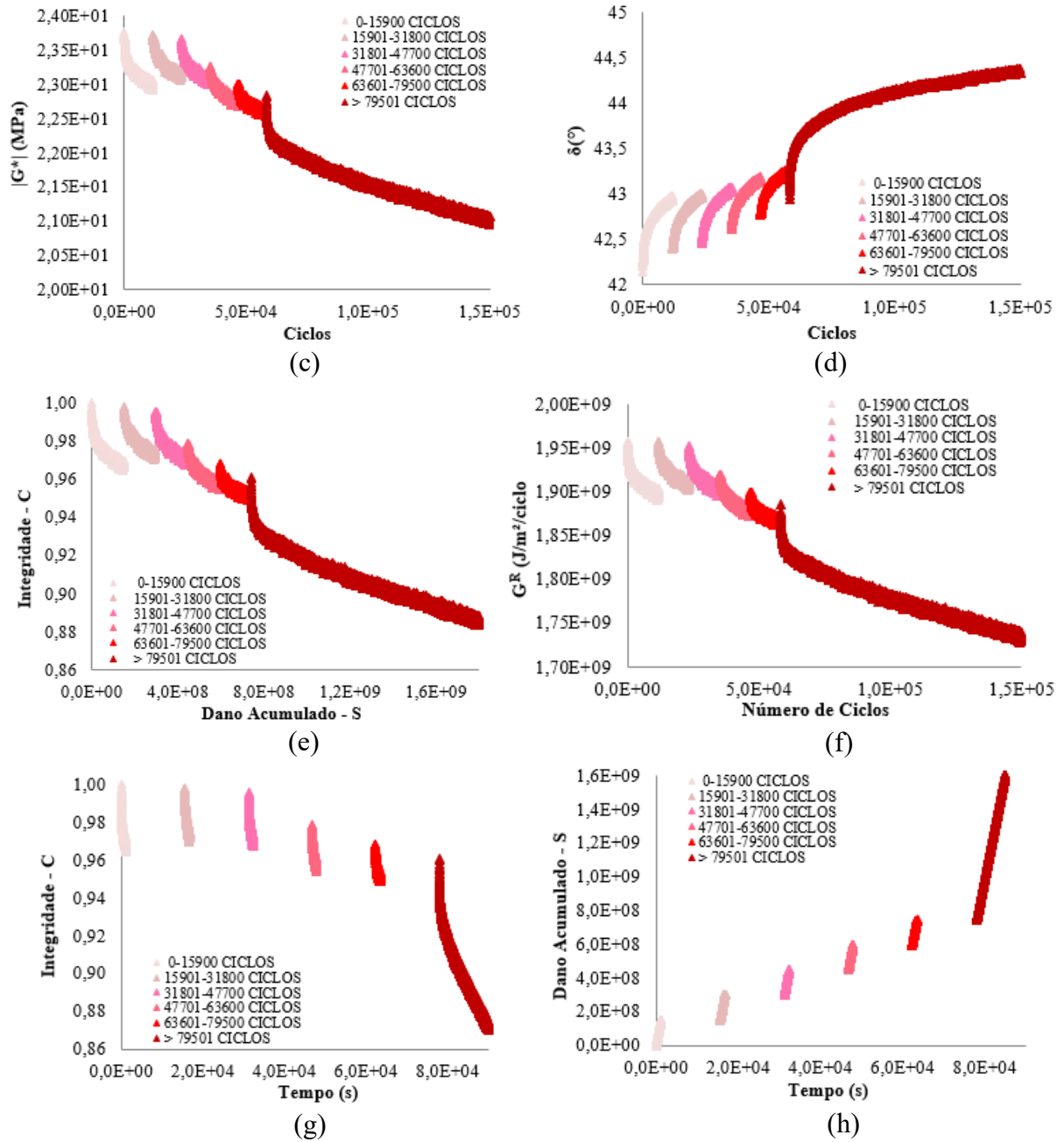


Figura E-4 – Dados do ligante L2 com amplitude de 20.000 μ m/m: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade

do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo

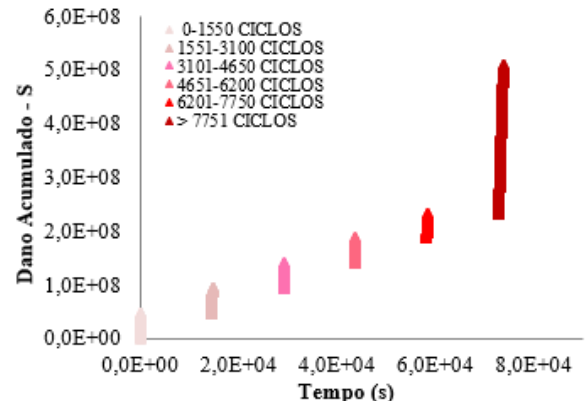
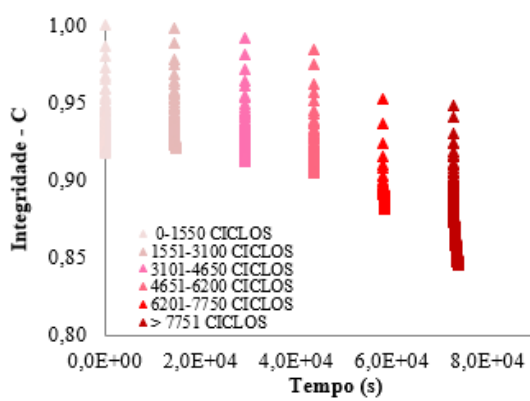
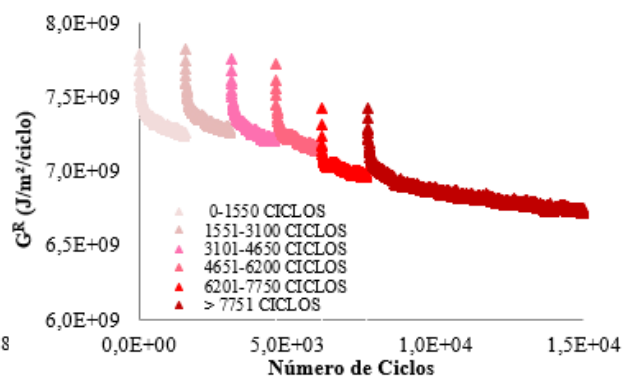
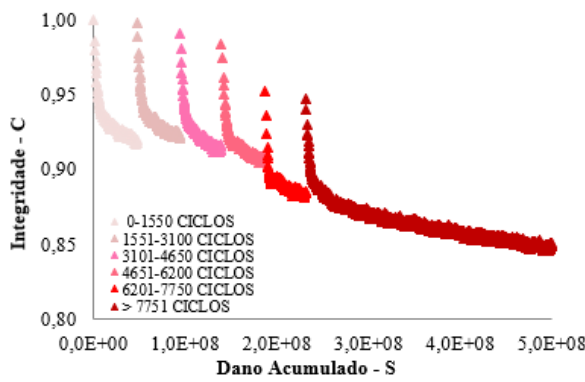
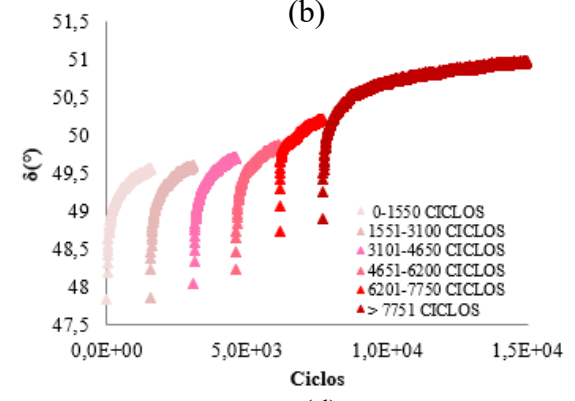
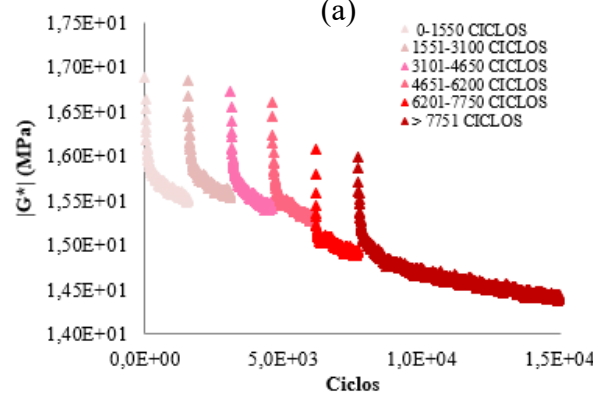
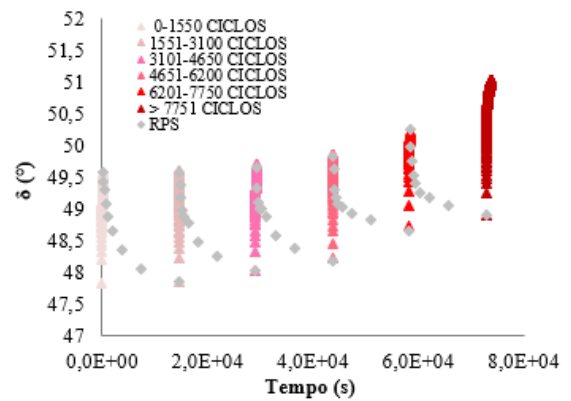
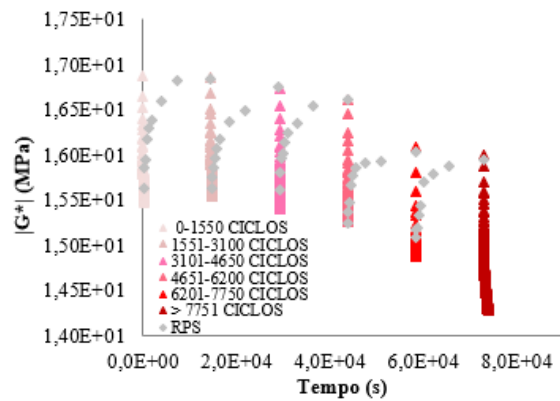
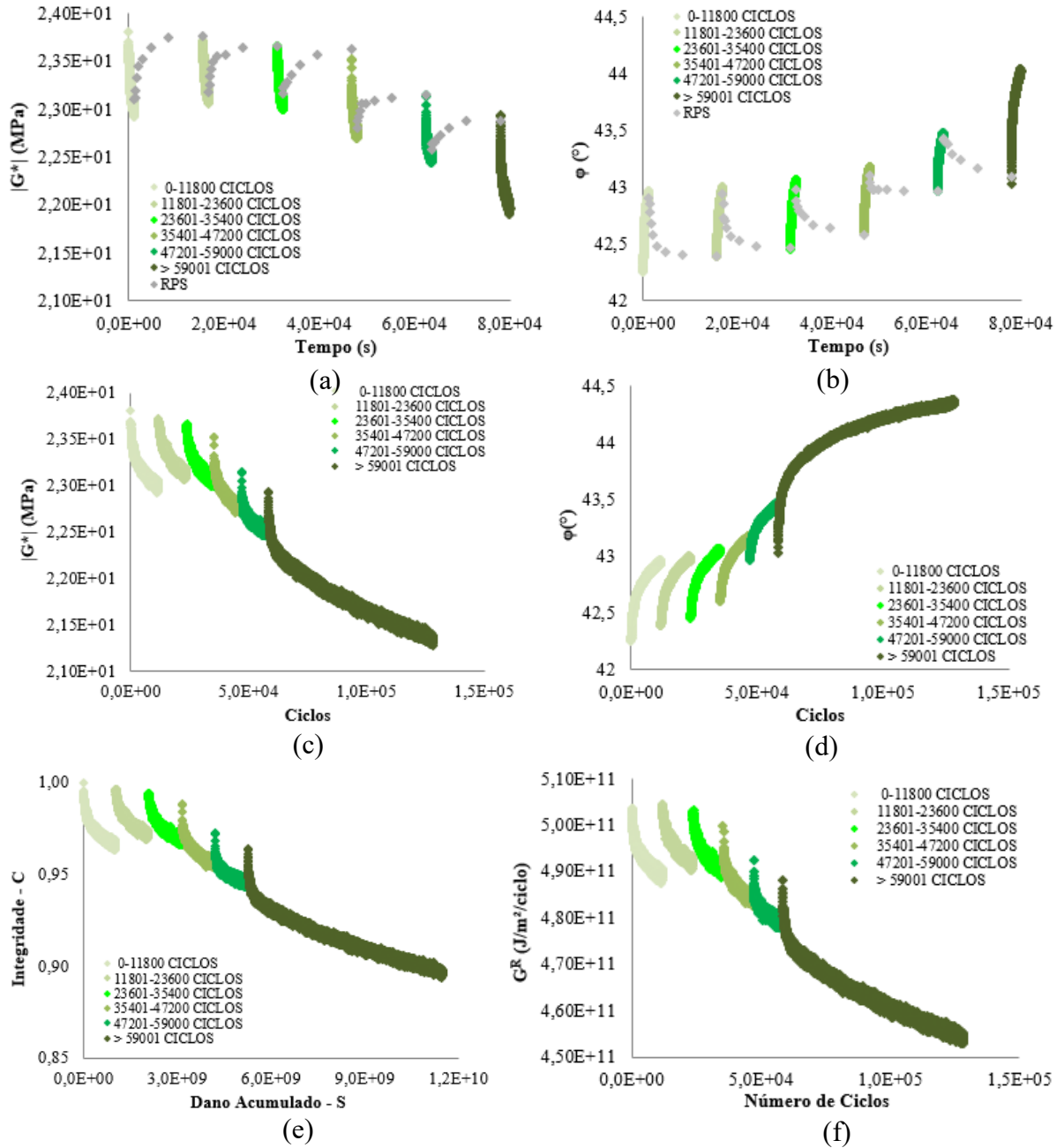


