

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

Sílvia Lisboa Schuster

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS APLICADAS EM CAMPO POR MEIO DA TEORIA
VISCOELÁSTICA DE DANO CONTÍNUO**

Santa Maria, RS
2018

Sílvia Lisboa Schuster

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS APLICADAS EM CAMPO POR MEIO DA TEORIA
VISCOELÁSTICA DE DANO CONTÍNUO**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2018

Schuster, Silvio

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS APLICADAS EM CAMPO POR MEIO DA TEORIA
VISCOELÁSTICA DE DANO CONTÍNUO / Silvio Schuster.- 2018.
268 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Specht

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2018

1. Misturas Asfálticas 2. Fadiga 3. Mecânica do Dano
Contínuo 4. S-VECD I. Specht, Luciano II. Título.

Sílvia Lisboa Schuster

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS
APLICADAS EM CAMPO POR MEIO DA TEORIA VISCOELÁSTICA DE DANO
CONTÍNUO**

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

Aprovado em 31 de julho de 2018:

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

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)

Luis Alberto Herrmann do Nascimento, PH.D (CENPES)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à UFSM, universidade que me propiciou a graduação em engenharia civil e agora o mestrado na área de geotecnia e pavimentação.

Agradeço ao meu orientador, Professor Luciano Specht pela confiança depositada em mim, pelos ensinamentos ao longo o curso de graduação e do mestrado, e pelo convívio admirável que tens com seus orientandos, estando sempre (em todo o tempo) disponível para nos ajudar.

Agradeço a todos amigos do GEPPASV que tornaram esta caminhada muito agradável, compartilhando momentos que levo comigo e não hei de esquecer, em especial aos colegas que acompanharam com afinco a pesquisa, e a tornaram muito mais fácil: Chaveli Brondani, Bruno Gonçalves, Lucas Bueno, Évelyn Paniz, Victória Nunes, Mainara Palcikoski, Karine Wille, Ketrily Saraiva, Jennifer Ilha, Paula Pascoal, Andressa Ambrós, Rômulo Pereira, Antônio Vieira, Jéssica Venturini, Fernando Zucchi, Renan Scherer, Gustavo Pinheiro e Valdir Barboza.

Agradeço em especial aos colegas Cléber Faccin, por todas as conversas, viagens e discussões pertinentes a este trabalho, por estar sempre disposto a ajudar e pela logística com os materiais desta pesquisa; e ao Fernando Boeira, por toda a disponibilidade e por implementar e orientar a utilização do ensaio de fadiga tração-compressão.

Agradeço ao Luis Alberto H. do Nascimento, e ao Professor Deividi da Silva Pereira, pela disponibilidade de compor a banca examinadora deste trabalho. Agradeço também a Professora Tatiana Cervo e ao Professor Magnos Baroni, membros do grupo e sempre solícitos aos alunos.

Agradeço à Petrobras pelos investimentos realizados no grupo de pesquisa e à CAPES pela bolsa de mestrado.

À *North Carolina State University* e ao Professor Richard Kim por ceder a licença do software FlexPAVE 1.0 utilizado neste trabalho.

Por fim, o agradecimento mais importante a minha família, que sempre me apoiou e é força que me move para vencer os obstáculos e buscar novos desafios. Sem vocês nada seria possível.

RESUMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS APLICADAS EM CAMPO POR MEIO DA TEORIA VISCOELÁSTICA DE DANO CONTÍNUO

AUTOR: SÍLVIO LISBOA SCHUSTER
ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

A análise do comportamento das misturas asfálticas é de extrema importância no cenário da pavimentação, cujo objetivo final é o melhor desempenho aliado à economia de recursos. Sabe-se que o trincamento por fadiga é o principal tipo de defeito encontrado nos revestimentos asfálticos. Deste modo, o estudo se propõe a avaliar vinte e quatro misturas asfálticas utilizadas em campo, buscando entender de que maneira suas distintas características influenciam na resistência à fadiga. Compreende-se que os ensaios laboratoriais são o principal recurso para o estudo do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas. Este trabalho toma como base o ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão e, por meio dos dados obtidos, se propõe a aplicar o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD). Os dados obtidos a partir do modelo S-VECD, junto com as propriedades viscoelásticas apresentadas por Faccin (2018) para as mesmas misturas, serviram como base para a aplicação do software FlexPAVE - *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*. Desta maneira, foi possível avaliar o dano acumulado ao longo do tempo e analisar o desempenho do pavimento, classificando as misturas quanto à fadiga. Foi possível verificar a forte influência do tipo de ligante nos níveis de dano acumulado por fadiga, onde as misturas com ligante modificado por polímero e com asfalto borracha apresentam resultados significativamente melhores do que misturas e com ligante convencional. Embora a grande quantidade de variáveis intrínsecas às misturas, também foi possível observar indícios de correlações entre o dano por fadiga e características como a composição granulometria, forma e textura dos agregados e o teor de ligante. Representou-se a resistência à fadiga com a resistência a deformação permanente obtida por Faccin (2018), podendo assim classificar integralmente as misturas quanto aos dois principais tipos de defeitos dos revestimentos asfálticos. Correlações entre o dano e a caracterização viscoelástica linear foram testadas e demonstraram que pouco se pode inferir sobre o dano por fadiga a partir do comportamento de rigidez. O estudo também aplicou os critérios clássicos de abordagem à fadiga, por meio da construção das curvas de Wöhler com os dados experimentais, demonstrando que esta abordagem deve ser realizada com cautela, pois não possui muita representatividade com a avaliação do dano considerando simulações em condições reais de campo. De maneira geral, para os concretos asfálticos utilizados no Rio Grande do Sul, se obteve valores médios e baixos de níveis de dano frente ao fenômeno de fadiga.

Palavras-chave: misturas asfálticas; fadiga; mecânica do dano contínuo; S-VECD.

ABSTRACT

FATIGUE BEHAVIOUR STUDY OF ASPHALT MIXTURES APPLIED IN FIELD THROUGH VISCOELASTIC CONTINUOUS DAMAGE THEORY

AUTHOR: SÍLVIO LISBOA SCHUSTER
ADVISOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

The behaviour analysis of asphalt mixtures is extremely important in the paving scenario, whose final objective is to improve the performance combined with resources saving. It is known that the fatigue cracking is the main type of defect in asphalt roads. In this way, the study proposes to evaluate twenty-four asphalt mixtures used in the field, aiming to understand how their different characteristics influence the fatigue resistance. The laboratory tests are the main resource for the study of the phenomenon of fatigue in asphalt mixtures. This work is based on the Direct Tension Cyclic Fatigue test and, through the data obtained, it proposes to apply the Simplified Viscoelastic Continuum Damage model (S-VECD). The data obtained from the S-VECD model, with the viscoelastic properties presented by Faccin (2018) (for the same mixtures) served as a basis for the application of the FlexPAVE - Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses software. In this way, it was possible to evaluate the accumulated damage over time and to analyze the performance of the pavement, classifying the mixtures considering fatigue damage. It was possible to verify the strong influence of the type of binder on the levels of accumulated fatigue damage, which mixtures with modified binder by polymer and by rubber present better results than mixtures with conventional binder. Despite the large number of intrinsic variables of mixtures, it was also possible to observe evidences of correlations between fatigue damage and characteristics, such as composition granulometry, shape and texture of aggregates and binder content. The fatigue strength was correlated with the rutting resistance obtained by Faccin (2018), thus being able to fully classify the mixtures according to two main types of defects of the asphalt roads. Correlations between the damage and linear viscoelastic characterization were tested and proved to be poorly effective in predicting fatigue damage from stiffness behavior. The study also applied classical approaches to fatigue by constructing the Wöhler curves with the experimental data, demonstrating that this approach should be applied with caution, since it does not have much representation with the evaluation of the damage, considering simulations under field conditions. In general, for the asphalt concretes used in Rio Grande do Sul presented low and medium damage levels in relation to the fatigue phenomenon.

Key-words: asphalt mixtures; fatigue; continuous damage mechanics; S-VECD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações e da temperatura.....	24
Figura 2.2 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações e do número de ciclos	24
Figura 2.3 - Dano no concreto asfáltico	26
Figura 2.4 - Creep compliance. (a) input de tensão; (b) resposta de deformação	29
Figura 2.5 - Input de histórico de tensões na função creep	30
Figura 2.6 - Módulo de relaxação. (a) Input de deformação; (b) resposta de tensão	31
Figura 2.7 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo.....	33
Figura 2.8 - Modelo de Maxwell.....	36
Figura 2.9 - Modelo de Kelvin-Voigt.....	36
Figura 2.10 - Modelo de Maxwell generalizado.....	37
Figura 2.11 - Modelo de Kelvin-Voigt generalizado	38
Figura 2.12 - Previsões de modelos de espectro discreto com diferente número de elementos e o modelo 2S2P1D.....	39
Figura 2.13 - Representação da resposta de um amortecedor parabólico	40
Figura 2.14 - Modelo 2S2P1D.....	40
Figura 2.15 - Influência dos parâmetros associados aos elementos físicos do modelo 2S2P1D	41
Figura 2.16 - Exemplo de curva de Wöhler.....	43
Figura 2.17 - Diferença entre os processos de fadiga e deformação permanente	46
Figura 2.18 - Ensaio de tração	50
Figura 2.19 - Ensaio de flexão	50
Figura 2.20 - Configurações de entrada e resposta, de tensões e deformações em ensaios de fadiga	52
Figura 2.21 - Evolução do módulo dinâmico e do ângulo de fase durante ensaio cíclico	54
Figura 2.22 - Evolução do módulo complexo, ângulo de fase e temperatura superficial durante ensaio cíclico	55
Figura 2.23 - Definição de diferentes efeitos durante os ensaios cíclicos.....	59
Figura 2.24 - Relação tensão-deformação em materiais LVE com ensaio tração-compressão cíclico.	60
Figura 2.25 - Falha por fadiga determinada pelo método energético e o parâmetro DER.	61
Figura 2.26 - Vida de fadiga definida pelo ângulo de fase.....	62
Figura 2.27 - Tensão e deformação iniciais em ensaio com controle de deslocamento do atuador	64
Figura 2.28 - Exemplo de aplicação dos ciclos de carregamento no ensaio de tração-compressão em deformação controlada.....	65
Figura 2.29 - Comportamento tensão-deformação em ensaio cíclico de tensão controlada em material LVE	70
Figura 2.30 - Pseudo deformação em ensaio de tensão controlada com danificação ao longo dos ciclos.....	71
Figura 2.31 - Translação Tempo-Temperatura em curva mestra	76
Figura 2.32 - Determinação da tensão para deformação fixada em diferentes temperaturas e ensaios de controle do atuador	78
Figura 2.33 - Translação das curvas de tensão para tempo reduzido e temperatura de referência de 25°C	78

Figura 2.34 - Esquema gráfico das variáveis em ensaio de controle do deslocamento do atuador	84
Figura 2.35 - Representação gráfica da energia de pseudo-deformação liberada (WCR)	86
Figura 2.36 - Evolução (a) e taxa (b) da energia de pseudo deformação liberada (WCR)	87
Figura 2.37 - Comparação entre Nf previsto pelo critério GOR e Nf experimental definido pela queda do ângulo de fase. (a) Escala aritmética; (b) Escala logarítmica.....	88
Figura 2.38 - G vs Nf para diferentes modos de carregamento.....	88
Figura 2.39 - GR vs Nf para diferentes modos de carregamento	89
Figura 2.40 - Comparação entre Nf previsto pelo critério GR e Nf experimental definido pela queda do ângulo de fase. (a) Escala aritmética; (b) Escala logarítmica.....	90
Figura 3.1 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas	94
Figura 3.2 - Mapa localização das usinas amostradas	96
Figura 3.3 - Localização das pedreiras com coleta de material	96
Figura 3.4 - Espaço Cole-Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D. 107	
Figura 3.5 - Diagrama de Black para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D 107	
Figura 3.6 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico	108
Figura 3.7 - Curvas mestras de Ângulo de Fase	109
Figura 3.8 - Misturador (a) e compactador (b) utilizados na moldagem das amostras.....	114
Figura 3.9 - Evolução do ângulo de fase e do módulo dinâmico em ensaio de fadiga à tração-compressão.....	115
Figura 3.10 - Gabarito de colagem da amostra nas placas top e down desenvolvido por Boeira (2018).....	116
Figura 3.11 - Amostra colada as placas e fixa ao sistema Amostra colada as placas e fixa ao sistema.....	116
Figura 3.12 - Curva mestra de módulo dinâmico obtida em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear.....	119
Figura 3.13 - Plano Cole-Cole obtido em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear.....	119
Figura 3.14 - Curva mestra de ângulo de fase obtida em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear.....	120
Figura 3.15 - Diagrama Black obtido em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear.....	120
Figura 3.16 - Evolução do Módulo Dinâmico e do Ângulo de Fase ao longo dos ciclos.....	121
Figura 3.17 - Evolução da integridade e do acúmulo de dano pelo S-VECD.....	121
Figura 3.18 - Curva característica de dano (C vs S)	122
Figura 3.19 - Estruturas de pavimento utilizadas para análise de desempenho frente a fadiga	125
Figura 3.20 - Aba "General Information" do software FlexPAVE.....	126
Figura 3.21 - Aba "Desing Structure" do software FlexPAVE.....	127
Figura 3.22 - Aba "Climate Information" do software FlexPAVE.....	128
Figura 3.23 - Variação anual de temperaturas na cidade de Savannah.....	128
Figura 3.24 - Aba "Traffic" do software FlexPAVE.....	130
Figura 3.25 - Aba "Analysis and Results Options" do software FlexPAVE	130
Figura 3.26 - Malha de pontos utilizada para determinação do dano médio acumulado na camada de revestimento	131
Figura 3.27 - Dano médio por fadiga ao longo do tempo	131
Figura 3.28 - Localização e quantificação do dano com tempo fixado	132
Figura 4.1 - Curvas de Wöhler por meio dos dados experimentais das misturas	134
Figura 4.2 - Determinação da área sob a curva para cálculo do fator de área de fadiga (FAF)	135

Figura 4.3 - Endurance Limite para misturas asfálticas com modificação do ligante.....	136
Figura 4.4 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga	139
Figura 4.5 - Curvas C vs S da mistura U2-DAER-FXB-50/70	140
Figura 4.6 - Curvas características de dano (C vs S) para as todas as misturas	142
Figura 4.7 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com CAP 50/70	143
Figura 4.8 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com ligantes AMP 60/85 e AMP 65/90.....	143
Figura 4.9 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com asfalto borracha	144
Figura 4.10 - Amostra rompida da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF com elevado número de agregados fraturados.....	146
Figura 4.11 - Envoltórias de ruptura G^R vs N_f	149
Figura 4.12 - Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura GR, 19°C e 10HZ.	152
Figura 4.13 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E1.....	156
Figura 4.14 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E2.....	156
Figura 4.15 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E3.....	157
Figura 4.16 - Dano médio acumulado em 120 meses para cada espessura simulada.....	158
Figura 4.17 - Dano médio acumulado ao longo do tempo para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do GR por Mocelin (2018).	159
Figura 4.18 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E1.....	160
Figura 4.19 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo para as misturas com CAP 50/70	162
Figura 4.20 - Dano limitado Mistura U1-DAER-FXA-50/70: 1 mês e 120 meses	165
Figura 4.21 - Dano limitado Mistura U2-DAER-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses	165
Figura 4.22 - Dano limitado Mistura U4-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses.....	165
Figura 4.23 - Dano limitado Mistura U4-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses.....	166
Figura 4.24 - Dano limitado Mistura U8-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses.....	166
Figura 4.25 - Dano limitado Mistura U8-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses.....	166
Figura 4.26 - Dano limitado Mistura U10-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses.....	166
Figura 4.27 - Dano limitado Mistura U11-DAER-FXA-50/70: 1 mês e 120 meses	166
Figura 4.28 - Dano limitado Mistura U13-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses.....	167
Figura 4.29 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses.....	167
Figura 4.30 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses.....	167
Figura 4.31 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes.....	168
Figura 4.32 – Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga.....	170
Figura 4.33 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas.....	170
Figura 4.34 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para dano em 120 meses considerando as misturas com CAP 50/70	172
Figura 4.35 - Curvas de dano médio acumulado para misturas com ligante modificado por polímero.....	173
Figura 4.36 - Dano limitado Mistura U2-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses.....	175
Figura 4.37 - Dano limitado Mistura U2-DNIT-FXC-65/90: 1 mês e 120 meses.....	175
Figura 4.38 - Dano limitado Mistura U5-DNIT-FXB-60/85: 1 mês e 120 meses.....	175
Figura 4.39 - Dano limitado Mistura U6-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses.....	175
Figura 4.40 - Dano limitado Mistura U9-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses.....	175
Figura 4.41 - Dano limitado Mistura U12-DAER-FXB-60/85: 1 mês e 120 meses	176
Figura 4.42 - Dano limitado Mistura U12-DAER-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses	176