Figura E-5 – Dados do ligante R com amplitude de 10.000µm/m: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo



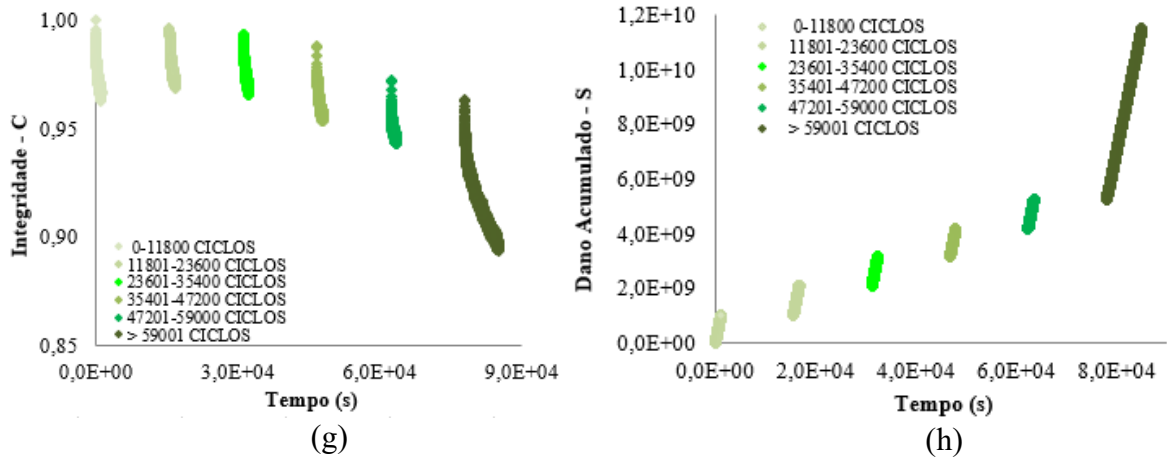
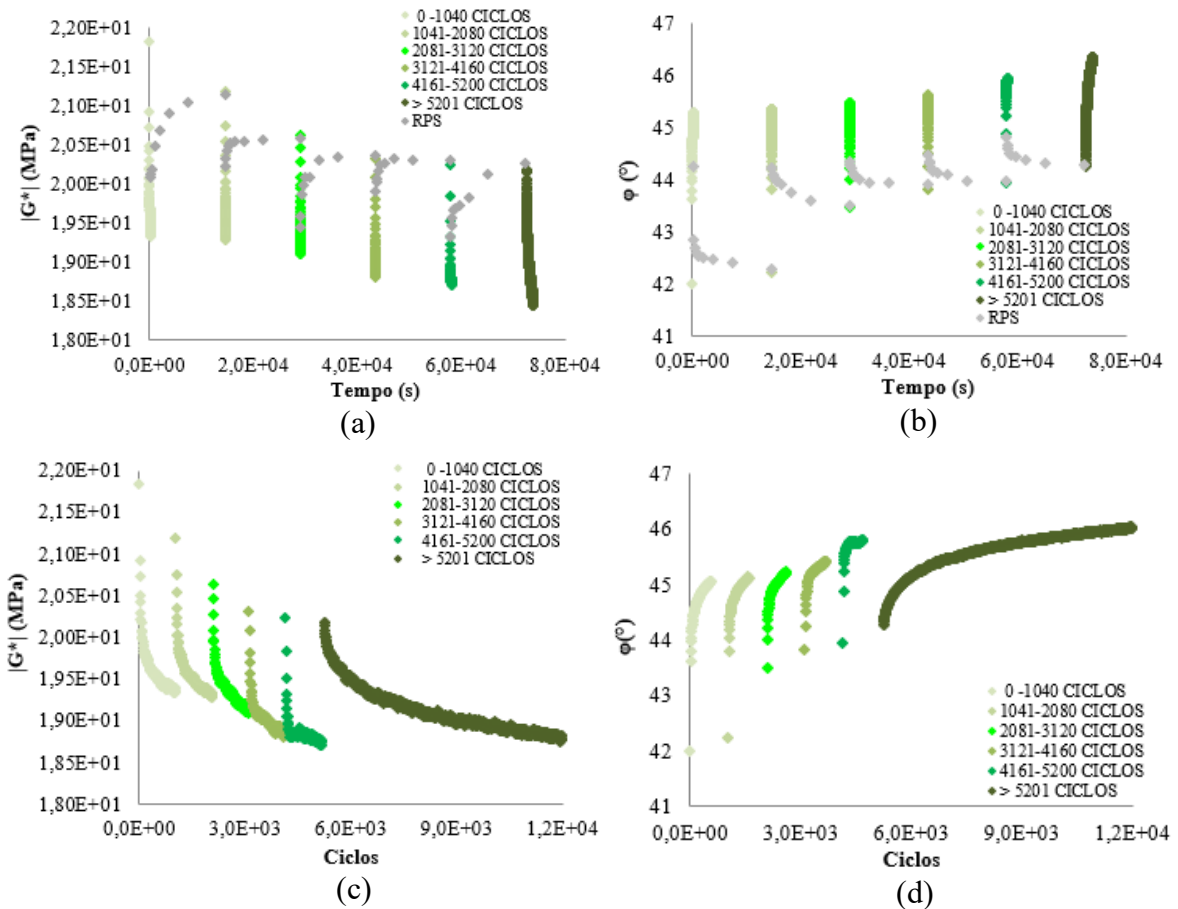
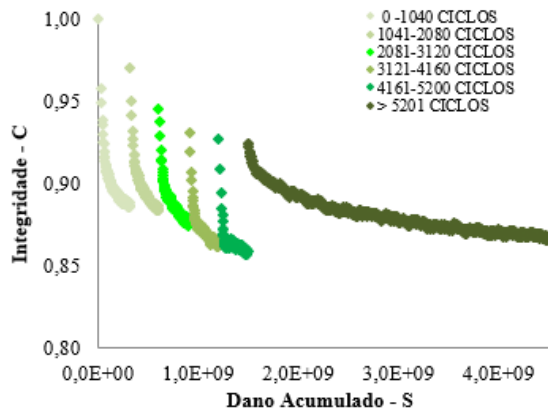
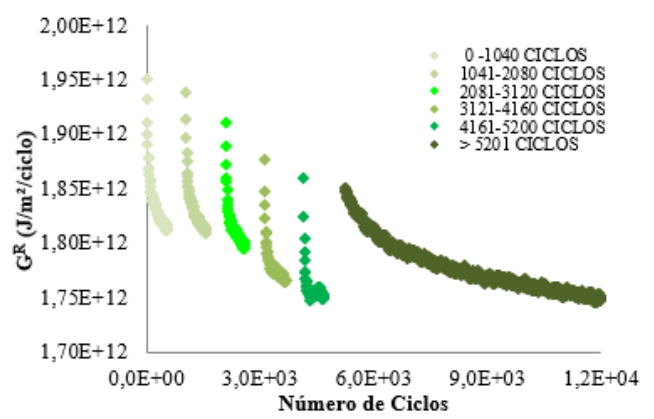