Figura 4.43 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses	176
Figura 4.44 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes	177
Figura 4.45 - Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga	178
Figura 4.46 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas	179
Figura 4.47 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para dano em 120 meses considerando as misturas com AMP 60/85 e AMP 65/90	180
Figura 4.48 - Curvas de dano médio acumulado para misturas com asfalto borracha AB-08	181
Figura 4.49 - Curvas granulométricas das misturas com asfalto borracha AB-08	182
Figura 4.50 - Dano limitado Mistura U3-DAER-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses.....	183
Figura 4.51 - Dano limitado Mistura U5-DAER-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses.....	183
Figura 4.52 - Dano limitado Mistura U5-DNIT-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses	184
Figura 4.53 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes	185
Figura 4.54 - Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga	186
Figura 4.55 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas	187
Figura 4.56 - Correlação entre dano médio acumulado por fadiga 120 meses com ensaio de RT	188
Figura 4.57 - Matriz de correlação entre dano acumulado e índices obtidos a partir do RT .	190
Figura 4.58 - Correlação entre resultados de RT e demais índices.....	191
Figura 4.59 - Análise da frequência reduzida nos picos de ângulo de fase nas curvas mestras	192
Figura 4.60 - Correlação entre $ E^* \times \sin\phi$ por dano acumulado por fadiga	194
Figura 4.61 - Correlação entre o parâmetro FAF e o dano simulado em 120 meses.....	198
Figura 4.62 - Quadro de classificação global de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente.....	199
Figura 4.63 - Quadro de classificação global considerando o parâmetro FAF obtido pela simulação G^R e os resultados de FN para deformação permanente	202

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Níveis de deformação propostos pela ASSHTO TP 107-14	66
Tabela 3.1 - Resumo dos materiais coletados.....	94
Tabela 3.2 - Relação de coletas e nomenclaturas das misturas ³	95
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais	98
Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de morfologia dos agregados minerais	99
Tabela 3.5 – Ligantes asfálticos utilizados nas misturas	100
Tabela 3.6 – Propriedades dos ligantes convencionais (CAP 50-70).....	101
Tabela 3.7 – Propriedades dos cimentos asfálticos modificados (AMP 60-85).....	102
Tabela 3.8 – Propriedades do cimento asfáltico modificado (AMP 65-90)	102
Tabela 3.9 – Propriedades dos ligantes modificados por borracha (ECOFLEX AB-08).....	103
Tabela 3.10 - Propriedades do cimento asfáltico modificado (TLA FLEX)	103
Tabela 3.11 – Parâmetros volumétricos e características das misturas	104
Tabela 3.12 - Valores de Módulo de Resiliência a 25°	105
Tabela 3.13 - Coeficientes do modelo 2S2P1D.....	110
Tabela 3.14 - Flow Number, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros..	111
Tabela 3.15 - Temperaturas de compactação das amostras.....	113
Tabela 3.16 - Distribuição do tráfego ao longo das horas do dia	129
Tabela 4.1 - Classificação das misturas por meio do FAF das curvas de Wöhler experimentais	137
Tabela 4.2 - Coeficientes C_{11} , C_{12} , Y e Δ para cada mistura	141
Tabela 4.3 - Módulo Dinâmico das misturas separadas por tipo de ligante.....	147
Tabela 4.4 - Classificação e comparação dos FAF para o modelo com o uso do S-VECD e pelas curvas de Wöhler para os dados brutos de ensaio	153
Tabela 4.5 - Níveis de dano acumulado em 120 meses na estrutura E1.....	161
Tabela 4.6 - Níveis de dano acumulado em 120 meses discretizados para misturas com CAP 50/70	163
Tabela 4.7 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses	168
Tabela 4.8 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com ligante CAP 50/70 e dano em 120 meses	169
Tabela 4.9 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses...	170
Tabela 4.10 - Níveis de dano acumulado em 120 meses discretizados para misturas com CAP 50/70	173
Tabela 4.11 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses	177
Tabela 4.12 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com ligante modificado por polímero e dano em 120 meses	178
Tabela 4.13 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses.	179
Tabela 4.14 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses	184
Tabela 4.15 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com asfalto borracha e dano em 120 meses	185
Tabela 4.16 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses.	186
Tabela 4.17 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de Tenacidade, Energias de Fratura, IT e IF.....	189
Tabela 4.18 - Relação de R^2 para resultados dos índices e do dano acumulado em 120 meses	190

Tabela 4.19 - Valores de frequência reduzida nos picos de ângulo de fase.....	193
Tabela 4.20 – Comparação das classificações propostas para a análise do dano acumulado por fadiga.....	196

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	23
2.2	COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	27
2.2.1	Creep Compliance	29
2.2.2	Módulo de Relaxação	31
2.2.3	Módulo Complexo	32
2.2.4	Interconversão entre as funções unitárias	34
2.3	MODELOS ANALÓGICOS DE RESPOSTA DO COMPORTAMENTO LINEAR VISCOELÁSTICO	35
2.3.1	Modelos com espectro discreto de relaxação	35
2.3.2	Modelos com espectro contínuo de relaxação	39
2.4	O FENÔMENO DE FADIGA	42
2.4.1	Fadiga em misturas asfálticas	44
2.4.2	Fatores de influência no desempenho a fadiga	47
2.5	ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	49
2.5.1	Fenômenos físicos nos ensaios cíclicos	53
2.5.2	Fenômenos de influência não relatados como fadiga	55
2.5.3	Critérios de falha por fadiga	59
2.5.4	Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão	63
2.6	MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO (VECD)	66
2.6.1	Bases teóricas do modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)	68
2.6.2	Princípio de correspondência elástico-viscoelástico	69
2.6.3	Teoria do trabalho potencial	72
2.6.4	Princípio da superposição tempo-temperatura	75
2.6.5	Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD)	78
2.6.6	Critério de falha por fadiga do modelo S-VECD	85
3	MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL	91
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	91
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	93
3.2.1	Misturas asfálticas densas	95
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	112
3.3.1	Coleta das misturas	112
3.3.2	Moldagem dos corpos de prova	113
3.3.3	Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão	114
3.4	APLICAÇÃO DO MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO SIMPLIFICADO	118
3.4.1	Caracterização linear viscoelástica (LVE)	118
3.4.2	Calibração das séries de Prony com uso do modelo 2S2P1D	118
3.4.3	Obtenção da curva característica de dano	120
3.5	ANÁLISE DE DESEMPENHO POR MEIO DO FLEXPAVE 1.0	123
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	133
4.1	CURVAS DE WÖHLER	133
4.2	MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO	138
4.2.1	Simulação do comportamento a fadiga pelo critério de falha G^R e coeficientes do modelo S-VECD	151

4.3	AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO EM ESTRUTURA NO SOFTWARE FLEXPAVE 1.0	154
4.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO E DOS FATORES DE INFLUÊNCIA DAS MISTURAS A PARTIR DO DANO MÉDIO ACUMULADO NA ESTRUTURA E1	159
4.4.1	Misturas com ligante convencional CAP 50/70.....	162
4.4.2	Misturas com ligante modificado por polímero.....	172
4.4.3	Misturas com asfalto borracha ECOFLEX AB-08	181
4.5	ANÁLISES DOS DEMAIS RESULTADOS E CORRELAÇÕES	187
4.5.1	Ensaio de resistência a tração por compressão diametral e índices correlatos	187
4.5.2	Correlações de dano por fadiga com o comportamento linear viscoelástico	191
4.6	CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS FRENTE AO FENÔMENO DE FADIGA	195
4.7	CLASSIFICAÇÃO GLOBAL DAS MISTURAS	198
4.8	CONSIDERAÇÕES RESUMIDAS SOBRE OS RESULTADOS	203
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	207
5.1	CONCLUSÕES	207
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	212
	REFERÊNCIAS.....	214

1 INTRODUÇÃO

Inegavelmente, o transporte rodoviário criou e propicia um ciclo vital para a sociedade, sendo as estradas pavimentadas um dos pilares da contemporaneidade. A agilidade do deslocamento, o conforto, a segurança e a economia, são finalidades que devem ser atendidas por um pavimento. Todos estes princípios estão diretamente ligados ao estado em que o pavimento se encontra, e em especial ao estado da camada de revestimento e de sua superfície. Sendo assim, garantir que o pavimento possua durabilidade e resistência as cargas que lhe serão impostas são pressupostos para que este cumpra com sua função.

Conforme Nascimento (2015), o trincamento por fadiga é o principal defeito dos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil. Este se caracteriza por trincas induzidas por carregamento repetido do tráfego incidente no pavimento. Modelar e prever o fenômeno de fadiga em misturas asfálticas é extremamente importante para o projeto de revestimentos asfálticos, no entanto a previsão precisa e a avaliação da fadiga são tarefas difíceis, não só por causa da natureza complexa do fenômeno, como também pela dificuldade operacional com os ensaios de fadiga.

Compreender o comportamento das misturas asfálticas sob indução de cargas repetitivas é imprescindível para prever corretamente o fenômeno de fadiga e o desempenho do pavimento. O concreto asfáltico é um material com comportamento dependente de todo seu histórico de tensões, de tal maneira que a avaliação deste comportamento, sob um complexo intervalo de cargas aplicadas, tempos distintos de aplicação, e diferentes temperaturas requer a aplicação da teoria da viscoelasticidade, e da análise do crescimento do dano no material.

Nos últimos anos, os modelos de fadiga com base na teoria da viscoelasticidade e na mecânica de dano contínuo permitiram uma compreensão significativamente melhor de como a danificação evolui nas misturas asfálticas, sob diferentes condições de carga e ambiente. O modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD), abordado neste estudo, faz uso de propriedades fundamentais do material para caracterizar efetivamente o comportamento das misturas asfálticas, usando um programa de ensaios laboratoriais eficiente e simplificado. A partir deste modelo é possível caracterizar o dano por fadiga e prever o seu acontecimento.

Sendo assim, este estudo se propôs a avaliar vinte e quatro misturas asfálticas utilizadas em campo no Estado do Rio Grande do Sul, buscando entender de que maneira distintas características influenciam na resistência à fadiga. Para isso, o estudo toma o ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão e se propõe a aplicar o modelo S-VECD, utilizando-o como base para a análise do comportamento frente ao fenômeno de fadiga destas misturas.

Concomitante a este estudo, Faccin (2018) analisou a resistência a deformação permanente enquanto Brondani (2018) efeito deletério da água fazendo uso das mesmas misturas, de forma a criar um espectro completo para a avaliação das mesmas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento quanto à fadiga de diferentes misturas asfálticas densas em utilização no estado do Rio Grande do Sul, por meio do ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão e do modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desse trabalho:

- a) Gerar um banco de dados de parâmetros e propriedades de fadiga de misturas asfálticas em utilização no RS;
- b) Consolidar o processo metodológico de ensaio a fadiga implementado por Boeira (2018) no GEPPASV, e também o protocolo S-VECD para misturas asfálticas aplicadas em campo no RS;
- c) Utilizar o software FlexPAVE 1.0, de análise de desempenho de pavimentos, que leva em consideração as propriedades viscoelásticas e de dano, para por meio dos resultados obtidos pelo S-VECD, classificar as misturas quanto à resistência à fadiga;
- d) Avaliar a influência da faixa granulométrica e do tipo de ligante asfáltico na resistência à fadiga das misturas estudadas;
- e) Avaliar os Índices de Tenacidade e Flexibilidade, a Tenacidade, Energia de Fratura, e a Energia Total, obtidos por meio do ensaio de RT por Faccin (2018), comparando-os com a classificação de resistência à fadiga obtida neste trabalho, para a possível validação de seu uso na análise do desempenho à fadiga;
- f) Avaliar a influência das propriedades físicas dos agregados na resistência à fadiga das misturas estudadas;
- g) Comparar os resultados desta pesquisa com outros estudos, em especial com o estudo de Faccin (2018), que avaliou as propriedades de rigidez e de dano por deformação permanente para as mesmas misturas asfálticas;

h) Classificar as misturas asfálticas aplicadas em campo e utilizadas nesta pesquisa, de maneira global, frente aos dois principais defeitos encontrados nos pavimentos, em uma proposta de quadro de classificação com os dados de dano por fadiga e de resistência à deformação permanente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos que se fazem pertinentes ao entendimento do estudo em questão. Primeiramente será exposta uma revisão sobre o comportamento mecânico das misturas, dissertando sobre a influência do tráfego e da temperatura e dando ênfase ao domínio viscoelástico linear.

Abre-se então uma nova seção que se direciona ao entendimento do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas, seguida de comentários acerca dos principais fatores de influência em nível laboratorial e em nível de campo. Dá-se sequência ao assunto com uma sucinta revisão dos ensaios de fadiga e dos fenômenos físicos intrínsecos aos ensaios cíclicos de misturas asfálticas. Por fim apresentam-se os critérios de falha por fadiga tradicionais mais abordados pela literatura.

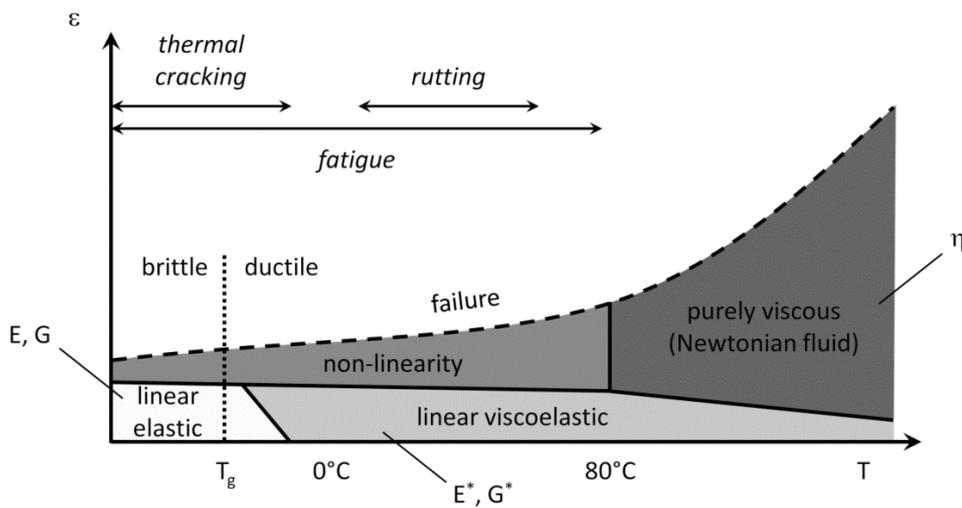
O último tópico apresentado na revisão se concentra no modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD). Exibe-se a teoria que dá base ao modelo chegando até o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD) e ao critério de falha por fadiga baseado na pseudo-energia liberada (G^R), ambos utilizados para a caracterização das misturas deste estudo.

2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Sabe-se que o comportamento mecânico das misturas asfálticas é extremamente complexo, estando este sujeito a uma gama de fatores externos e as suas propriedades intrínsecas. Mangiafico (2014), relata que em um nível macroscópico, podemos considerar que o concreto asfáltico é um material contínuo, homogêneo e isotrópico, e seu comportamento seja influenciado por três fatores: temperatura, amplitude das deformações, e ao número de ciclos de carga solicitados.

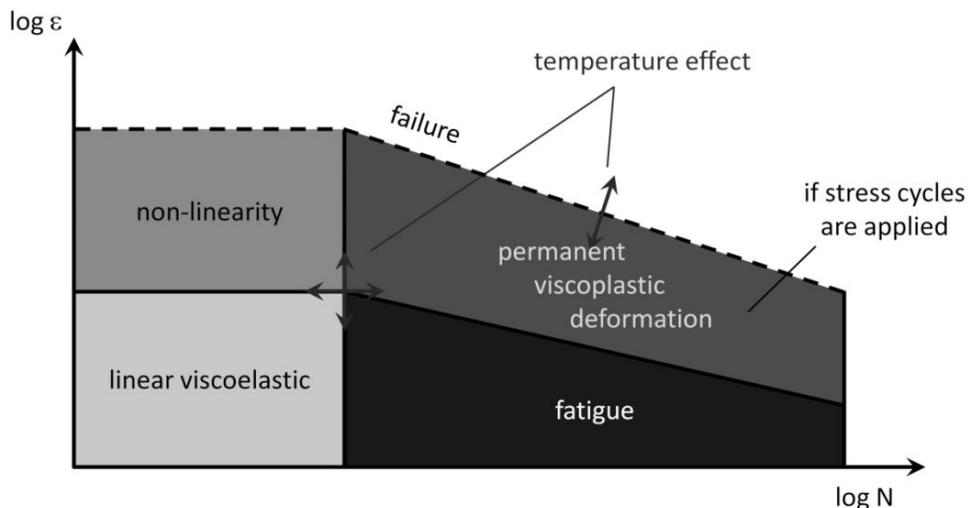
Conforme Olard (2005), o comportamento mecânico da mistura pode assumir diferentes domínios dependendo dos valores assumidos para cada um destes fatores. Na Figura 2.1, podemos observar o comportamento para diferentes intervalos de deformação (ϵ) e temperatura (T), e na Figura 2.2 podemos ver os diferentes domínios de comportamento para relações de deformação (ϵ) e número de ciclos (N).

Figura 2.1 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações e da temperatura



Fonte: Mangiafico 2014

Figura 2.2 - Domínios típicos do comportamento mecânico das misturas asfálticas em função das deformações e do número de ciclos



Fonte: Mangiafico 2014

Relata Kim (2009) que a temperatura afeta o comportamento do material asfáltico de duas principais maneiras. A primeira delas diz respeito a alteração da rigidez do material. A segunda se refere ao efeito das movimentações térmicas durante as mudanças de temperatura.

A alteração da rigidez provém da suscetibilidade térmica das misturas betuminosas, característica herdada das propriedades do ligante asfáltico (Renauld, 1996). Em condições de aumento de temperatura, o ligante asfáltico passa a apresentar uma menor viscosidade, levando conseqüentemente a uma perda de rigidez da mistura. De mesmo modo, a medida que perdemos

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

Já quando tratamos da influência do tráfego incidente no revestimento asfáltico, devemos reportar especialmente a duas questões: a magnitude das cargas, e seu tempo de aplicação. De maneira geral, a carga atua como a força que solicita o revestimento impondo-lhe deformações visto que aplica tensões à medida que se movimenta. Já o tempo de aplicação desta carga influi diretamente no domínio de comportamento que a mistura asfáltica estará sujeita.

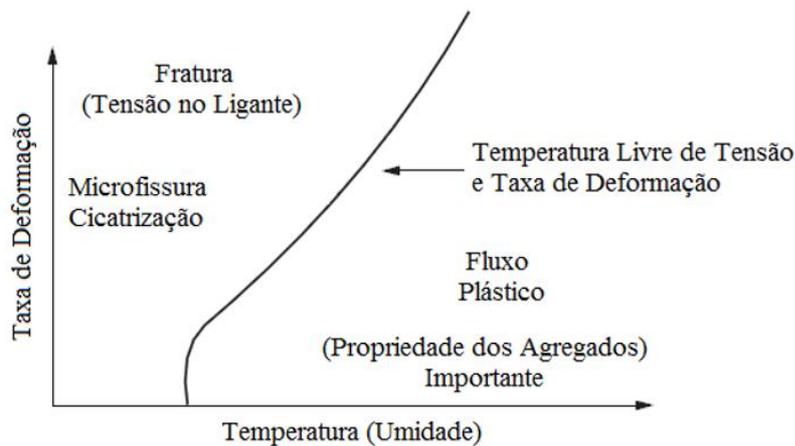
As misturas asfálticas devido às propriedades de viscoelasticidade, são susceptíveis a frequência de aplicação de carga. Nota-se que a quantidade de deformação permanente residual é inversamente proporcional à velocidade de aplicação da carga. Desta forma, uma carga em movimento rápido, com baixo tempo de aplicação, induz somente as componentes viscoelásticas, não produzindo parcela de deformação considerável. Em contrapartida, uma carga de baixa rotatividade, e maior tempo de aplicação ultrapassa o domínio viscoelástico, de modo a atingir o fluxo plástico. Assim ao cessar a aplicação de carga as parcelas atreladas ao domínio plástico não retornam as antigas condições, levando a sucessivas micro plastificações ligadas à danificação do material (KIM, 2009).

Ainda quanto à incidência das cargas, verifica-se que o domínio do fenômeno de fadiga está intrinsecamente ligado a quantidade de ciclos de aplicação de cargas e a magnitude das deformações causadas por essas. Os comentários a respeito do fenômeno de fadiga serão apresentados em seção específica deste trabalho.

De forma geral, a rigidez da mistura asfáltica depende da temperatura e da taxa de deformação do carregamento. A qualquer temperatura, o ligante asfáltico deformará de forma lenta e permanente se for carregado lentamente, enquanto que se for carregado a uma taxa maior, será muito mais rígido e estará sujeito a fratura. A qualquer taxa de descarga de deformação dada, existe uma temperatura acima da qual o material irá relaxar rapidamente o suficiente para que nenhuma tensão se acumule no material. Estes dois fatos conhecidos sobre materiais em geral são ilustrados na Figura 2.3 que apresenta a taxa de deformação versus a

temperatura, mostrando um limite de temperatura livre de tensões e de taxa de deformação acima da qual o material experimentalá micro fissurações, e abaixo do qual o material sofrerá fluxo de plástico (KIM 2009).

Figura 2.3 - Dano no concreto asfáltico



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

A Figura 2.3 representa bem a problemática em torno dos problemas de deformação permanente e fadiga, que de maneira geral apresentam gêneses diferentes, principalmente com respeito ao intervalo de temperatura em que cada qual ocorre. Existe então uma relação “ótima” entre a taxa de deformação e a temperatura que permite uma mínima possibilidade de danificação, seja por fadiga, seja por deformação permanente. Podemos exemplificar de tal forma: se tomarmos uma taxa de deformação elevada, em pequenas temperaturas, a incidência da fissuração é muito grande. A mesma interpretação mostra que para temperaturas elevadas, independente da taxa de deformação, o problema do fluxo plástico se evidencia, de maneira que o esqueleto pétreo ganha maior importância com a queda de rigidez do ligante.

Visto que o comportamento das misturas é diretamente afetado, tanto para a análise de rigidez, quanto para a análise de dano, por fatores como a temperatura, a taxa de carregamento, e os níveis de deformação, e estes, estão intimamente ligados às propriedades viscoelásticas das misturas, percebe-se a importância do entendimento acerca do tema, de maneira que apresente-se aqui uma seção própria sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas.

2.2 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Viscoelasticidade é um domínio de comportamento tempo-dependente típico de materiais que apresentam em conjunto respostas de características elásticas e viscosas quando experimentam deformações.

Para os materiais elásticos, a relação tensão deformação pode ser descrita usando a lei de Hooke, isto é, tensão e deformação são linearmente proporcionais e o material é afetado apenas pela tensão ou deformação imposta no momento atual.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Onde ε e σ são respectivamente as deformações e tensões uniaxiais, e E o módulo de elasticidade.

Desta forma, quando a tensão aplicada é retirada, a deformação retorna a zero instantaneamente; o mesmo vale para quando uma deformação imposta é levada a zero, a tensão aplicada cessa sem depender do tempo. Contudo, Christensen (1982) cita que os materiais viscoelásticos, que exibem comportamento tempo-dependente, não apresentam respostas afetadas momentaneamente, mas sim resposta dependente de toda a história de carregamentos imposta ao material.

Smith (2004) define os materiais viscoelásticos como aqueles que podem armazenar e dissipar energia mecânica em resposta a uma deformação por uma tensão mecânica. A capacidade de armazenar está ligada ao comportamento elástico, e as perdas dissipativas aos efeitos viscosos.

Os materiais viscoelásticos então, nem armazenam nem dissipam toda a energia mecânica que lhes é fornecida. Para Babadopulos (2014), quando submetidos a carregamentos rápidos (altas frequências), exibem um comportamento próximo ao dos sólidos elásticos (armazenamento total da energia mecânica). Em contrapartida, quando se aplicam carregamentos a uma taxa lenta (baixas frequências), o material apresenta deformações lentas com o passar do tempo, assemelhando-se ao comportamento dos fluidos viscosos (dissipação total da energia mecânica).

Estas tendências também são observadas quando se analisa a temperatura. Baixas temperaturas levam a uma maior rigidez e a um comportamento próximo do elástico, com menor defasagem entre a aplicação da tensão e a resposta de deformação, levando a menores

ângulos de fase. Já quando a temperatura atinge níveis elevados o ligante asfáltico tende a se aproximar de um comportamento puramente viscoso, apresentando ângulo de fase próximo a 90°. Neste caso, para as misturas asfálticas, o intertravamento do esqueleto pétreo evita que o comportamento puramente viscoso se evidencie, tornando-se mais importante a medida que as temperaturas aumentam e o ligante perde rigidez.

Conforme Huang (2004) é de comum acordo na literatura que, para pequenas deformações, as misturas asfálticas apresentam comportamento viscoelástico linear (LVE), e que o uso da teoria viscoelástica é um melhor artifício em frente a teoria da elasticidade para nos aproximar do real comportamento das misturas asfálticas. Zhang et al. (2012) cita que o domínio LVE é restrito a certos níveis de tensões e deformações, que para as misturas asfálticas encontra-se em um intervalo de deformação de até 150 $\mu\epsilon$. Outros autores como Di Benedetto e Corté (2005) e Cardona et al. (2015) fixam esse limite de deformação em 100 $\mu\epsilon$. Zhang et al. (2012) lembra ainda que, mesmo dentro deste intervalo de deformações, para um elevado número de ciclos, o fenômeno de fadiga pode se evidenciar. Desta forma temos a indução de dano ao material, e a resposta não pode mais ser definida como LVE.

As misturas asfálticas exibem um comportamento tempo-dependente, onde a resposta do material não é somente em função da entrada atual, mas sim e toda história de solicitações ao qual este foi submetido. Quando as condições de carregamento não induzem dano a amostra, a resposta desta pode ser definida com viscoelástica linear.

Quando falamos em viscoelasticidade linear reportamos a dois termos, o viscoelástico, e o linear. A viscoelasticidade está associada a um sistema de resposta tempo-dependente, com o material apresentando um comportamento dentro de um intervalo que varia do elástico ao viscoso. Enquanto isso, a linearidade está associada diretamente a sistemas em que as condições de homogeneidade e superposição são satisfeitas.

Desta forma, o material é dito viscoelástico linear se apresenta resposta de recuperação dependente do tempo e se satisfaz as propriedades de homogeneidade (Equação 2) e superposição (Equação 3):

$$R\{AI\} = AR\{I\} \quad (2)$$

$$R\{I1 + I2\} = R\{I1\} + R\{I2\} \quad (3)$$

onde I , $I1$ e $I2$ representam o histórico de dados de entrada; R , a resposta; e A uma constante arbitrária.

Na prática, a condição de homogeneidade nos diz que, se os dados de entrada ou *inputs* são dobrados, então a resposta também deverá dobrar; enquanto a condição de superposição estabelece que a soma de dois *inputs* é equivalente a soma da resposta individual de cada *input*.

Devido à dependência do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento), as equações constitutivas dos materiais viscoelásticos deixam de ser algébricas, como é o caso das relações elásticas, e passam a ser representadas por integrais de convolução (Christensen, 1982). Para o caso uniaxial, as relações tensão-deformação dos materiais viscoelásticos lineares são dadas pelas Equações 4 e 5, abaixo.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (5)$$

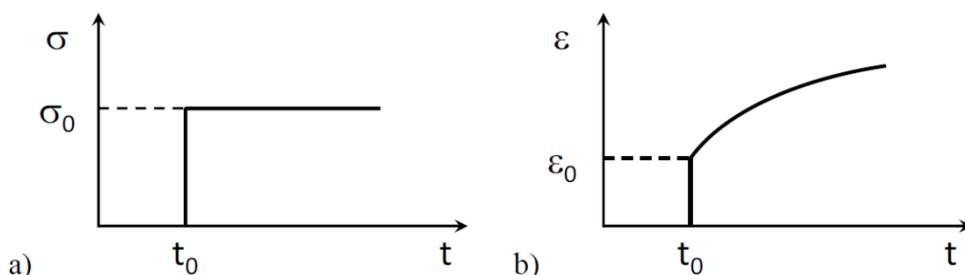
Onde: E e D são respectivamente o módulo de relaxação e a função creep; t o tempo de interesse, e τ a variável de integração.

A resposta dos materiais viscoelásticos pode ser dividida em três tipos de funções que descrevem a evolução no tempo: o creep compliance, o módulo de relaxação, e o módulo complexo.

2.2.1 Creep Compliance

O *Creep Compliance* é a relação da resposta de deformação, para a aplicação de uma tensão uniaxial constante (σ_0), conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Creep compliance. (a) input de tensão; (b) resposta de deformação



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

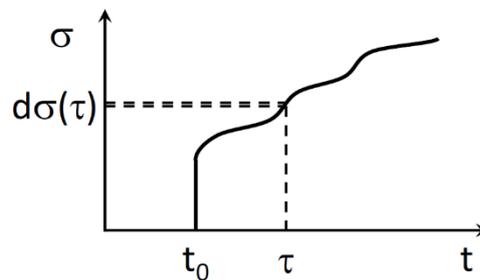
A resposta do material consiste então em uma deformação $\varepsilon(t)$ igual a:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 D(t, t_0) \quad (6)$$

onde $D(t, t_0)$ é a função de creep do material para qualquer instante t , para a tensão aplicada em t_0 .