Figura E-6 – Dados do ligante R com amplitude de 20.000 $\mu\text{m}/\text{m}$: (a) módulo complexo em função do tempo; (b) o ângulo de fase em função do tempo; (c) módulo complexo em função do número de ciclos; (d) ângulo de fase em função do número de ciclos; (e) curva de característica de dano; (f) energia dissipada em função do número de ciclos; (g) integridade do material em função do tempo e; (h) dano acumulado em função do tempo

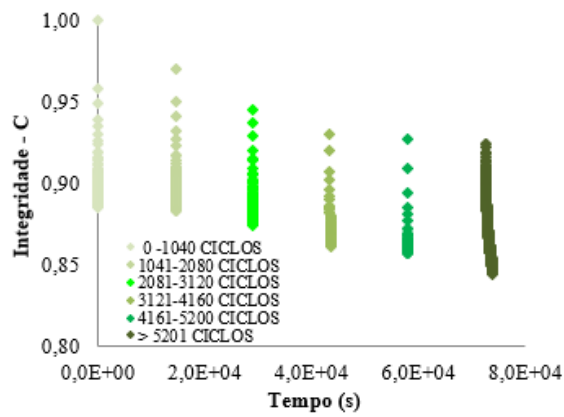




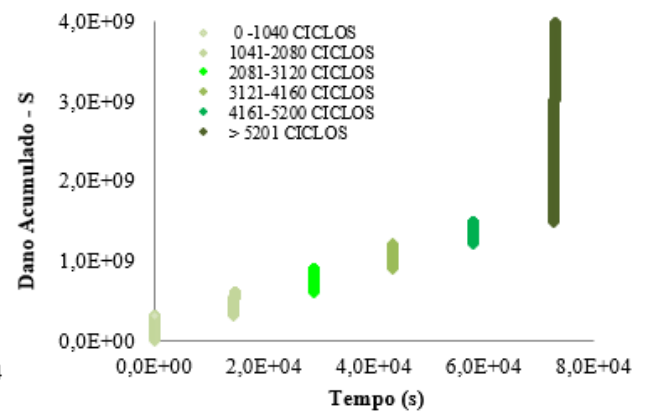
(e)



(f)



(g)



(h)

APÊNDICE F – RESULTADOS DO TESTE DE FADIGA COM REPOUSO DAS MISTURAS

Figura F-1 – Dados da mistura M1L1 com AID 150µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo

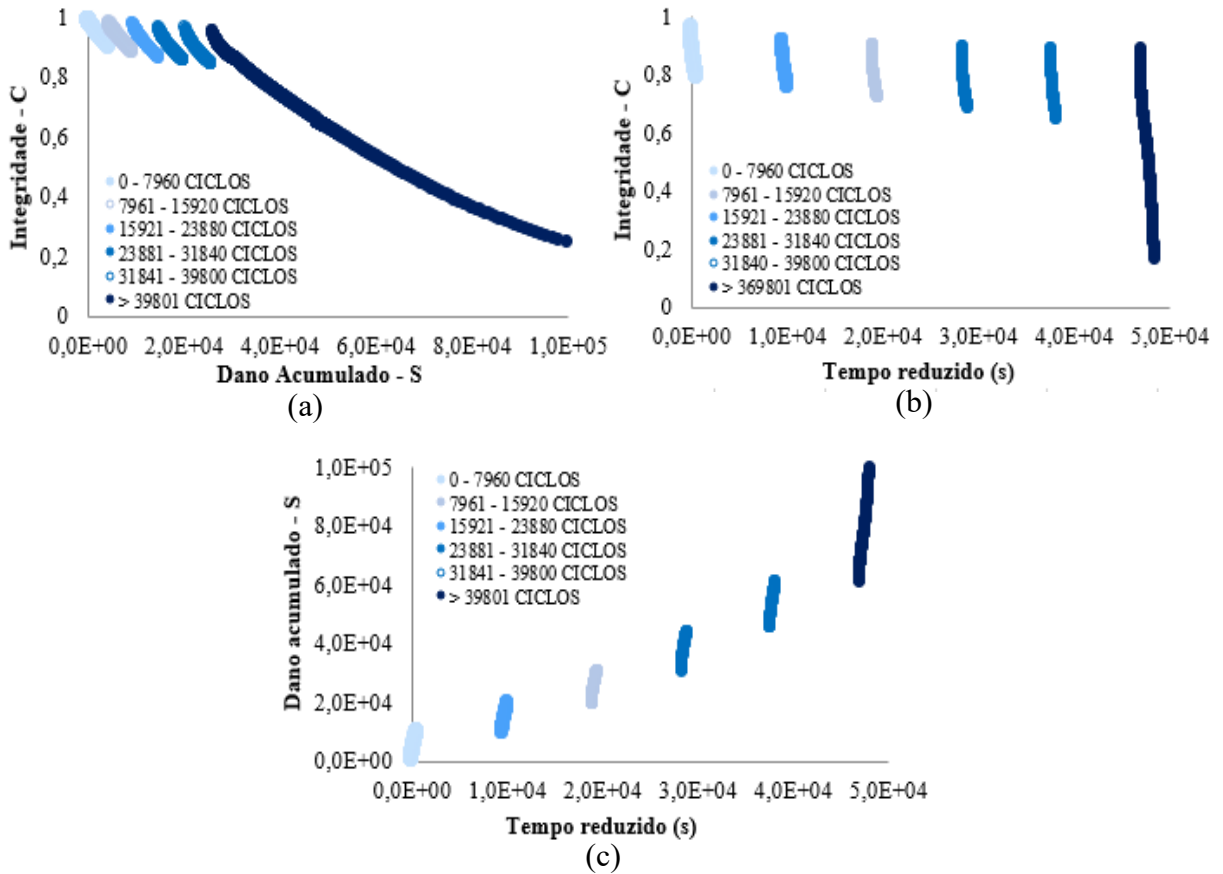
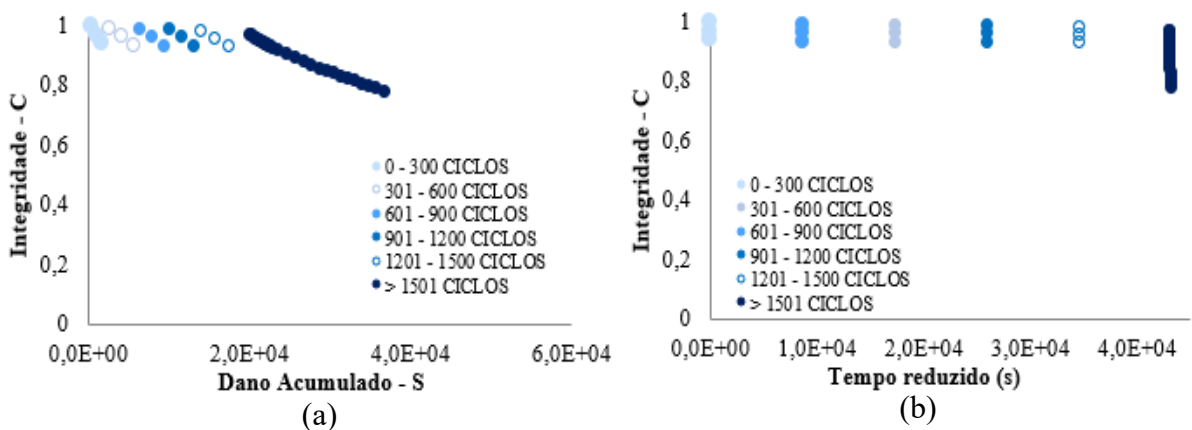


Figura F-2 – Dados da mistura M1L1 com AID 300µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo



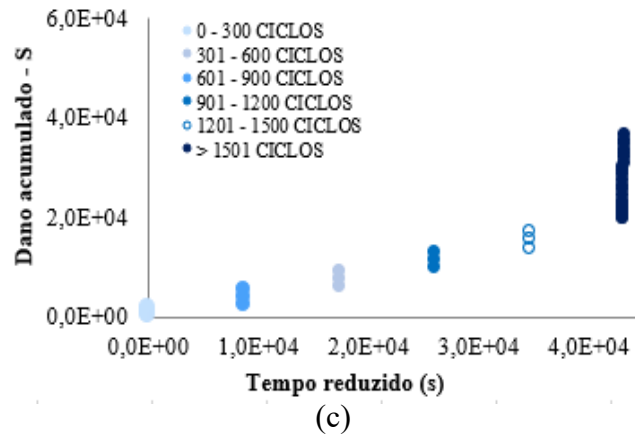


Figura F-3 – Dados da mistura M1R com AID 200 μ m/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo

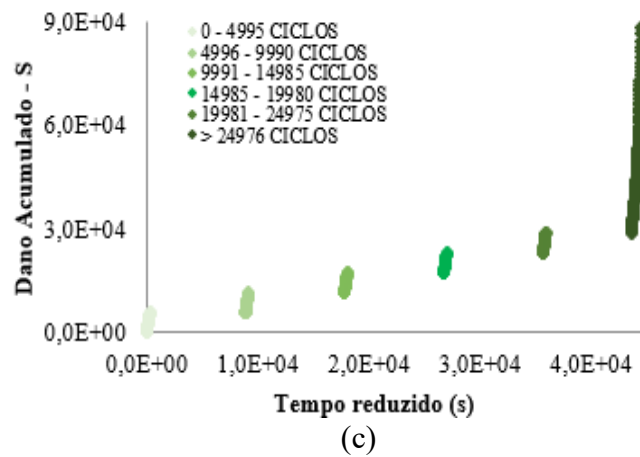
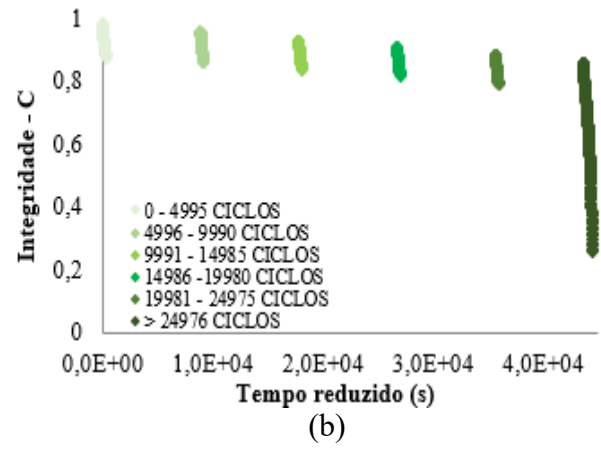
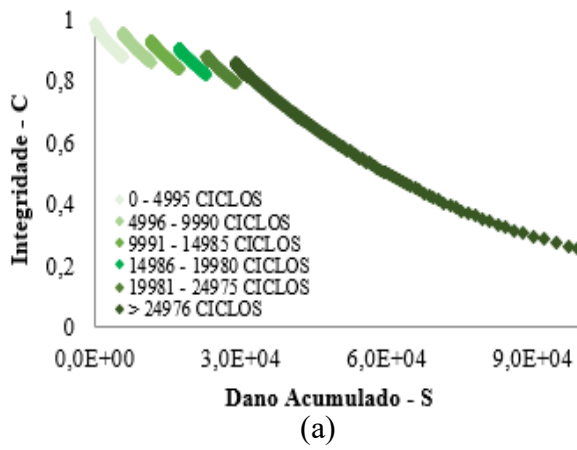


Figura F-4 – Dados da mistura M1R com AID 250µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo

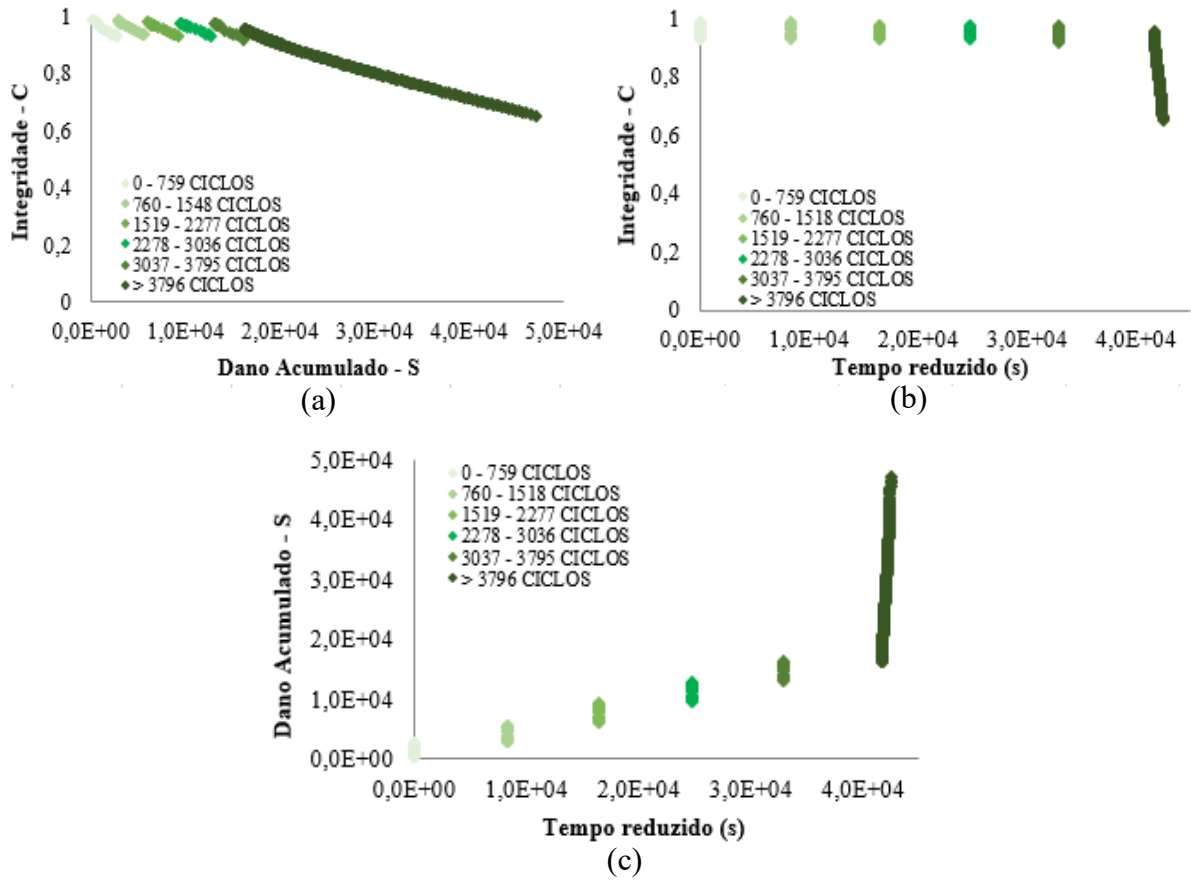
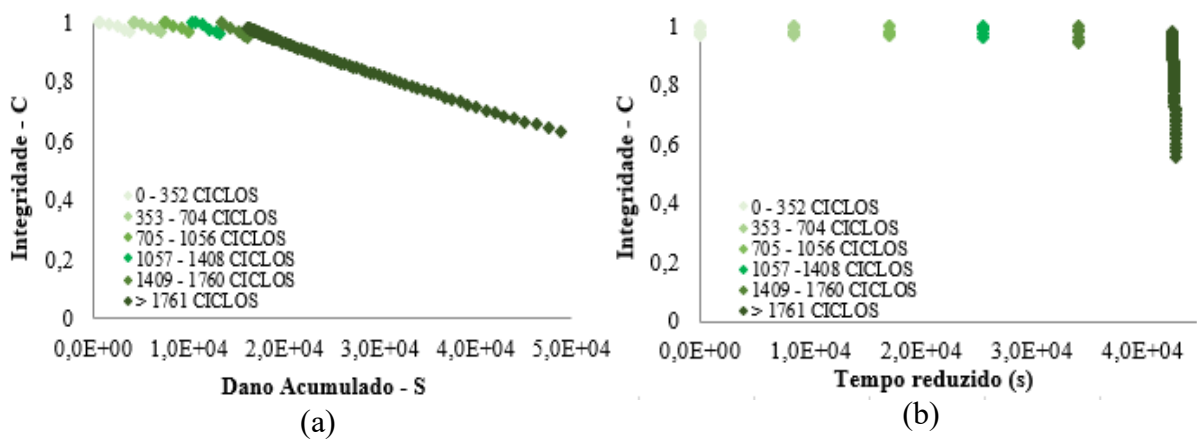


Figura F-5 – Dados da mistura M1R com AID 300µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo



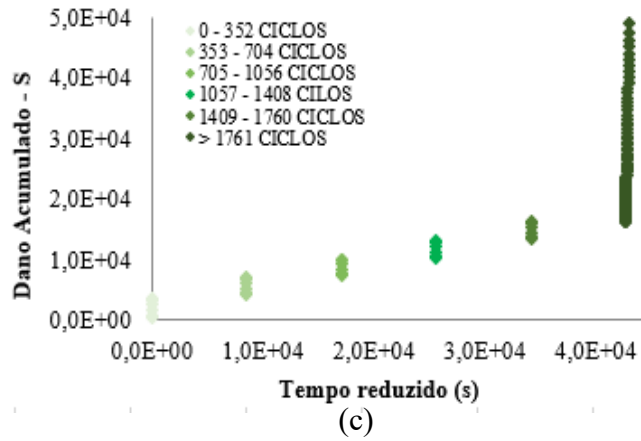


Figura F-6 – Dados da mistura M2L2 com AID 200µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo

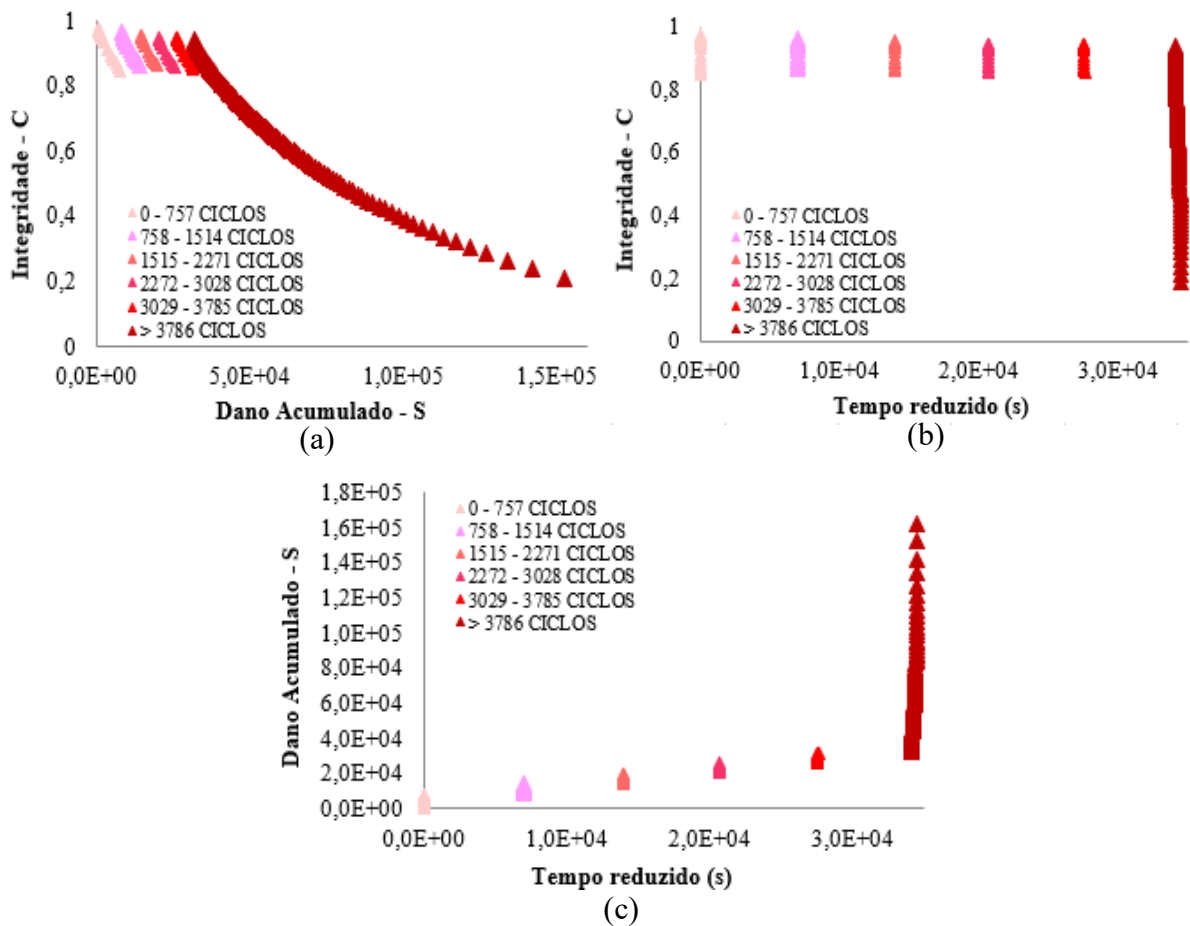


Figura F-7 – Dados da mistura M2L2 com AID 300µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo

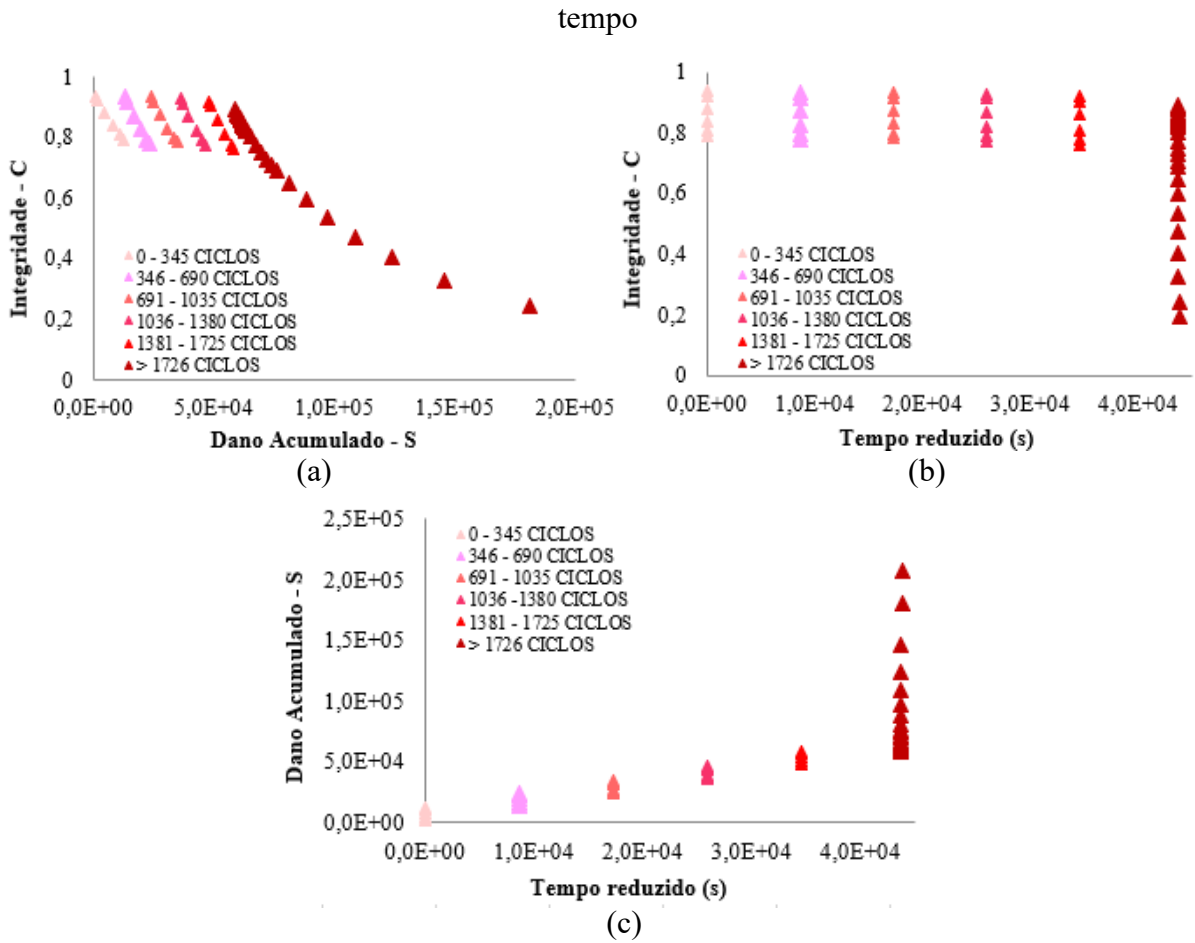
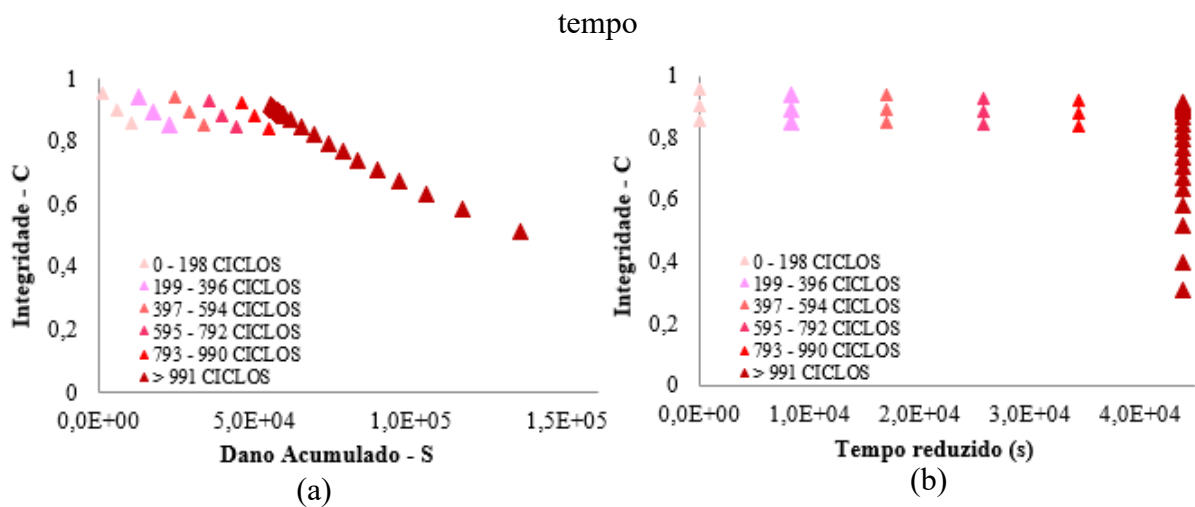
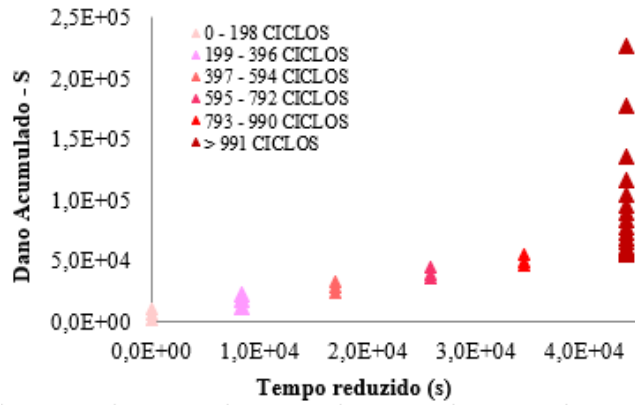


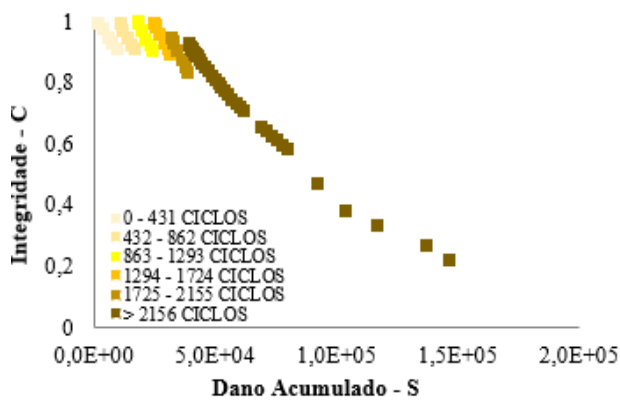
Figura F-8 – Dados da mistura M2L2 com AID 350µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo



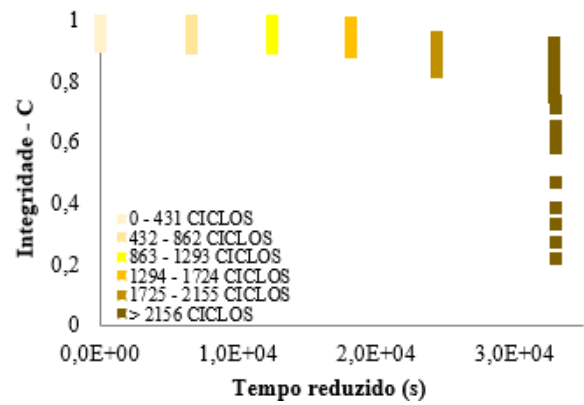


(c)

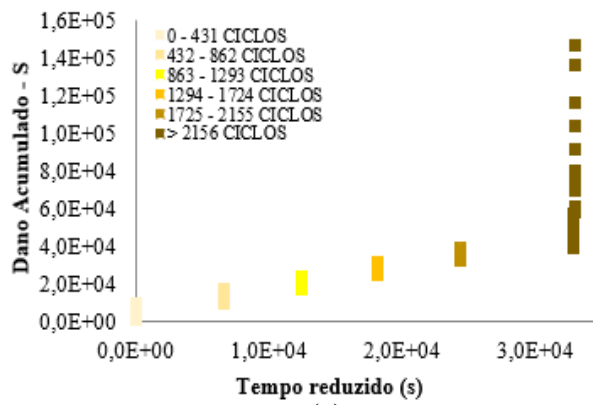
Figura F-9 – Dados da mistura M2L2C com AID 300µm/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo



(a)

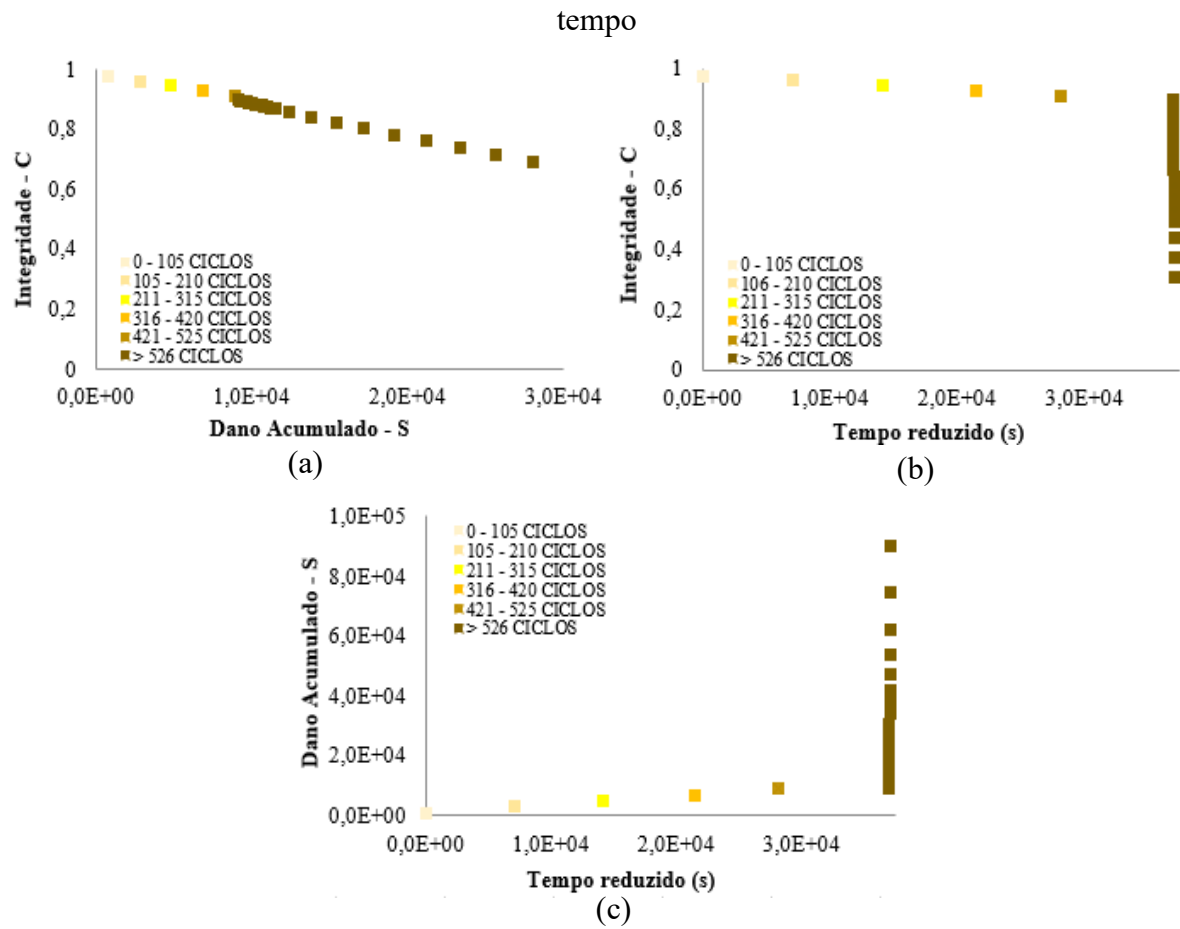


(b)

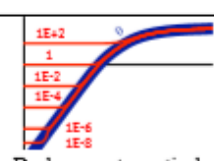
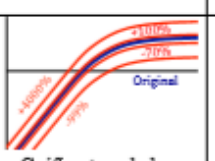
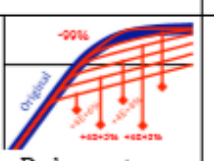
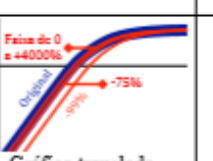
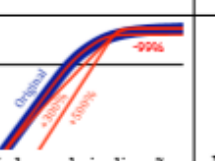
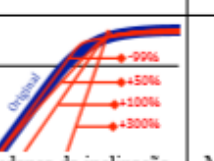
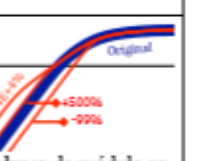
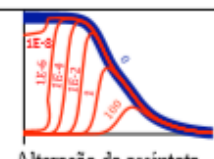
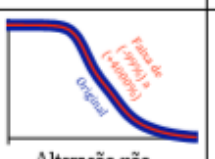
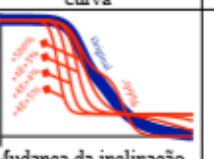
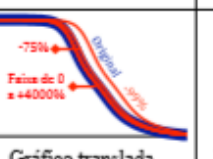
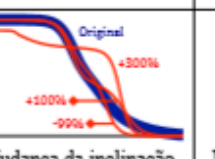
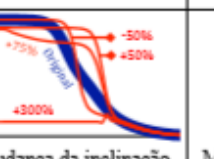
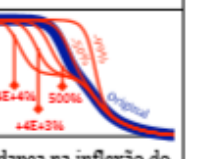
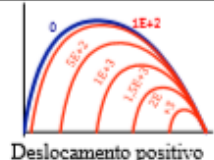
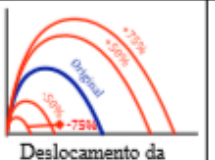
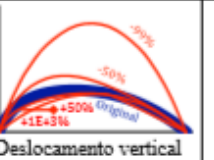
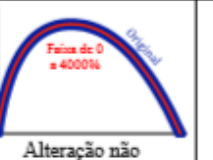

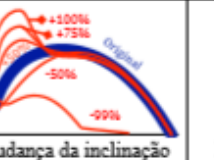

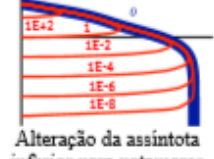




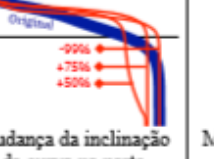



(c)

Figura F-10 – Dados da mistura M2L2C com AID 350 μ m/m: (a) Curva de característica de dano; (b) Integridade do material em função do tempo e; (c) Dano acumulado em função do tempo



ANEXO A – ESPECTRO DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MODELO 2S2P1D NAS CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR

Parâmetros Curvas	E_0^*	E_∞	α	τ_0	k^{**}	h^{**}	β
Curva Mestra do Módulo ($\log E^* $ vs $\log a_T \cdot \omega$)	 Deslocamento vertical da assintota inferior	 Gráfico translada verticalmente	 Deslocamento e mudança de inclinação do patamar superior da curva	 Gráfico translada horizontalmente	 Mudança da inclinação na parte inclinada da curva	 Mudança da inclinação na parte inclinada da curva	 Mudança do módulo na parte inclinada da curva
Curva Mestra do Ângulo de Fase (δ vs $\log a_T \cdot \omega$)	 Alteração da assintota superior para picos de δ	 Alteração não significativa	 Mudança da inclinação na parte inclinada da curva	 Gráfico translada horizontalmente	 Mudança da inclinação da curva no patamar inferior	 Mudança da inclinação da curva no patamar superior	 Mudança na inflexão do lado esquerdo da curva
Cole-Cole (E_2 vs E_1)	 Deslocamento positivo da extremidade esquerda da curva	 Deslocamento da extremidade direita da curva	 Deslocamento vertical do cume da curva	 Alteração não significativa	 Mudança da inclinação da curva no lado direito	 Mudança da inclinação da curva no lado esquerdo	 Pequena mudança da inclinação da curva no lado direito
Espaço de Black ($\log E^* $ vs δ)	 Alteração da assintota inferior para patamares	 Gráfico translada verticalmente	 Mudança na inflexão do lado esquerdo da curva	 Alteração não significativa	 Mudança da inclinação da curva na parte superior	 Mudança da inclinação da curva na parte inferior	 Mudança na inflexão do lado direito da curva

* Parâmetro original com valor zero. Portanto, não cabe avaliação com variação percentual do seu módulo.
 ** Os parâmetros k e h devem obedecer $0 < k < h < 1$. As variações máximas ultrapassam esse limite. Servem apenas de indicativo do comportamento das curvas com o aumento ou diminuição dos parâmetros.