Também é possível descrever a função de creep para tensões não constantes. Neste caso, a análise é feita levando em conta o histórico de tensões aplicado ao material (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Input de histórico de tensões na função creep



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

Assim, para uma variação de tensão $d\sigma(\tau)$ aplicada em determinado instante τ , a variação de deformação de correspondente ao instante t é igual a:

$$d\varepsilon(t) = d\sigma(\tau)D(\tau, t) \quad (7)$$

Para um material viscoelástico linear, em que o princípio da superposição seja válido, a deformação ε total é a soma individual de cada deformação para cada variação de tensão aplicada ao material. Desta forma temos:

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t D(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad (8)$$

Se $\sigma(t)$ é diferenciável, então a Equação 8 pode ser escrita como:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)D(t_0, t) + \int_{t_0}^t D(\tau, t) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (9)$$

Para materiais em condições de não envelhecimento temos:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)D(t - t_0) + \int_{t_0}^t D(t - \tau)\dot{\sigma}(\tau)d\tau \quad (10)$$

Integrando por partes, podemos obter através da Equação 10 a seguinte expressão:

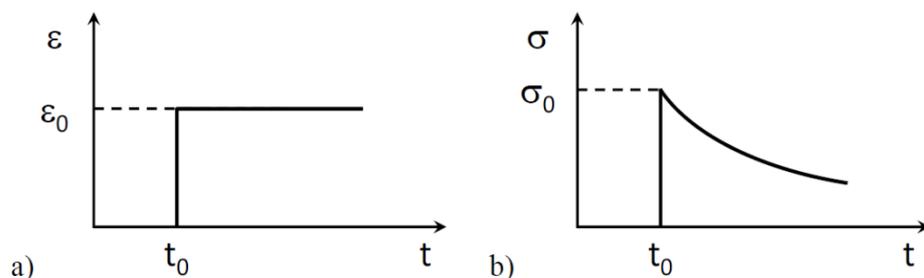
$$\varepsilon(t) = \sigma(t)D(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial D}{\partial \tau}(t - \tau)d\tau \quad (11)$$

O primeiro termo da Equação 11 representa a resposta instantânea enquanto que o segundo termo é a memória do histórico de tensões aplicadas ao material, expresso em um comportamento dependente do tempo.

2.2.2 Módulo de Relaxação

O módulo de relaxação é definido como a resposta de tensão (σ) ao longo do tempo, a partir da aplicação de uma deformação (ε) constante. Para os materiais viscoelásticos, esta aplicação de uma deformação constante não produzirá uma tensão constante, mas sim uma tensão que irá diminuir ao longo do tempo (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Módulo de relaxação. (a) Input de deformação; (b) resposta de tensão



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

Para o teste de relaxação, uma deformação constante (ε_0) é aplicada no instante t_0 , então a tensão $\sigma(t)$ em qualquer instante de tempo é dada por:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t_0, t) \quad (12)$$

onde $E(t_0, t)$ é a função de relaxação do material em qualquer instante t , para a deformação aplicada no instante t_0 .

De forma geral, como deduzido para a função de creep, para um caso genérico de deformações aplicadas a tensão $\sigma(t)$ em qualquer instante de tempo é dada por:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)E(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial E}{\partial \tau}(t - \tau) d\tau \quad (13)$$

Christensen (1982) ressalta que o creep $D(t)$ e o módulo de relaxação $E(t)$ são grandezas dependentes, visto que mensuram a mesma propriedade do material. Entretanto ambas as propriedades $D(t)$ e $E(t)$ não apresentam relação de reciprocidade perfeita, ou seja, não são simplesmente uma o inverso da outra.

2.2.3 Módulo Complexo

Para Kim et. al (2004), o módulo complexo é a mais importante propriedade a ser caracterizada nas misturas asfálticas. O módulo complexo representa as características de rigidez do material dentro da dependência da variação de frequência e temperatura ao qual este está exposto.

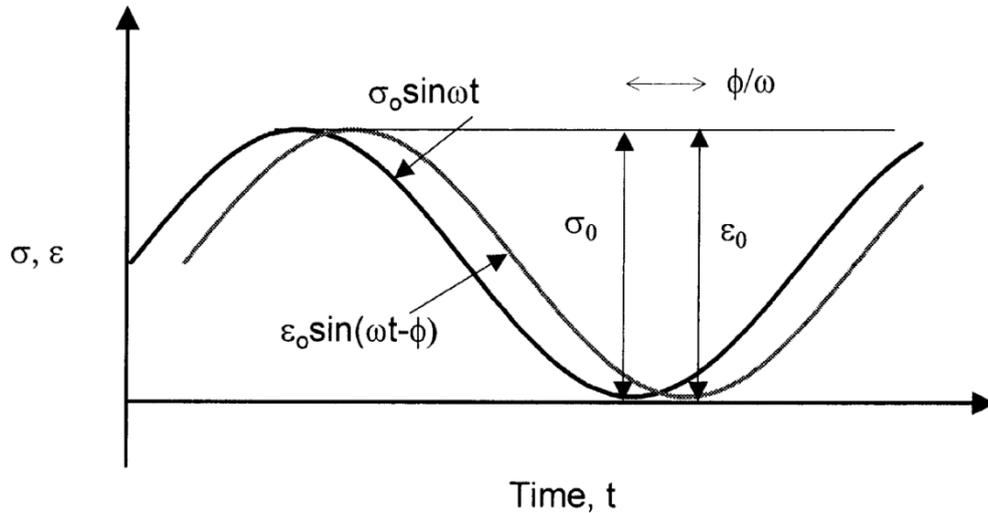
Como disserta Christensen (1982), o ensaio de módulo complexo pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material. Além disso, a importância de se considerar a influência da temperatura e de diferentes frequências de carregamento faz com que o módulo complexo venha a ser o principal ensaio para a melhor compreensão acerca da rigidez das misturas asfálticas. Costuma-se entender o módulo complexo como um ensaio que apresenta resultados mais próximos das reais propriedades do material.

Para materiais viscoelásticos lineares como as misturas asfálticas, a relação tensão/deformação sobre aplicação de um carregamento senoidal contínuo pode ser definida como módulo complexo (E^*).

O ensaio é realizado em diferentes condições de frequência e de temperatura, buscando compreender o comportamento viscoelástico do material. Além dos valores de módulo, podemos inferir também sobre outra propriedade, conhecida por ângulo de fase (ϕ), conforme Figura 2.7. Este parâmetro está diretamente ligado as parcelas viscoelásticas solicitadas, e pode ser verificado através da defasagem entre o pico de tensão e o pico de deformação. Para um material puramente elástico $\phi = 0^0$, e a amostra não desenvolve atraso entre as ondas de tensão

e deformação. Já para materiais puramente viscosos $\phi = 90^\circ$. Materiais viscoelásticos apresentam então, um intervalo de ângulo de fase entre $0^\circ < \phi < 90^\circ$.

Figura 2.7 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo



Fonte: Witczac et al. (2002)

O módulo complexo é definido matematicamente por:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \quad (14)$$

onde seu valor absoluto ou módulo dinâmico é dado pela expressão:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (15)$$

O ângulo de fase pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (16)$$

onde: t_i é a fração de tempo entre os picos de tensão e deformação e t_p o tempo de um ciclo de carga.

Como E^* é um número complexo, sua parte real e sua parte imaginária podem ser isoladas, respectivamente como E_1 e E_2 , como segue abaixo:

$$E^* = E_1 + E_2 = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi \quad (17)$$

Os dados obtidos através do ensaio de módulo complexo podem ser apresentados em diferentes tipos de gráficos, sendo os principais deles: o plano Cole-Cole, o diagrama de Black, e as curvas mestras.

O plano Cole-Cole, é alcançado através da plotagem das variáveis E_1 e E_2 e seu uso é indicado para analisar o comportamento do material asfáltico para baixas temperaturas e/ou altas frequências.

No diagrama Black temos a plotagem da relação do valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$ plotado em escala logarítmica pelo ângulo de fase (ϕ) plotado em escala aritmética. O diagrama de Black é indicado para o estudo do comportamento do material para altas temperaturas e/ou baixas frequências.

As curvas mestras permitem que comparações sejam feitas para uma mesma faixa de frequências ou temperaturas, facilitando a leitura dos dados devido seu formato contínuo e suave. Para cada temperatura de ensaio obtemos uma isoterma no qual estão associadas todas as frequências ensaiadas nesta temperatura. De maneira análoga, para uma frequência obtemos uma isócrona, na qual associamos todas as temperaturas ensaiadas para esta dada frequência. As curvas mestras então podem ser construídas através do princípio de superposição tempo-temperatura, partindo da constatação da unicidade das curvas do plano Cole-Cole e do diagrama de Black. Conforme Di Benedetto e Corté (2005), materiais que apresentam este comportamento são conhecidos como materiais ‘termo reológicos simples’, e a utilização dos princípios de superposição tempo-temperatura passa a ser interessante, visto que, para um ensaio realizado num intervalo limitado de temperatura ou frequência, seus resultados possam ser expandidos para domínios inacessíveis em laboratório.

O ensaio de módulo complexo em amostra cilíndrica a compressão axial, é de acordo com Di Benedetto e Corté (2005), um ensaio homogêneo, que não requer nenhuma solução estrutural, não demandando assim nenhuma hipótese complementar, de modo que apresenta resultados mais similares a real propriedade dos materiais testados.

2.2.4 Interconversão entre as funções unitárias

Módulo de relaxação ($E(t)$), creep ($D(t)$), e módulo complexo (E^*) são todos conhecidos como funções unitárias de resposta, pois apresentam dados equivalentes de saída para um mesmo tipo de unidade de entrada. Disserta Hou (2010) que; $E(t)$ é equivalente a resposta de tensão para dada entrada de deformação, enquanto $D(t)$ é a resposta de deformação para determinada aplicação de tensão. Essas duas funções de resposta por muitas vezes não são

fáceis de se obteram experimentalmente, contudo elas podem ser convertidas a partir dos dados de módulo complexo por meio da teoria viscoelástica linear, através de séries de prony e do método da colocação introduzido por Schapery (1962).

Para a abordagem matemática deste assunto, sugere-se ao leitor os trabalhos de Ferry (1980) e Christensen (1982).

2.3 MODELOS ANALÓGICOS DE RESPOSTA DO COMPORTAMENTO LINEAR VISCOELÁSTICO

Um modelo analógico de comportamento viscoelástico linear (LVE) é definido como uma combinação de molas e amortecedores, que representam respectivamente o comportamento elástico e o comportamento viscoso newtoniano, simulando mecanicamente as respostas do comportamento LVE. Estes modelos teóricos de simulação têm como propósito, através de constantes atribuídas a seus elementos mecânicos, fornecer uma aproximação matemática do real comportamento do material.

Conforme Pagliosa (2004), tais modelos são exclusivamente fenomenológicos, eles não contêm informações sobre ocorrência de fenômenos físicos ou moleculares, mesmo assim são úteis para inferir a resposta de um material submetido à creep e relaxação, bem como situações de carregamento complexas, fornecendo uma visão da natureza geral da resposta viscoelástica.

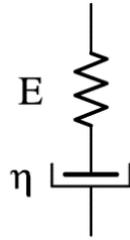
Muitos modelos analógicos foram propostos para descrever o comportamento LVE, entre eles, modelos de espectro discreto e modelos de espectro contínuo. Apresenta-se a seguir uma breve explanação sobre os principais modelos usados para misturas asfálticas

2.3.1 Modelos com espectro discreto de relaxação

Os modelos analógicos de espectro discreto são definidos como uma combinação de molas, que representam o comportamento elástico do material; e de amortecedores, que representam a parcela viscosa. São diversas as combinações de elementos que se desenvolveram para representar o comportamento LVE. Abaixo segue uma sucinta revisão sobre os mais utilizados.

O modelo de Maxwell é um modelo constituído de dois elementos, uma mola com rigidez E , e um amortecedor com viscosidade n , ambos lineares, conectados em série (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Modelo de Maxwell



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

As funções de creep e relaxação para o modelo de Maxwell são dadas pela Equação 18 e 19 apresentadas abaixo:

$$D(t) = \frac{1}{E_k} + \frac{t}{\eta} \quad (18)$$

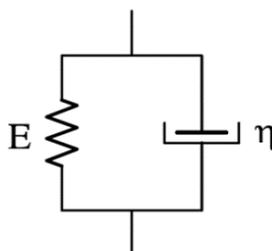
$$E(t) = E_k e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (19)$$

onde τ é o tempo de relaxação, expresso por:

$$\tau = \frac{E_k}{n} \quad (20)$$

O modelo de Kelvin-Voigt se estrutura através dos mesmos elementos encontrados no modelo de Maxwell, entretanto agora estes estão associados em paralelo (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Modelo de Kelvin-Voigt



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

As funções de creep e relaxação para o modelo de Kelvin-Voigt são dadas pela Equação 21 e 22 apresentadas abaixo:

$$D(t) = \frac{1}{E_k} \left(1 - E_k e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (21)$$

$$E(t) = E_k + \eta \delta \quad (22)$$

onde τ é o tempo de relaxação, expresso por:

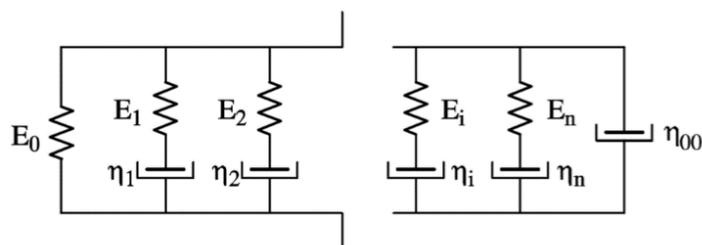
$$\tau = \frac{\eta}{E_k} \quad (23)$$

e δ define-se com a função delta de dirac.

O modelo de Maxwell apresenta uma aproximação regular de resposta para o módulo de relaxação, mas não é representativo para modelar a função creep. Já ao contrário, o modelo de Kelvin-Voigt modela de forma mais aceitável o creep, mas não apresenta boa representação para o módulo de relaxação. Desta forma, nenhum dos dois modelos consegue representar com boa acurácia o comportamento dos materiais viscoelásticos, de maneira que, buscando uma melhor representação da resposta LVE, surgiram os modelos generalizados.

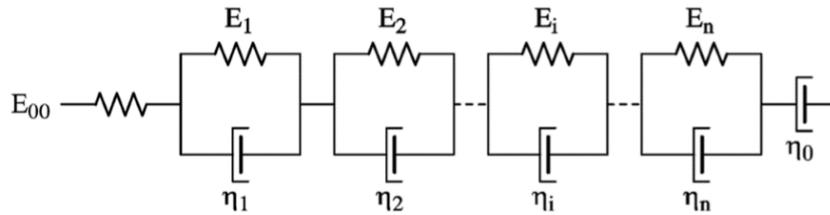
Os modelos generalizados consistem dos mesmos elementos (molas e amortecedores) que os modelos anteriores, mas com um arranjo mais complexo. O modelo de Maxwell generalizado, consiste da associação em paralelo de pares mola-amortecedor ligados em série (Figura 2.10). O modelo de Kelvin-Voigt generalizado, consiste de associações em série de pares mola-amortecedor ligados em paralelo (Figura 2.11).

Figura 2.10 - Modelo de Maxwell generalizado



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

Figura 2.11 - Modelo de Kelvin-Voigt generalizado



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

Como dissertam Ferry (1980), Christensen (1982), e Soares e Souza (2003), as funções analíticas (relacionando tensão e deformação) obtidas para esses modelos baseados em análogos mecânicos lineares ficaram conhecidas como Séries de Prony. As séries de Prony são a maneira mais comum de se representar o comportamento viscoelástico linear de meios sólidos.

Segundo Woldekidan (2011), o módulo de relaxação ($E(t)$) pode ser facilmente obtida como um somatório da função de relaxamento de cada um dos elementos de Maxwell individuais, visto que as deformações nos elementos paralelos são iguais (Equação 24). O número de termos necessários para modelar com precisão uma determinada resposta de material é determinado com base na precisão de resposta que se almeja.

$$E(t) = E_{k0} + \eta_{\infty} \delta + \sum_{i=1}^n E_{ki} e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (24)$$

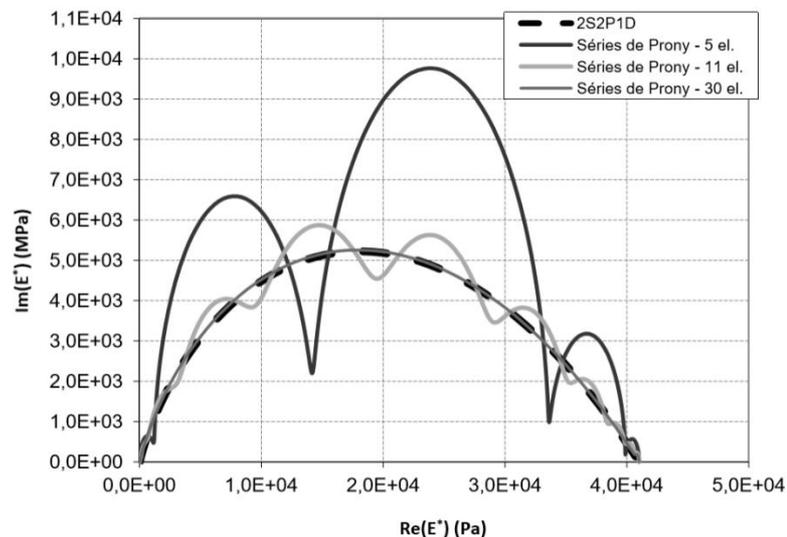
Os parâmetros $E_{k0}, E_{ki}, \eta_{\infty}, e \rho_i$, definem uma série de Prony de n elementos que representa as propriedades LVE do material.

Para situações de controle de tensão, utilizar o modelo de Maxwell generalizado não é conveniente. Neste caso, a maneira adequada de modelar o comportamento de creep ($D(t)$) é usando o modelo de Kelvin-Voigt generalizado. Este modelo é obtido colocando uma série de modelos Voigt-Kelvin em série. Neste modelo, a tensão total no sistema é obtida ao somar as contribuições individuais. Uma vez que a resposta de fluência individual de cada elemento de Voigt-Kelvin é conhecida, a expressão do modelo pode ser facilmente obtida pela Equação 25, usando o somatório dos elementos.

$$D(t) = \frac{1}{E_{k\infty}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{ki}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (25)$$

Para um número suficiente de elementos utilizados, é possível obter uma boa aproximação do comportamento LVE para a maioria dos materiais viscoelásticos. Babadopulos (2013) exemplifica a questão na Figura 2.12, onde, no plano Cole-Cole, faz a análise através das séries de Prony com diferentes números de elementos junto ao modelo de espectro contínuo 2S2P1D demonstrado no tópico subsequente.

Figura 2.12 - Previsões de modelos de espectro discreto com diferente número de elementos e o modelo 2S2P1D



Fonte: Babadopulos (2013)

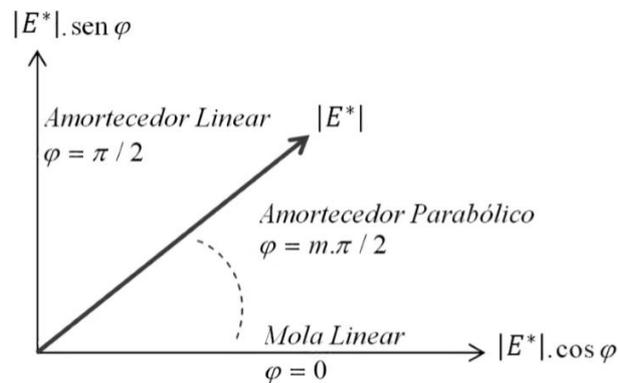
Verifica-se que com o aumento do número de elementos da série de Prony, o resultado da modelagem torna-se extremamente precisa.

2.3.2 Modelos com espectro contínuo de relaxação

Enquanto a modelagem por séries de Prony representa um espectro discreto do comportamento viscoelástico, outros modelos podem representar um espectro contínuo do mesmo. Nestes análogos mecânicos, adiciona-se elementos que representem uma resposta viscosa parabólica, estando sujeito a dependência do tempo. Estes elementos são conhecidos como amortecedores parabólicos (Figura 2.13), e em conjunto com os análogos de molas e

amortecedores podem fornecer uma melhor descrição do espectro viscoelástico dos materiais asfálticos.

Figura 2.13 - Representação da resposta de um amortecedor parabólico



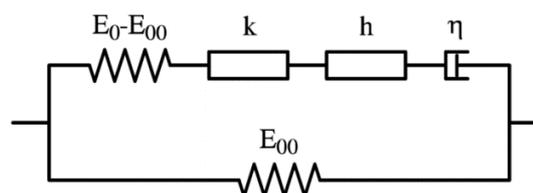
Fonte: Adaptado de Woldekidan (2011)

Os amortecedores parabólicos apresentam deformações totalmente recuperáveis uma vez que o carregamento é removido. Percebe-se que, a tipologia de seu comportamento está inteiramente ligada ao valor da constante m ; o amortecedor parabólico pode representar um amortecedor linear se $m = 1$, uma mola linear se $m = 0$, ou um elemento viscoelástico linear, onde o seu ângulo de fase depende apenas do valor de m ($0 < m < 1$).

Dentre os modelos de espectro contínuo podemos citar: o modelo de Huet (Huet, 1963); Huet-Sayegh (Sayegh, 1965); e o modelo 2S2P1D (*two springs, two parabolic dashpots and one dashpot*) (Olard e Di Benedetto, 2003). Basicamente, existe uma linha de evolução do modelo de Huet que culmina no modelo 2S2P1D, através da adição de novas constantes a determinar. Demonstrar todos estes modelos não é o objetivo deste trabalho, devendo o leitor reportar aos estudos acima citados. Abordaremos aqui sucintamente o modelo 2S2P1D que fornecera dados importantes no decorrer deste estudo.

No modelo 2S2P1D temos a adição de um amortecedor linear em série com dois amortecedores parabólicos e uma mola, de acordo com a Figura 2.14 abaixo.

Figura 2.14 - Modelo 2S2P1D



Fonte: Mangiafico 2014

Mangiafico (2014), relata que através dessa adaptação o modelo pode ajustar-se muito bem ao comportamento mecânico da maioria das misturas betuminosas, passando a representar bem os intervalos de altas temperaturas e baixas frequências, deficiências encontradas no modelo analógico de Huet-Sayegh.

Através da modelagem 2S2P1D, o valor do módulo complexo é calculado pela Equação 26 apresentada abaixo.

$$E^*(i\omega\tau) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-K} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (26)$$

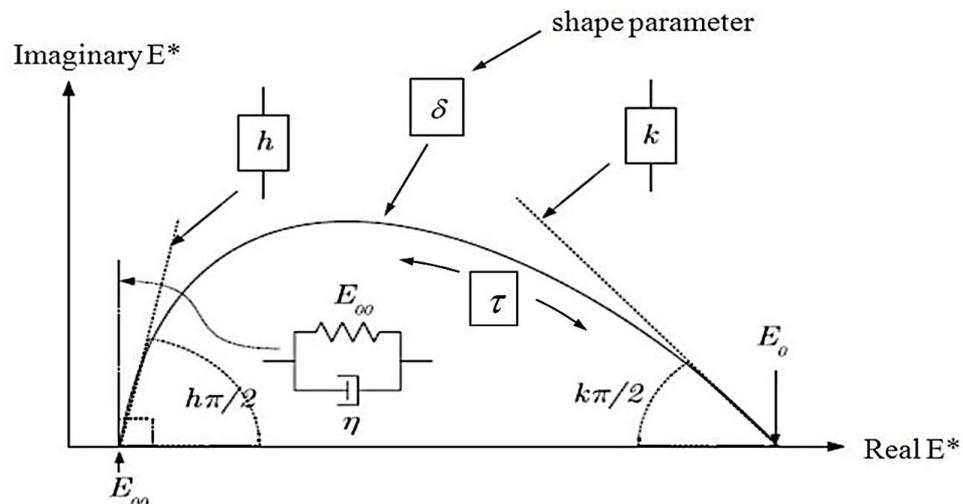
Onde β é relacionada a viscosidade do amortecedor linear, e é definido pela Equação 27:

$$\eta = (E_0 - E_\infty)\beta\tau \quad (27)$$

A resolução da Equação 26 passa também pelo ajuste de mais seis diferentes parâmetros, sendo eles: δ , K , h , E_0 , E_∞ , τ .

Conforme Olard & Di Benedetto (2003), as sete constantes presentes na Equação 26 definem completamente o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. Na Figura 2.15 podemos ver a influência destes parâmetros no modelo 2S2P1D através da representação do plano Cole-Cole.

Figura 2.15 - Influência dos parâmetros associados aos elementos físicos do modelo 2S2P1D



O modelo 2S2P1D, conforme Olard et. al. (2003), permite melhorar a aproximação das simulações modeladas, com as curvas reais, encontradas através dos dados obtidos durante a realização dos ensaios em laboratório.

2.4 O FENÔMENO DE FADIGA

Do ponto de vista mecânico, o fenômeno de fadiga ocorre pela geração sistemática de rupturas das ligações e nucleações sucessivas de microfissuras. Muitas vezes, essas rupturas são caracterizadas por simples perda de coesão entre as diferentes fases do material. Como tais descontinuidades microscópicas ocorrem nas regiões mais tensionadas do material, quer no fraturamento frágil, quer no fraturamento dúctil, os vazios que as caracterizam acabam por se reunir, dando origem a uma ou mais fissuras. O crescimento individual dessas fissuras, ou a ocorrência de um novo processo de coalescência delas, gera a macro fissura, que é aquela que se pode detectar visualmente. No princípio, o processo de danificação é estável e caracterizado pela propagação estável das microfissuras. Contudo, esse processo é evolutivo e leva a estrutura ao colapso pelas razões anteriormente expostas (ISAIA, 2007).

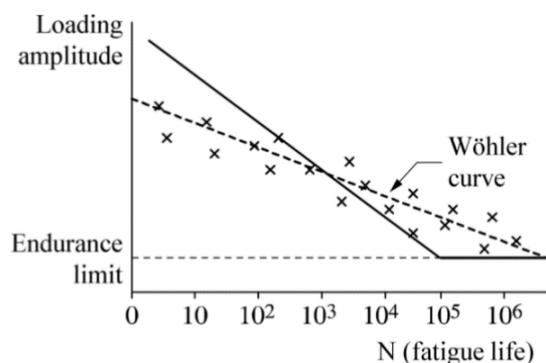
O termo "fadiga" foi mencionado pela primeira vez pelo inglês Braithwaite (1854), embora as pesquisas relacionadas ao tema tenham início com Albert (1837) com os primeiros resultados de testes de fadiga em correntes metálicas.

Mais tarde, Wöhler (1870) centrou-se na relação entre a magnitude das repetições de tensões aplicadas e o número de ciclos para a falha nos metais. O achado principal consistiu na observação de que, quando um material é submetido a carga cíclica, o número de ciclos para falhar diminui quando a amplitude de tensões aumenta. A mesma observação é válida para vários outros materiais, dentre os quais os materiais betuminosos.

Wöhler (1870) apresenta a seguinte conclusão: "O material pode ser induzido a falha por muitas repetições de tensões aplicadas, que são menores do que a tensão admissível última. As amplitudes de tensões induzidas são decisivas para a destruição da coesão do material. O nível de tensões é influente na medida em que quanto maior, menor é o número de ciclos que leva à falha".

A curva de Wöhler, conforme Figura 2.16, que representa a vida de fadiga de um material em função das solicitações aplicadas é representada pela Equação 28:

Figura 2.16 - Exemplo de curva de Wöhler



Fonte: Adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

$$N_f = a \times S^b \quad (28)$$

Onde N_f é a vida de fadiga, S a sollicitação e a e b são as constantes de regressão do modelo. O modelo de vida de fadiga é obtido, de forma estatística, por meio de uma regressão linear entre os valores de amplitude de deformação aplicados e o número de ciclos correspondentes a falha. Mangiafico (2014) cita que abordagem da curva Wöhler permanece válida se os testes de fadiga forem realizados no modo de controle de deformação.

Entretanto, em uma estrutura de pavimento, o uso de modelos de fadiga para avaliar o comportamento do material requer o uso de teorias de danos cumulativos que permitam levar em consideração a aplicação de tensões de diferentes níveis. A lei da acumulação de danos mais utilizada é baseada na hipótese de Palmgren-Miner.

A teoria do dano cumulativo linear é também denominada hipótese de Palmgren-Miner (Palmgren, 1924), (Miner, 1945). Esse modelo de dano linear constitui uma maneira empírica de previsão de fadiga após uma sequência complexa de carregamentos, e que entende que o material vai acumulando danos sequenciais até atingir um limite de dano possível.

A hipótese de Palmgren-Miner admite que a fração de dano a um nível de tensão σ_1 em qualquer ciclo de carregamento contribui de forma idêntica para causar o montante de dano final, e que dado um nível de tensão qualquer σ_i , este é linearmente proporcional a relação entre os ciclos aplicados e o número de ciclos admitidos.

A equação generalizada para todos os níveis de tensão possíveis para o material conduz a hipótese de Palmgren-Miner:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = 100\% \quad (29)$$

Onde: n é o número de ciclos reais e N o número de ciclos disponíveis para dado nível de tensão.

Dessa forma a Equação 29 pode ser expressa também pela equação 30:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (30)$$

A hipótese de Palmgren-Miner admite que a acumulação de danos não depende da história de carregamento suportada pelo material, sendo assim o dano por ciclo não se altera, estando o ensaio no início do consumo por fadiga ou no final.

Visto que os materiais não se danificam de forma idêntica, que os danos não são lineares nem proporcionais para níveis de tensões diferentes, Mangiafico (2014) cita que o modelo não é exato, sendo assim, deve ser usado para aproximações e análises superficiais, visto sua simplicidade.

O estudo do fenômeno da fadiga em misturas asfálticas teve início com Hveem (1955). A publicação de sua pesquisa forneceu uma forte ligação entre as deflexões do pavimento, o carregamento aplicado, e as falhas por fadiga. O trabalho de Hveem teve um impacto muito significativo no desenvolvimento de procedimentos para prever a fissuração por fadiga em misturas asfálticas.

2.4.1 Fadiga em misturas asfálticas

Rivière (1996), Kim et al. (1997), Di Benedetto et. al. (2004), Specht (2004), Tapsoba (2012), Sabouri e Kim (2014), entre diversos outros, citam que a fadiga é um dos principais modos de falha das estruturas de pavimento asfáltico. De acordo com Nascimento (2015), o trincamento por fadiga é a principal manifestação patológica nos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil.

O fenômeno de fadiga é de natureza complexa, e está relacionado a uma diversa gama de fatores, entre eles: as características estruturais do pavimento, as variáveis climáticas, a magnitude e modo de imposição de cargas, e as próprias propriedades intrínsecas ao concreto asfáltico.

Conforme é definido por Yoder e Witczak (1975), o fenômeno de fadiga em misturas asfálticas se caracteriza por trincas induzidas por carregamento repetido do tráfego devido à repetição dos estados de tensão ou deformação inferiores aos respectivos estados últimos de tensão ou deformação dos materiais.

Na mesma linha de raciocínio Preussler et al. (1981) descreve o fenômeno de fadiga como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincamento do revestimento, ou até mesmo a sua ruptura, após um número suficiente de repetições de carga, ou seja, é a perda de rigidez e integridade do material quando solicitado repetidamente.