Fonte: Dias, 2016.

ANEXO B – RELATÓRIO DE ANÁLISE ATRAVÉS DO AIMS DO AGREGADO GRANÍTICO 1

Data:	16/10/2018
Operador:	Caio
Descrição:	Agregado de origem granítica do Estado do Ceará – Pedreira Ponta da Serra

Analísado	Tamanho
	25,0mm (1")
	19,0mm (3/4")
✓	12,5mm (1/2")
✓	9,5mm (3/8")
✓	4,75mm (#4)
✓	2,36mm (#8)
✓	1,18mm (#16)
✓	0,6mm (#30)
✓	0,3mm (#50)
✓	0,15mm (#100)
✓	0,075mm (#200)

Esfericidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	52	0,68	0,09
9,5mm (3/8")	50	0,66	0,09
4,75mm (#4)	50	0,65	0,10

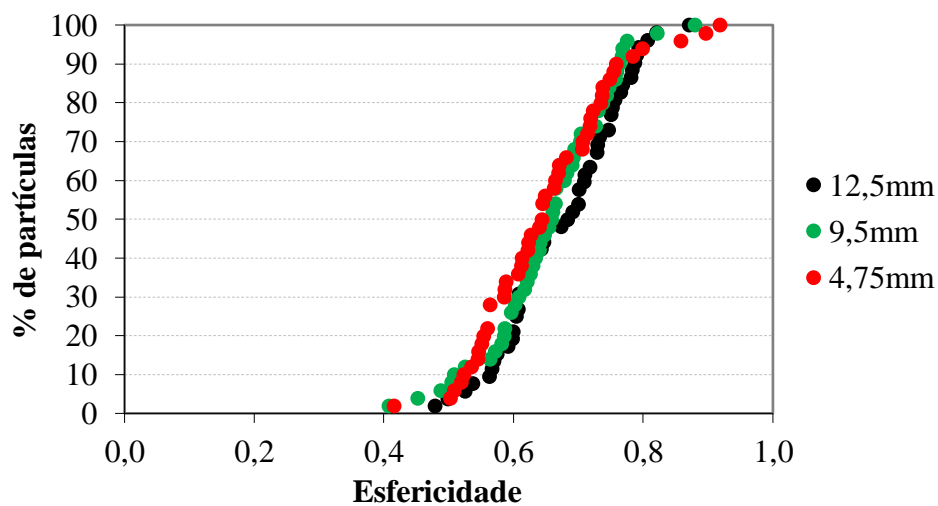
Angularidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	52	2838,1	614,1
9,5mm (3/8")	50	2911,9	660,9
4,75mm (#4)	50	3084,6	653,4
2,36mm (#8)	151	3773,7	942,4
1,18mm (#16)	150	4148,7	1138,2
0,6mm (#30)	150	4006,5	1336,5
0,3mm (#50)	200	3868,0	1221,2
0,15mm (#100)	203	3545,7	1336,3
0,075mm (#200)	180	2873,9	1281,4

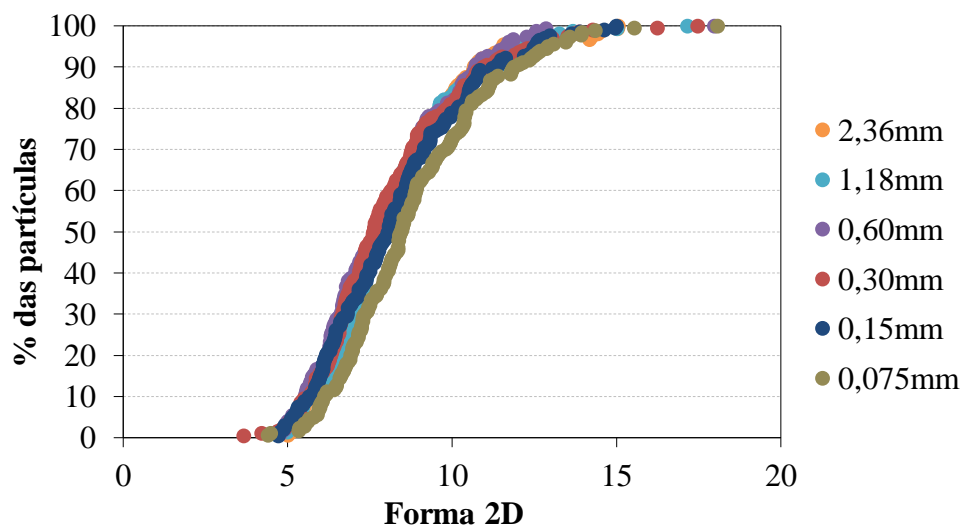
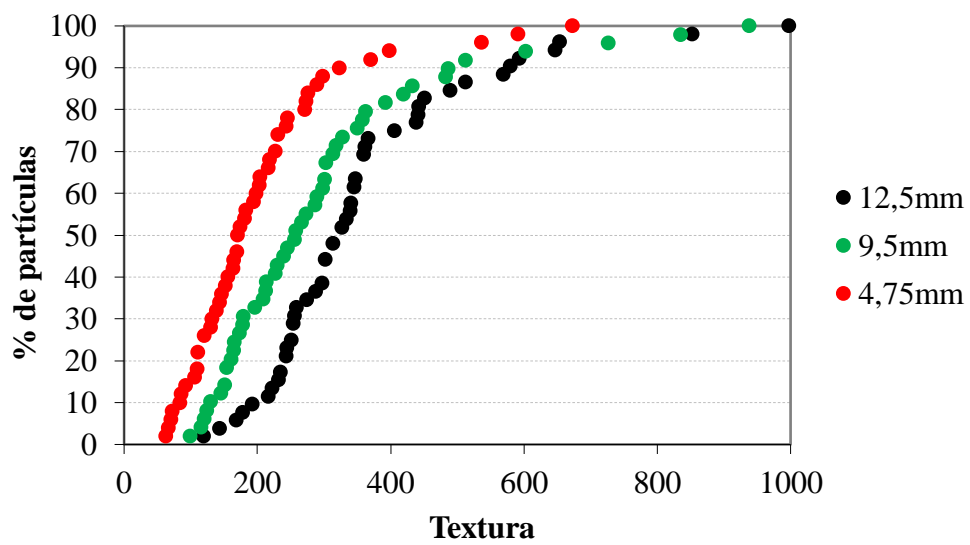
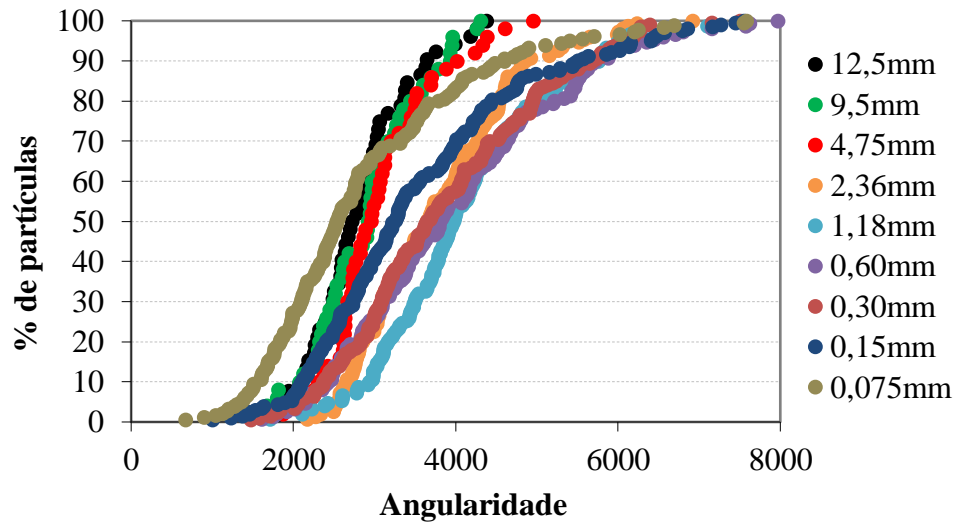
Textura superficial			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	52	359,31	166,33
9,5mm (3/8")	49	299,57	177,61
4,75mm (#4)	50	205,91	126,21

Forma 2D			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
2,36mm (#8)	151	8,23	2,10
1,18mm (#16)	150	8,25	2,13
0,6mm (#30)	150	7,98	2,11
0,3mm (#50)	200	8,09	2,26
0,15mm (#100)	203	8,28	2,22
0,075mm (#200)	180	8,83	2,26

% Partículas lamelares e alongadas						
Tamanho	Número de partículas	RLA \leq 1:1	RLA \leq 1:2	RLA \leq 1:3	RLA \leq 1:4	RLA \leq 1:5
12,5mm (1/2")	52	100%	63%	23%	4%	2%
9,5mm (3/8")	50	100%	76%	26%	8%	0%
4,75mm (#4)	50	100%	76%	22%	6%	0%

% Partículas lamelares ou alongadas						
Tamanho	Número de partículas	RL ou RA > 1:1	RL ou RA > 2:1	RL ou RA > 3:1	RL ou RA > 4:1	RL ou RA > 5:1
12,5mm (1/2")	52	100%	25%	2%	2%	0%
9,5mm (3/8")	50	100%	34%	4%	0%	0%
4,75mm (#4)	50	100%	32%	2%	0%	0%





ANEXO C – RELATÓRIO DE ANÁLISE ATRAVÉS DO AIMS DO AGREGADO GRANÍTICO 2

Data:	17/01/2019
Operador:	Caio
Descrição:	Agregado de origem granítica do Estado do Ceará – Pedreira Itatiba

Analísado	Tamanho
	25,0mm (1")
	19,0mm (3/4")
✓	12,5mm (1/2")
✓	9,5mm (3/8")
✓	4,75mm (#4)
✓	2,36mm (#8)
✓	1,18mm (#16)
✓	0,6mm (#30)
✓	0,3mm (#50)
✓	0,15mm (#100)
✓	0,075mm (#200)

Esfericidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	52	0,68	0,09
9,5mm (3/8")	50	0,65	0,11
4,75mm (#4)	50	0,60	0,10

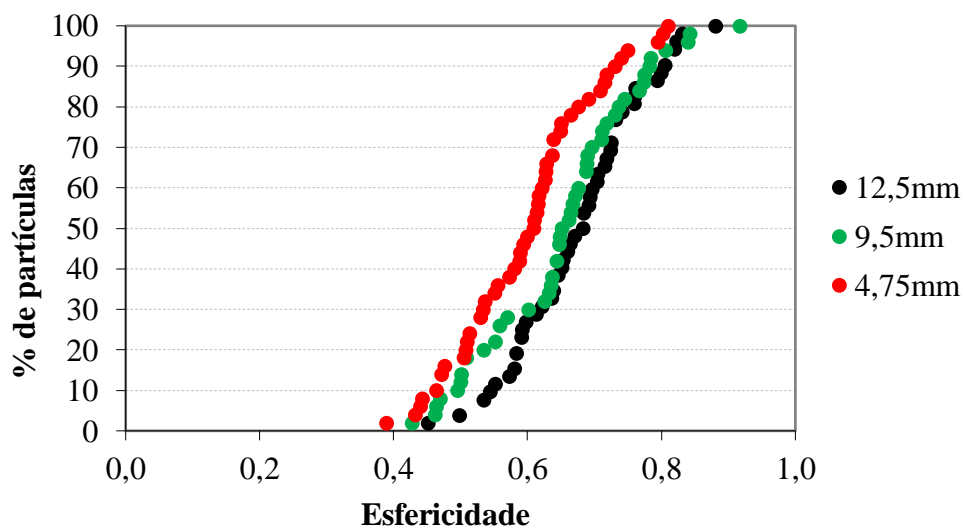
Angularidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	52	2856,48	617,30
9,5mm (3/8")	50	2997,42	765,29
4,75mm (#4)	50	3119,10	789,36
2,36mm (#8)	150	3945,34	1050,40
1,18mm (#16)	150	4336,73	1053,15
0,6mm (#30)	150	4439,02	1068,24
0,3mm (#50)	153	4021,22	1218,13
0,15mm (#100)	156	3820,92	1328,98
0,075mm (#200)	132	3114,62	1407,52

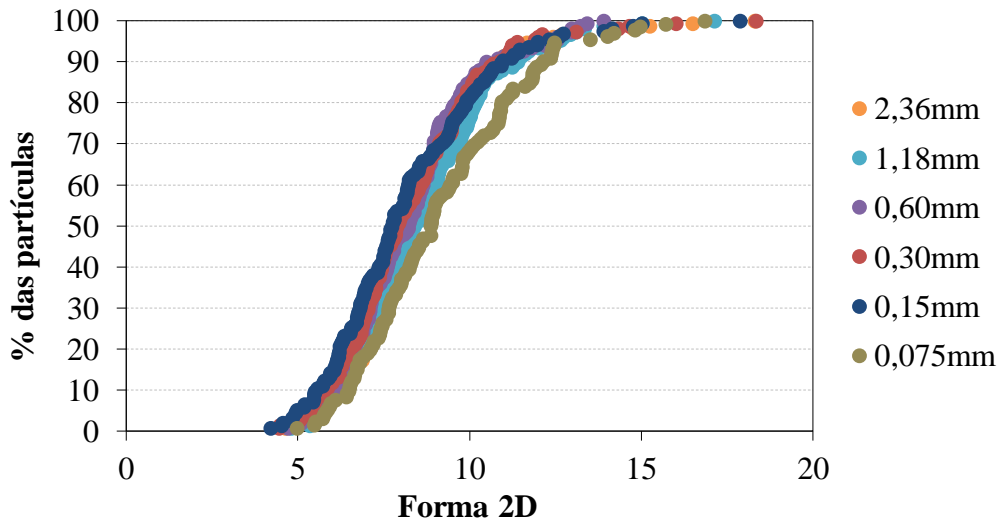
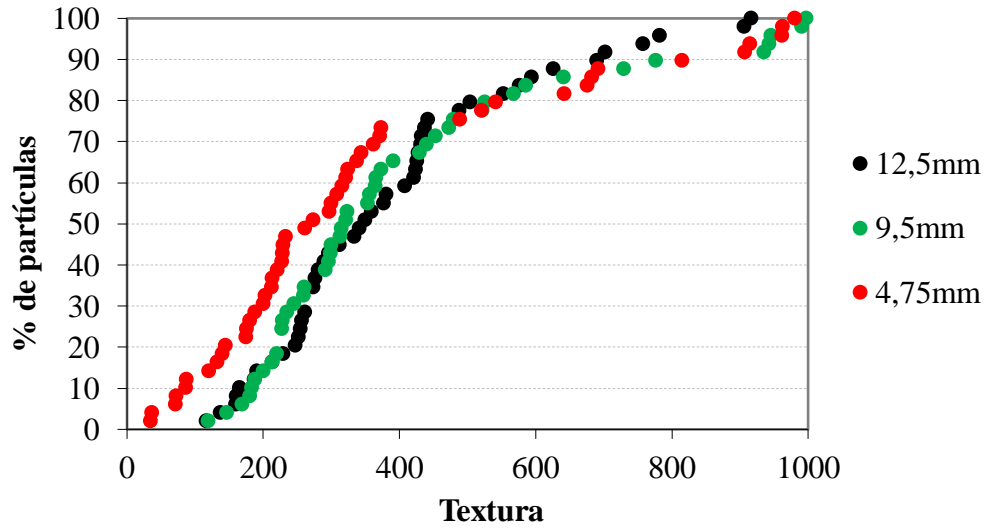
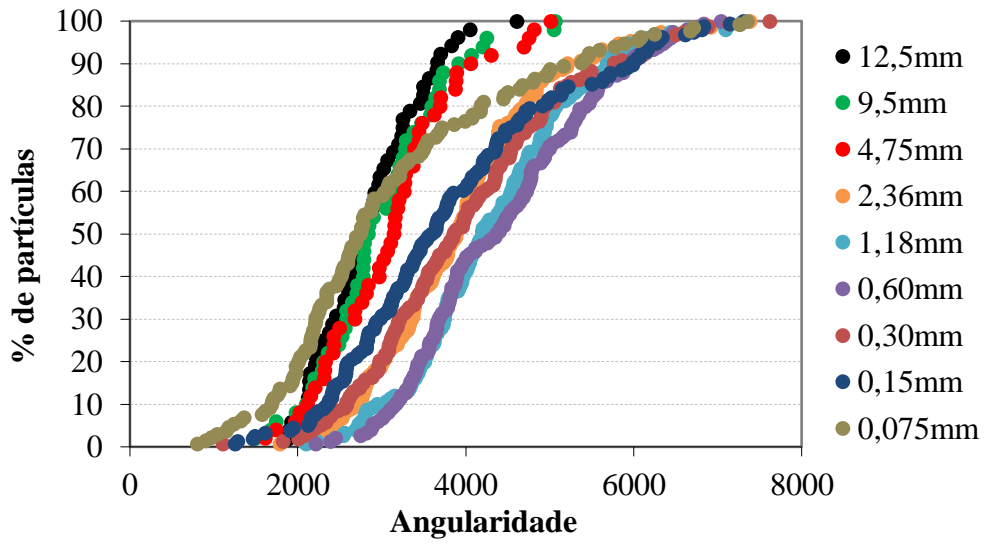
Textura superficial			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
12,5mm (1/2")	49	391,75	193,68
9,5mm (3/8")	49	406,49	236,68
4,75mm (#4)	49	358,97	266,03

Forma 2D			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
2,36mm (#8)	150	8,60	2,13
1,18mm (#16)	150	8,68	2,08
0,6mm (#30)	150	8,29	1,93
0,3mm (#50)	152	8,29	2,16
0,15mm (#100)	155	8,19	2,28
0,075mm (#200)	132	9,17	2,32

% Partículas lamelares e alongadas						
Tamanho	Número de partículas	RLA \leq 1:1	RLA \leq 1:2	RLA \leq 1:3	RLA \leq 1:4	RLA \leq 1:5
12,5mm (1/2")	52	100%	65%	21%	12%	6%
9,5mm (3/8")	50	100%	76%	34%	14%	4%
4,75mm (#4)	50	100%	90%	50%	26%	18%

% Partículas lamelares ou alongadas						
Tamanho	Número de partículas	RL ou RA > 1:1	RL ou RA > 2:1	RL ou RA > 3:1	RL ou RA > 4:1	RL ou RA > 5:1
12,5mm (1/2")	52	100%	25%	10%	4%	2%
9,5mm (3/8")	50	100%	38%	4%	0%	0%
4,75mm (#4)	50	100%	62%	24%	6%	0%





ANEXO D – CÓDIGO IMPLEMENTADO DO PDI

```
I=imread('TESTE.jpg');  
figure(1); imshow(I);
```

```
EC=rgb2gray(I);  
figure (2); imshow(EC);  
figure (3); imhist(EC);  
level=0.200;
```

```
A = im2bw(EC,level);  
figure(4); imshow(A);
```

```
B=~A;  
figure(5); imshow(B);  
bwarea(B)
```

```
H=imread('TESTE.jpg');  
figure(6); imshow(H);  
figure(7); imhist(H);
```

```
EscalaCinza=rgb2gray(H);  
imshow(EscalaCinza);  
figure (8); imhist(EscalaCinza);  
level=0.785;
```

```
C = im2bw(EscalaCinza,level);  
figure(9); imshow(C);
```

```
D=~C;  
figure(10); imshow(D);  
bwarea(D)
```

```
AREATOTAL=bwarea(D)
```

$$\text{AREARECOBERTA} = \text{bwarea(B)} / \text{AREATOTAL}$$