Segundo Tayebali et al. (1994), a resistência à fadiga das misturas asfálticas é a habilidade de suportar carregamentos repetidos a flexão sem que trincas se desenvolvam.

A norma norte americana ASTM E1823-13 (2013) - *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*, define fadiga como o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões e deformações variáveis, produzindo fissuras que podem levar a ruptura após um determinado número de ciclos.

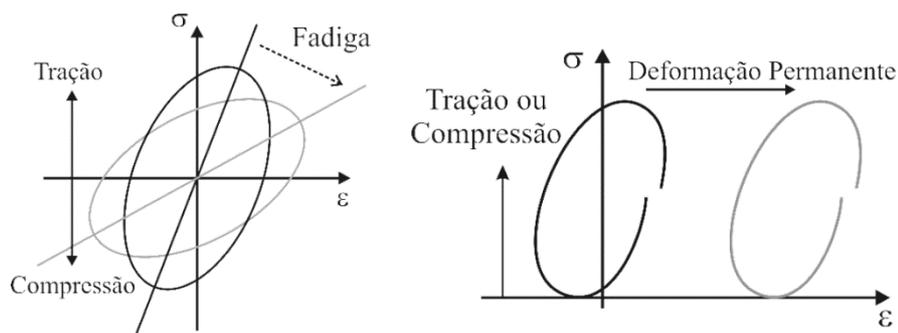
Cita Balbo (2007) que a fadiga, relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura, pouco a pouco desenvolvam alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de micro fissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material.

Ainda conforme Balbo (2007), os níveis de deformação aplicados ao material, isoladamente, não são suficientes para leva-lo instantaneamente a falha por fadiga. Porém a aplicação cíclica geradora de deformações, vai causando passo a passo um acúmulo irreversível de zonas de plastificação, que ao longo da vida de serviço do pavimento, acabam definindo planos de fratura e discontinuidades, levando a perda de rigidez e integridade do material e conseqüentemente a falha pelo processo de fadiga.

Di Benedetto *et al.* (2004) comentam que as misturas asfálticas estão submetidas em um curto espaço de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos. Com o carregamento surgem micro trincas na superfície inferior do revestimento asfáltico, resultando na perda de rigidez do material. Esta perda de rigidez leva, por conseguinte a maiores deformações, e o acúmulo destas resulta no fenômeno de fadiga. O comportamento a fadiga é extremamente sensível as condições de carregamento e de contorno. Sua sensibilidade ao material e características de teste induz uma dispersão dos resultados, o que torna mais complexa a interpretação geral dos

testes. Conforme descrito, o dano à fadiga afeta a rigidez do material, o que implica uma diminuição do módulo. No entanto, a fadiga não deve ser confundida com a deformação permanente como mostra a Figura 2.17.

Figura 2.17 - Diferença entre os processos de fadiga e deformação permanente



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2004)

Conforme dissertam Hintz (2012), o trincamento é a forma mais comum de ocorrência do dano por fadiga, sendo as principais ocorrências do tipo topo-base e base-topo. O trincamento topo-base se inicia na superfície dos pavimentos e se propaga para a camada subjacente, geralmente provocado pelas altas deformações cisalhantes. Já o trincamento base-topo se inicia na parte inferior da camada asfáltica e se propaga até a superfície, devido às elevadas deformações de tração associadas à flexão do pavimento.

Molenaar (2007) apresenta um estudo sobre o desenvolvimento de trincas em pavimentos flexíveis. A pesquisa baseou-se em dados obtidos em pista experimental onde estudos com um simulador de tráfego foram feitos. O autor observou que parte das trincas visíveis na superfície do pavimento estava presente apenas na parte superior do revestimento, enquanto outras iniciavam na base do mesmo. Mais ainda, amostras obtidas na pista mostravam que a base do revestimento estava desintegrada ao redor dos pontos abaixo da trilha de roda. Essas observações levaram o autor a refletir sobre as reais suposições que são feitas com relação à propagação das trincas nos pavimentos flexíveis. Ele observou que para uma rigidez retro calculada igual a 50 % da inicial, 20 % da área da superfície apresentava trincas. É importante ressaltar, todavia, que grande parte dessas trincas era superficial, necessitando assim, reformular a hipótese de que as trincas iniciadas na base são predominantes nos revestimentos asfálticos. Nesse estudo o autor relata que em casos onde o revestimento apresenta-se relativamente com alta rigidez à flexão, trincas iniciadas no topo são predominantes sobre aquelas iniciadas na base.

Entretanto, para revestimentos usuais, de pequenas espessuras, as trincas surgem primeiramente na superfície inferior da camada asfáltica, onde as forças de tração são maiores, e, posteriormente, propagam-se para a superfície do pavimento na forma de trincas interligadas danificando o pavimento. Esse fenômeno deve ser controlado já nas primeiras idades, visto que conforme diversos autores, entre eles Pinto (1991), Momm (1998) e Fontes (2009), o trincamento tem um início com baixa taxa de propagação, passa por uma fase estável, até que entra em um período de alta propagação das fissuras, levando o material ao colapso.

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

Conforme Underwood (2011), a caracterização do dano por fadiga e o processo de trincamento são abordados por duas teorias: a mecânica da fratura e mecânica do dano contínuo. A mecânica da fratura relaciona o fenômeno de formação de micro trincas para representar o comportamento do material. Já a mecânica do dano contínuo representa os fenômenos da microescala globalmente, utilizando propriedades fundamentais das misturas asfálticas para caracterizar o comportamento, sendo esta última a utilizada nesta pesquisa.

2.4.2 Fatores de influência da mistura no desempenho a fadiga

Diversos são os fatores de influência do desempenho das misturas asfálticas frente ao fenômeno de fadiga, pode-se citar as variáveis climáticas; os modos de carregamento em laboratório, ou o tráfego em campo; e também as características intrínsecas a mistura. Cabe neste tópico, analisar sucintamente a possível influência que os constituintes levam a resistência à fadiga, visto que os outros assuntos já são relatados ao longo do trabalho.

2.4.2.1 Ligantes asfálticos

Para muitos autores, o conteúdo de ligante asfáltico é o fator que mais influencia os resultados de fadiga (BRENNAN et al. (1990); EPPS e MONISMITH (1969), PELL (1962)). Conforme Epps e Monismith (1969), para um determinado ligante, existe um teor ótimo em que a vida útil da mistura asfáltica apresenta máximo desempenho. Acima deste valor, a resistência à fadiga diminui com o aumento do conteúdo do aglutinante. Este conteúdo ideal,

conforme os autores, é de cerca de 7% de aglutinante para revestimentos betuminosos californianos e parece depender da natureza dos agregados utilizados. O aumento do conteúdo do aglutinante também geralmente resulta em uma diminuição na dispersão dos resultados de ensaios de fadiga.

Specht (2004), em pesquisa de análise sobre incorporação de borracha reciclada de pneus em laboratório e em campo, verificou tanto a superioridade dos ligantes modificados como das misturas asfálticas preparadas com tais ligantes. O autor conclui que a incorporação de 12% a 18% de borracha ao ligante, seja por via seca ou via umida, leva a misturas com maior resistência a fadiga, a deformações permanentes e maior durabilidade.

Nascimento et al. (2014) concluiu que o uso de modificadores melhorou substancialmente o comportamento das misturas em relação ao dano, com ganhos importantes de desempenho mesmo quando são comparados produtos mediantemente e altamente modificados - CAPFLEX 60/85 e CAPFLEX 65/90 H, respectivamente.

Fica assim evidente na literatura, o consenso de que os ligantes são os principais responsáveis pelas características de resistência à fadiga nas misturas, embora qualquer explicação geral do comportamento de fadiga deva incluir todas as outras variáveis as quais o concreto asfáltico está submetido.

2.4.2.2 *Agregados minerais*

Os materiais pétreos e a composição originária desses apresentam importância indiscutível no bom desempenho dos revestimentos asfálticos. Para Bernucci et. al. (2008) a granulometria influi em quase todas as propriedades importantes de uma mistura, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência a fadiga e a deformação permanente, entre outras.

Para Kim e Kloska (1992) os agregados mais rugosos propiciam misturas asfálticas com maior resistência à fadiga, devido à maior adesividade entre ligante asfáltico e agregado. Com a mesma lógica, os autores afirmam que materiais angulares apresentam melhor desempenho que os arredondados, nos quais a perda de coesão geralmente ocorre na ligação entre os constituintes. Para outros autores, a forma do agregado parece não influenciar a resistência a fadiga nas misturas asfálticas (BRENNAN et al. (1990); EPPS e MONISMITH (1969)).

Soares et. al. (2000) estudou a influência do uso de diferentes faixas granulométricas: A, B e C do DNER/ES 313/97 no comportamento das misturas asfálticas, e concluiu que misturas mais finas, como a faixa C, apresentam melhor resistência a fadiga. Preussler e Pinto

(2010) comentam que misturas formadas com agregados mais finos apresentam uma taxa de propagação de fissuras inferior as constituídas de agregados mais graúdos.

2.4.2.3 *Volume de vazios*

O volume de vazios de uma mistura exerce grande influência no processo de degradação por fadiga. Esse fato pode ser explicado pelos efeitos provocados na rigidez das misturas e nas tensões internas as quais o material é submetido. De acordo com Monismith e Deacon (1969), a redução do índice de vazios é responsável pelo menor nível de tensões desenvolvidas na superfície de contato ligante-agregado. Ainda segundo os mesmos autores, o acréscimo de rigidez é proporcional ao acréscimo de densidade e por consequência inversamente proporcional ao volume de vazios do material.

Harvey et al. (1995), em pesquisa sobre o teor de ligante e o volume de vazios, concluiu que a variação de 1% no volume de vazios é mais significativa que a variação de 1% no teor de ligante, em relação a vida de fadiga das misturas asfálticas. Já Park e Kim (2014) avaliando as causas de trincamento no estado da Carolina do Norte - EUA, concluíram que o trincamento por fadiga é diretamente afetado pelo teor de ligante, e o volume de vazios não é um parâmetro tão evidente de influência na vida de fadiga. O autor no mesmo estudo cita que as deficiências estruturais são as maiores causas do problema por fadiga no local de estudo.

2.5 ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

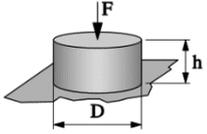
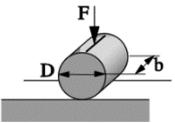
Os ensaios laboratoriais são o principal recurso para o estudo do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas. A modelagem feita através dos dados obtidos em laboratório permite compreender de melhor maneira o comportamento dos materiais quando submetidos a ciclos de tensões e deformações. Além disso, através da investigação em condições controladas de propriedades e parâmetros dos materiais, fornecem subsídios para a análise de vida de fadiga das misturas, contribuindo de maneira geral para melhores projetos de revestimentos asfálticos.

Os ensaios de fadiga apresentam todos uma característica em comum: são ensaios onde há a aplicação cíclica de carga, visto que o fenômeno está atrelado a danificação cumulativa por estados repetidos de tensões e deformações. Outra demanda, que condiciona o uso de aplicações cíclicas nas amostras, é a questão de buscar uma aproximação do carregamento aplicado em campo. De fato as solicitações impostas em campo são praticamente impossíveis de se reproduzir em laboratório, visto que, no pavimento a aplicação de cargas varia por

inúmeros fatores, entretanto, Saïd (1988) comenta que a forma do carregamento cíclico aplicado é extremamente importante para a análise dos resultados dos testes de fadiga, especialmente através da influência da velocidade de aplicação da carga nas propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas.

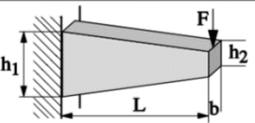
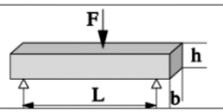
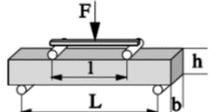
Dentre os ensaios típicos de fadiga, podem-se destacar os ensaios de flexão, o ensaio de fadiga por compressão diametral, e o ensaio uniaxial cíclicos de tração-compressão. Na Figura 2.18 temos os ensaios com tipologia de ruptura por tração, direta e indireta, e na Figura 2.19 os ensaios de ruptura por tração na flexão.

Figura 2.18 - Ensaios de tração

	Schéma de principe	Références
Traction-compression (avec ou sans confinement)		[AGU 81, ASH 98]
Traction Indirecte		[KHA 00, SAI 88]

Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

Figura 2.19 - Ensaios de flexão

	Schéma de principe	Références
Flexion 2 points		[HUE 63, MOU 90]
Flexion 3 points		[MYR 92]
Flexion 4 points		[PRO 96]

Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

De acordo com Di Benedetto (1990), Di Benedetto et al. (2001), Bodin (2002), Di Benedetto et al. (2004), entre vários outros, os testes aplicados em laboratório para caracterizar a fadiga, podem ser testes homogêneos ou testes não homogêneos. Os testes homogêneos têm a vantagem de permitir o acesso direto ao comportamento material, sem qualquer cálculo de fundo ou hipótese, o que não é o caso de testes não homogêneos. Isso se dá devido a que, em

um ensaio homogêneo, quando analisamos a seção transversal da amostra, todos os pontos do material estão experimentando a mesma sollicitação no mesmo instante de tempo. Em consequência desta análise de homogeneidade de sollicitação em uma seção de interesse, dentre todas as geometrias das amostras, é possível inferir que apenas os ensaios uniaxiais de tração direta, ou tração-compressão, em corpos de prova cilíndricos podem ser considerados homogêneos. Os ensaios à flexão em vigas, e os ensaios de tração indireta, são considerados não homogêneos.

Conforme Di Benedetto (1990), o ensaio de tração direta, ou tração-compressão, axial em um corpo de prova cilíndrico, permite caracterizar com mais precisão o comportamento do material devido a homogeneidade teórica das tensões na amostra. De acordo com Bodin (2002), isso permite uma exploração direta das propriedades dos materiais ensaiados.

Quanto ao ensaio de fadiga por compressão diametral, Tangella et al. (1990) comenta que a principal vantagem no ensaio é a simplicidade de execução. Colpo (2014) cita que o ensaio apresenta algumas desvantagens como o surgimento de deformações permanentes junto aos frisos de aplicação de carregamento, e que isso se torna indesejável para a avaliação de fadiga do material. Acrescenta-se ainda que o ensaio dispense muito tempo, sendo esta outra grande desvantagem.

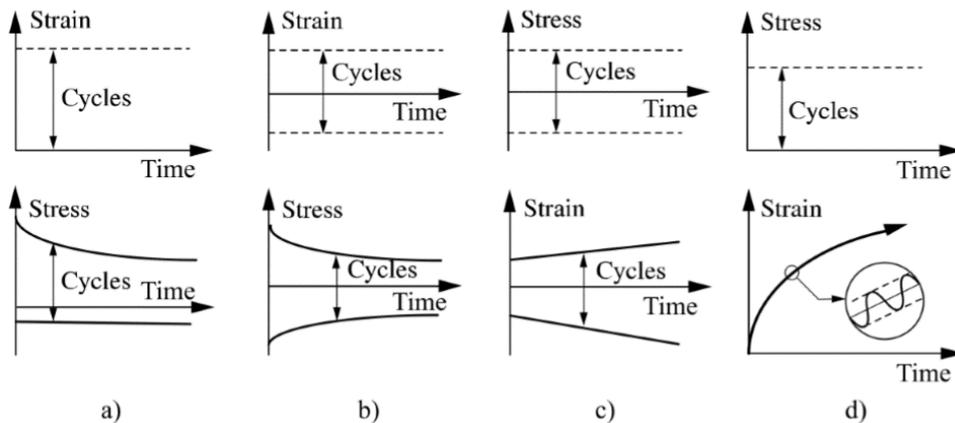
Os testes de flexão destinam-se a representar os esforços repetitivos de tração de flexão causada no pavimento pela passagem de veículos. O objetivo dos testes de tração na flexão é representar diretamente as forças de tração geradas na base do revestimento por essas flexões. Além de não serem homogêneos, e necessitarem de solução estrutural para análise, a moldagem das amostras prismáticas se mostra como uma grande desvantagem operacional quando comparado com as amostras cilíndricas.

Di Benedetto et al. (2004) cita que os resultados de fadiga parecem ser significativamente afetados pelo tipo de ensaio proposto, e que a comparação de vários tipos de fadiga pode ser enganosa se os resultados do teste foram obtidos usando diferentes configurações de teste. Já considerações mais recentes, que começam com Kim e Little (1990) e evoluem através de diversas pesquisas, culminando no modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD), alimentado por resultados obtidos através do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração direta, apresentam curvas características de dano por fadiga que independem das condições de ensaio. O modelo S-VECD será alvo de discussão na próxima seção deste trabalho.

Di Benedetto e Corté (2005) discutem diferentes formas de se realizar ensaios de fadiga (Figura 2.20), bem como diferentes abordagens de interpretação. Estes autores comentam que

os ensaios podem ser realizados por controle de força (ou tensão se o ensaio for homogêneo); ou por controle de deslocamento (ou deformação se o teste for homogêneo).

Figura 2.20 - Configurações de entrada e resposta, de tensões e deformações em ensaios de fadiga



Fonte: Di Benedetto e Corté (2005)

De acordo com Tangella et al. (1990), em laboratório, o carregamento pode ser aplicado em deformação controlada, quando a deformação ou a amplitude de deformação se mantêm constantes durante todo o ensaio (Figuras 20a e 20b) e as tensões necessárias para manter os níveis de deformação vão diminuindo; ou em tensão controlada, de modo que a tensão ou a amplitude de tensões permanecem constante ao longo do ensaio (Figura 20c e 20d), levando ao aumento das deformações ao longo dos ciclos.

Ainda de acordo com Di Benedetto e Corté (2005), testes com tensões constantes, não centradas no valor nulo (Figura 2.20d), induzem deformações permanentes na amostra e, portanto, não podem ser considerados testes satisfatórios para caracterizar o comportamento de fadiga das amostras. Este é o caso de testes de fadiga por compressão diametral.

Como visto anteriormente, na seção 2.1, temperatura e frequência de aplicação de carga afetam diretamente os domínios de comportamento das misturas asfálticas. Quando tratamos do fenômeno de fadiga, estas duas variáveis são extremamente importantes para as configurações dos ensaios. Sabe-se que o trincamento por fadiga ocorre geralmente para temperaturas baixas e intermediárias, quando a mistura apresenta maior rigidez e um comportamento de ruptura tendendo para frágil. Dessa forma, os ensaios de fadiga no laboratório são geralmente realizados para temperaturas definidas entre 0 e 20 °C. Quando tratamos da frequência, geralmente estamos limitados pelas características dos equipamentos e pelo tempo de ensaio, visto que frequências muito altas são de difícil instrumentação mecânica

e frequências baixas demandariam ensaios muito longos para a abordagem de fadiga. As frequências normalmente utilizadas estão na faixa de 10 Hz a 40 Hz.

Nos tópicos a seguir abordaremos os fenômenos físicos que ocorre nos ensaios cíclicos, os critérios de falha por fadiga, e o ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração direta, visto que esse é o ensaio utilizado para a caracterização das misturas asfálticas deste estudo. Para mais informações a respeito dos demais ensaios reportar aos trabalhos citados nesta seção.

2.5.1 Fenômenos físicos nos ensaios cíclicos

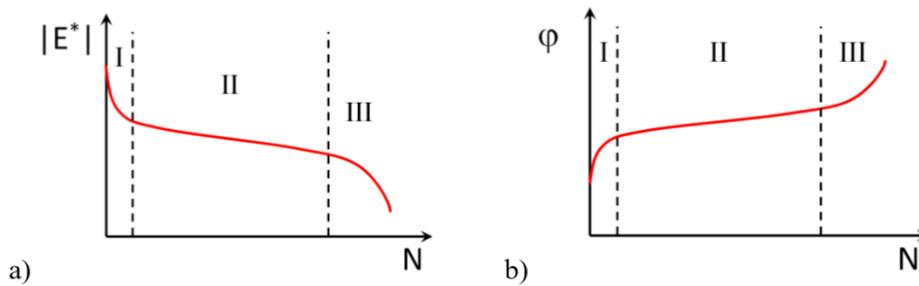
Para a investigação do comportamento mecânico das misturas asfálticas, os testes cíclicos são geralmente usados (Di Benedetto e Corté, 2005; Kim, 2009). Os ensaios cíclicos consistem na aplicação de um carregamento geralmente senoidal, e dependendo das configurações de tensões e deformações diferentes tipos de resposta podem ser encontradas. Estas respostas podem caracterizar comportamentos de rigidez, com a aplicação de um número reduzido de ciclos e de pequenas deformações; de dano por fluxo plástico, em elevadas tensões induzidas; e também de dano por fadiga, para um número elevado de ciclos e diferentes configurações de amplitude de deformação.

Durante os ensaios de fadiga, o material é induzido a um processo de progressiva deterioração, fenômeno que é consequência do efeito do carregamento repetitivo induzido a amostra. De forma geral, no decorrer da aplicação do número de ciclos, o módulo dinâmico, normal do módulo complexo diminui, enquanto que o ângulo de fase do material aumenta. Além disso, durante os testes de tensão controlada os níveis de deformação aumentam com o número de ciclos até a ruptura da amostra. De modo contrário, durante os testes de deformação controlada, a tensão aplicada diminui com o aumento do número de ciclos, chegando a valores próximos a zero até a ruptura da amostra.

A falha por fadiga, no entanto, não coincide necessariamente com a fratura macroscópica da amostra, estando associada a diferentes abordagens, muitas vezes ainda no estado de micro fissuração.

Di Benedetto et al. (1996), Baaj et al. (2003) e Di Benedetto et al. (2004), observam a evolução do módulo complexo durante os ensaios de fadiga, e identificam três fases distintas para este. Mangiafico (2014) identifica também três fases de comportamento para o ângulo de fase, além das três fases para o módulo complexo, conforme Figura 2.21.

Figura 2.21 - Evolução do módulo dinâmico e do ângulo de fase durante ensaio cíclico



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

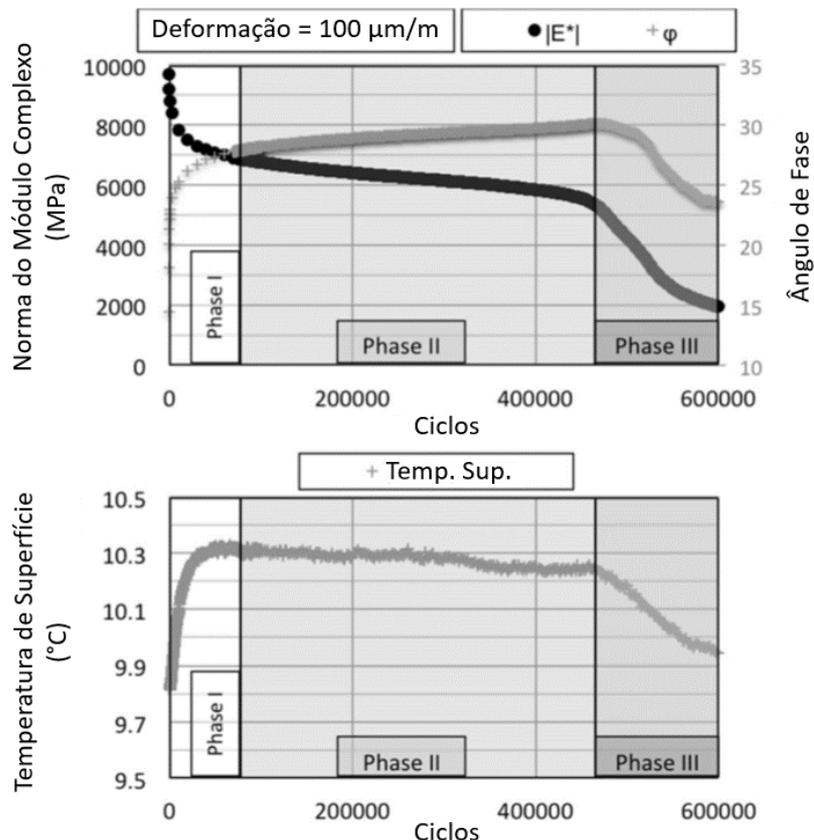
A Fase I, também conhecida como fase de adaptação, é caracterizada pela rápida diminuição da rigidez como consequência da aplicação repetida de carga. No entanto, conforme disserta Di Benedetto (1997), essa queda acentuada de rigidez não é devido apenas aos danos causados pela fadiga, mas além dessa, também aos fenômenos de aquecimento, causado pela dissipação de energia resultante da parcela viscosa do material, e a tixotropia do ligante asfáltico. Essa opinião sobre a importância de ambos os fenômenos é suportada pela observação de que a perda de rigidez durante o carregamento cíclico geralmente é rapidamente recuperada quando o ensaio é interrompido ainda nesta fase. Ainda na Fase I, os valores de ângulo de fase evoluem rapidamente, com tendência oposta a rigidez.

A Fase II é caracterizada pela predominância dos efeitos de fadiga na deterioração do material, embora os efeitos de aquecimento e tixotropia ainda estejam presentes em pequena escala e devam ser considerados. Os valores de módulo complexo apresentam nesta fase uma tendência de evolução lenta e quase linear. Conforme aponta Rivière et al. (1996), é nesta fase que se tem início a micro fissuração do material.

Já a Fase III apresenta uma evidente alteração na tendência dos valores da norma do módulo complexo e do ângulo de fase. Essa alteração indica o surgimento de macro fissuras e da propagação destas no material (Goodrich, 1991), e por essa questão Mangiafico (2014) relata que o teste não pode mais ser interpretado de acordo com os pressupostos da mecânica contínua, visto que a amostra não é mais homogênea e as propriedades viscoelásticas lineares não podem mais ser obtidas.

Tapsoba (2011) apresenta graficamente a evolução de um ensaio cíclico de deformação controlada (Figura 2.22).

Figura 2.22 - Evolução do módulo complexo, ângulo de fase e temperatura superficial durante ensaio cíclico



Fonte: Adaptado de Tapsoba (2011)

Verifica-se claramente por meio da Figura 2.22 a ocorrência das três fases distintas, para a normal do módulo complexo, o ângulo de fase e a temperatura da amostra durante o ensaio.

2.5.2 Fenômenos de influência não relatados como fadiga

Conforme Di Benedetto (2011), a queda dos valores de $|E^*|$ e em geral, a variação do módulo complexo, podem ser explicados por quatro fenômenos, que são: a não linearidade, o aquecimento, a tixotropia e a fadiga. Abaixo segue um breve comentário sobre cada um dos fenômenos não relatados como fadiga, durante os ensaios cíclicos.

I) Não linearidade: Como é comumente aceito, as misturas asfálticas exibem um comportamento linear viscoelástico (LVE) para pequenos níveis de deformação. Entretanto, devido a estrutura interna das misturas asfálticas, o ligante que se encontra entre a estrutura de agregados pode sofrer níveis de deformação maiores em determinados pontos, do que a média geral de deformação da amostra. Assim a mistura pode mostrar comportamento não linear

mesmo para níveis de deformação baixos. Airey et al. (2003), Di Benedetto et al. (2007), Cardona et al. (2015) admitem níveis de deformação de até 100 $\mu\text{m}/\text{mm}$ para o intervalo de comportamento LVE. Fazendo uso dessa amplitude de deformação Di Benedetto et. al. (2011) chegou à conclusão que o fenômeno de não linearidade é responsável por uma queda de 7% dos valores de $|E^*|$ e de 3% de acréscimo nos resultados de ϕ , para o intervalo de temperaturas de 11,3 a 21,4 °C testadas no estudo, concluindo que o limite de 100 $\mu\text{m}/\text{mm}$ é aceitável para a condução de ensaios dentro do domínio linear viscoelástico. Para os ensaios de fadiga, com deformação além do domínio LVE os efeitos da não linearidade podem se confundir com o dano acumulado por fadiga, devido a isso é importante a consideração deste efeito na análise dos resultados.

II) Aquecimento: Conforme Bodin et al. (2004), os efeitos térmicos durante os testes cíclicos em materiais betuminosos induzem dissipação de energia viscosa e conduzem ao aumento da temperatura da amostra. Considerando a dependência da rigidez das misturas asfálticas em relação a temperatura, a avaliação da fadiga pode ser afetada por esse fenômeno dissipador intrínseco do material. Bodin (2002) e Di Benedetto et al. (2011) citam que o campo de temperatura é amplamente afetado pela geometria da amostra e pelas propriedades de dissipação no limite da amostra. O efeito do fenômeno de aquecimento sobre o módulo complexo é observado quando a temperatura da amostra está mudando. Mesmo em uma câmara térmica a temperatura constante, a temperatura da amostra é afetada. Durante a carga cíclica contínua, a amostra de material asfáltica, que é viscoelástica, dissipa a energia mecânica, transformando-a em calor, ocorrendo então, um aumento de temperatura na amostra. Uma vez que, o material é termo-sensível, uma mudança no módulo complexo ocorre como consequência do auto-aquecimento. Este efeito é observado durante o carregamento, enquanto a temperatura aumenta, e também é observado durante o repouso, quando a temperatura volta a temperatura da câmara de condicionamento. A mudança no módulo complexo devido à variação de temperatura é reversível.

III) Tixotropia: Como disserta Di Benedetto (2011), o fenômeno reversível da tixotropia atua sobre o ligante. Isso pode ser explicado a nível molecular: quando as cadeias moleculares são solicitadas, sua reorganização reduz o módulo. Este efeito desaparece progressivamente quando o material está em repouso. Cita Shan (2010), que este comportamento não deve ser confundido com os comportamentos viscoelásticos lineares de creep e relaxamento, que também são conhecidos por ter um efeito significativo na resposta dos materiais asfálticos. Shan (2011) comenta a hipótese de que a tixotropia permanece ativa durante todo o processo de fadiga. Este postulado significa que a tixotropia e o dano estão ativos na segunda e terceira

fases. A diferença entre as duas fases posteriores é que na segunda fase, a tixotropia é predominante e o dano que ocorre na forma de microfissuras pode ser revertido. Na terceira fase, que o autor cita como sendo a fase de fadiga, o dano é dominante, entretanto a tixotropia continua exercendo influência nos valores de módulo, e outros mecanismos podem permitir que o ligante se cure parcialmente. Mais detalhes sobre os efeitos da tixotropia nos ensaios de fadiga reportar a Shan (2010), Shan (2011) e Babadopulos (2017).

Conforme Di Benedetto (2011), para ensaios de tração-compressão em amostras cilíndricas, a evolução do módulo complexo durante a aplicação dos ciclos de carregamento, à deformação constante (ε_0), e temperatura constante (T_0), levando em conta os fenômenos citados anteriormente, é dada pela seguinte equação:

$$E_{T_0}^*(\varepsilon_0, N) = E^*(T_0) + \Delta E^*_{N\tilde{a}oLin} + \Delta E^*_{Aqueci.} + \Delta E^*_{Fadiga} + \Delta E^*_{Tixotrop.} \quad (31)$$

onde $E_{T_0}^*(\varepsilon_0, N)$ é o valor do módulo complexo com temperatura do ensaio constante, deformação constante, para N números de ciclos. A parcela pode ser reescrita na forma:

$$E_{T_0}^*(\varepsilon_0, N) = E^*(\varepsilon_0, T, N) \quad (32)$$

na medida em que consideramos T como a temperatura média dentro da amostra.

A parcela $E^*(T_0)$ é o verdadeiro valor do módulo complexo ao início do ensaio, quando os fenômenos que afetam este, ainda não transcorreram. Considera-se aqui que estamos na temperatura inicial de referência, no primeiro ciclo, e que a amplitude de deformação tende a zero, de maneira que a variação do módulo pela não linearidade não ocorra. Sendo assim:

$$E^*(T_0) = E^*(0, T_0, 1) \quad (33)$$

A variação do módulo pelo fenômeno da não linearidade ($\Delta E^*_{N\tilde{a}oLin}$) é dada pela Equação 34:

$$\Delta E^*_{N\tilde{a}oLin} = E^*(0, T_0, 1) - E^*(\varepsilon_0, T_0, 1) \quad (34)$$

quando então consideramos a deformação do primeiro ciclo.

A variação do módulo complexo pelo aquecimento ($\Delta E^*_{Aquecimento}$) é calculada através da expressão:

$$\Delta E^*_{Aquecimento} = E^*(\varepsilon_0, T, 1) - E^*(\varepsilon_0, T_0, 1) \quad (35)$$

Di Benedetto (2011) ainda cita que a fadiga e a tixotropia são derivadas diretamente do efeito dos ciclos:

$$\Delta E^*_{Ciclos} = \Delta E^*_{Fadiga} + \Delta E^*_{Tixotropia} \quad (36)$$

onde a fadiga é a componente irreversível dos ciclos e a tixotropia a componente reversível.

Ambas parcelas são calculadas pelas equações:

$$\Delta E^*_{Fadiga} = E^*_{Reversível}(\varepsilon_0, T, N) - E^*(\varepsilon_0, T, 1) \quad (37)$$

e

$$\Delta E^*_{Tixotropia} = E^*(\varepsilon_0, T, N) - E^*_{Reversível}(\varepsilon_0, T, N) \quad (38)$$

onde:

$E^*_{Reversível}(\varepsilon_0, T, N)$ = A parcela reversível do módulo após o final do ensaio;

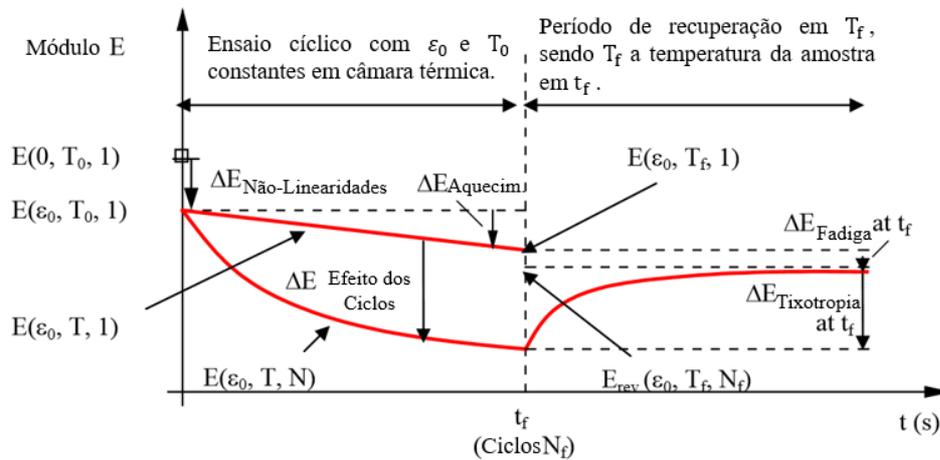
$E^*(\varepsilon_0, T, 1)$ = O valor do módulo complexo sem os efeitos dos ciclos;

$E^*(\varepsilon_0, T, N)$ = O valor do módulo complexo no instante da aplicação do último ciclo do ensaio, sem considerar o período de repouso que se sucede.

A tixotropia se encontra atrelada ainda ao fenômeno de “*healing*”, ou cicatrização das fissuras, sendo um tipo de recuperação do módulo que não deve ser confundida com o mesmo. Estudos conduzidos por Shan et. al. (2010) sugerem que o efeito da tixotropia está ligado as características de *healing* dos ligantes asfálticos.

Na Figura 2.23, segue graficamente a evolução do módulo complexo, em um ensaio parcial de fadiga, onde não se leva a amostra até a falha; considerando as distintas parcelas conectadas ao fenômeno.

Figura 2.23 - Definição de diferentes efeitos durante os ensaios cíclicos



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2011)

Conclui Mangiafico (2015) que a tixotropia e a não linearidade parecem contribuir de maneira mais elevada para as variações de $|E^*|$ e φ do que o aquecimento, sendo este responsável por menos de 10% da variação dos valores de E^* atrelados aos efeitos não relacionados como fadiga.

Di Benedetto et. al. (2011) demonstra ainda que para um número fixo de ciclos, a influência da tixotropia *versus* aquecimento cai quando os níveis de deformação no ensaio são maiores, demonstrando que o aquecimento passa a ter maior influência à medida que o material recebe maiores deformações. Conclui por fim o autor que os resultados reversíveis, dos efeitos de não linearidade, aquecimento e tixotropia são de grande importância nos testes de fadiga, e não devem ser ignorados na interpretação dos resultados.

2.5.3 Critérios de falha por fadiga

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

Ao longo do tempo, vários critérios foram desenvolvidos para interpretar a evolução das propriedades do material durante os testes de fadiga e determinar o número de ciclos correspondentes à falha. A definição de vida de fadiga, especialmente para testes de deformação controlada, é uma questão controversa. Uma visão geral dos critérios mais importantes é apresentada nesta seção.

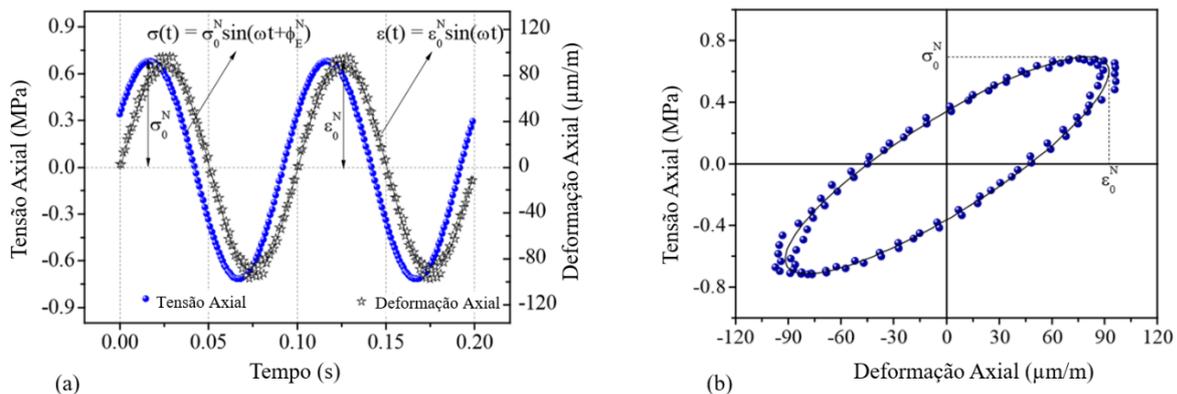
2.5.3.1 Abordagem Clássica

O critério de abordagem clássica consiste em considerar como falha por fadiga o número de ciclos em que o valor inicial do módulo dinâmico se reduz pela metade, atingindo uma queda de 50% da rigidez da amostra. O critério clássico foi utilizado por Pronk e Hopman (1990); Tayebali et. al. (1993); Smith e Hesp (2000), entre outros. Conforme Di Benedetto et. al. (1996), Kim et. al. (1997), Tapsoba (2012), entre outros, este é um critério arbitrário e que não leva em conta os importantes efeitos de influência não relatados como fadiga incidentes durante o ensaio.

2.5.3.2 Abordagem energética

O método da abordagem energética consiste em monitorar a evolução da energia dissipada pelo material durante o carregamento cíclico. Para os materiais LVE sujeitos a ciclos de carga e descarga de esforços de tração e compressão (Figura 2.24a), a curva de relação tensão deformação apresenta o formato de uma elipse como mostra a Figura 2.24b.

Figura 2.24 - Relação tensão-deformação em materiais LVE com ensaio tração-compressão cíclico.



Fonte: Adaptado de Di Benedetto et. al. (2011)

Para dada relação tensão-deformação, a área da elipse representa a energia dissipada (W) durante um ciclo de tração-compressão de carregamento senoidal. Nesta configuração W é dado pela seguinte equação:

$$W_{ciclo} = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \text{sen}(\varphi) \quad (39)$$

Onde φ é o ângulo de fase, calculado através da defasagem dos picos de tensão e deformação da Figura 24a.

A energia dissipada acumulada ($\sum W$) depois de N ciclos é a dada pela soma da energia dissipada em cada ciclo (W_i):

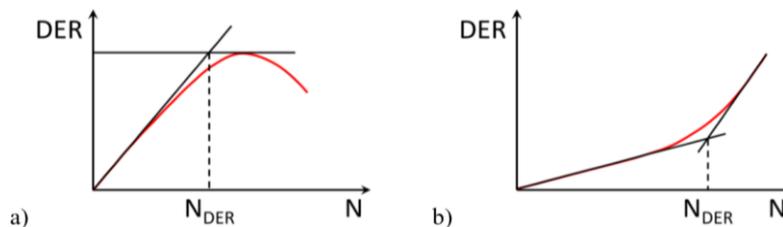
$$\sum W = \sum_{i=1}^N W_i \quad (40)$$

O método energético consiste então em monitorar a evolução da razão de energia dissipada (DER), definida como:

$$DER = \frac{\sum W}{W_N} \quad (41)$$

Assim, o parâmetro DER é plotado em relação ao número de ciclos e a falha é determinada quando essa relação apresenta uma mudança na tendência de evolução. Como podemos ver na Figura 25, existem duas curvas típicas desta relação, uma para os ensaios de tensão controlada (Figura 25a) e outra para os de deformação controlada (Figura 2.25b).

Figura 2.25 - Falha por fadiga determinada pelo método energético e o parâmetro DER.



Fonte: Mangiafico (2014)

Verifica-se então que, com o auxílio dos elementos gráficos é possível determinar o N_f referente a falha por fadiga proposto pelo método.

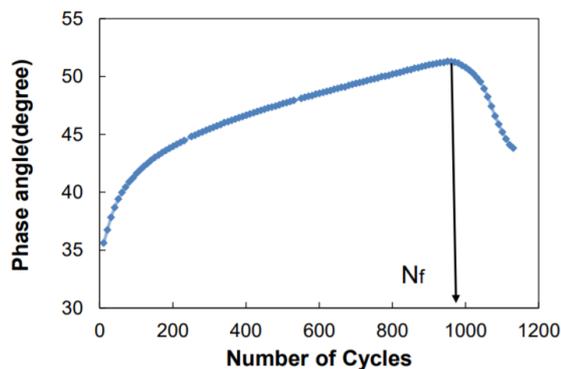
Conforme Kim (2009), para o ensaio de deformação controlada podemos observar três estágios na curva de energia dissipada pelo número de ciclos. A primeira fase, de comportamento quase-linear representa o estágio durante o qual a energia por ciclo é dissipada apenas para vencer o amortecimento viscoso do material, sem que esteja ocorrendo dano na amostra. O segundo estágio, se caracteriza pelo início da fissuração, e há então o consumo de

energia no processo de danificação, além da energia utilizada na resistência viscosa. No terceiro estágio, temos a propagação das fissuras e observa-se um maior crescimento da taxa de dissipação de energia por ciclo. Este último estágio é o mais crítico, no qual o dano por ciclo é extremamente alto, e os fenômenos de cicatrização (*healing*) que favorecem a recuperação da rigidez dificilmente ocorrem.

2.5.3.3 Critério do Ângulo de Fase

O critério do ângulo de fase proposto por Reese (1997) consiste em identificar o ponto de inflexão dos valores do ângulo de fase (φ). O ponto de inflexão se encontra coincidente ao pico máximo dos valores de (φ) (Figura 2.26). Essa inversão da tendência de (φ) representa que ocorreu mudança no comportamento mecânico do material devido ao acúmulo de dano por fadiga.

Figura 2.26 - Vida de fadiga definida pelo ângulo de fase



Fonte: Zhang (2012)

Segundo Kim et. al. (2003), o ponto de inflexão do ângulo de fase condiz com grande acurácia ao segundo ponto de inflexão da rigidez do material, onde este perde de 70 a 80% do seu valor de rigidez inicial. Conforme os autores, esse critério de falha por fadiga é consideravelmente mais preciso e lógico do que simplesmente determinar a falha de maneira clássica, pela redução arbitrária de 50% do valor inicial de rigidez.

2.5.3.4 Critério “Local”

O critério local se baseia na hipótese de que, quando ocorre a transição entre as fases II e III, a fissuração se propaga formando macro fissuras, perturbando a homogeneidade do campo

de tensão-deformação da amostra (Baaj, 2002). Por esse critério, para avaliar a vida de fadiga do material, as medições de deformação devem ser realizadas usando pelo menos três extensômetros colocados a 120 ° um do outro.

Enquanto durante a Fase I e a Fase II, todas as medidas de amplitude da deformação dos extensômetros estão próximas da amplitude média da tensão, durante a Fase III, essas medidas podem divergir muito rapidamente, estabelecendo um critério para determinar a falha de fadiga. Quando qualquer um dos três extensômetros exceda 25% (no valor absoluto), o campo de deformação médio da amostra, considera-se então que não existe mais homogeneidade do material, indicando a presença de falha. A ruptura por fadiga da amostra é então assumida, e o número correspondente de ciclos é considerado como a vida de fadiga.

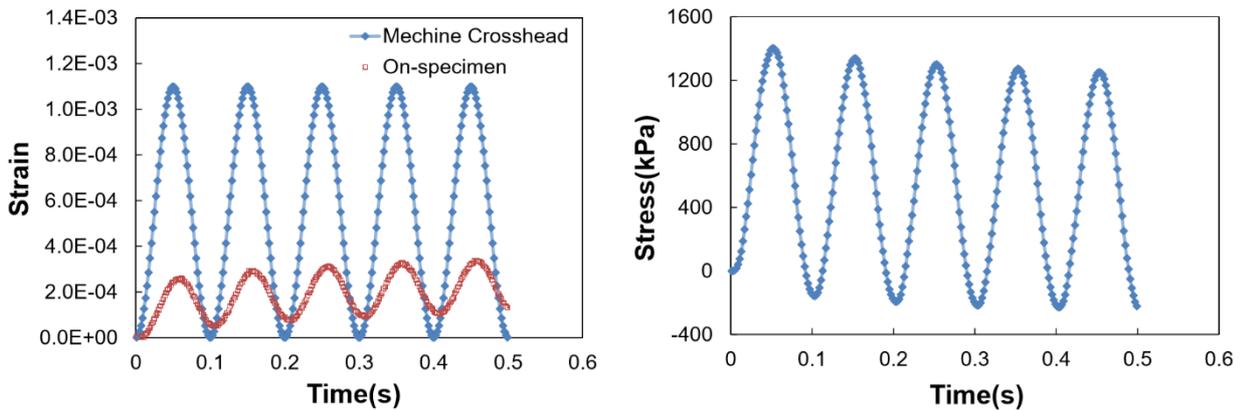
2.5.4 Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão consiste na aplicação de uma deformação cíclica senoidal de amplitude constante em corpos de prova cilíndricos, até que amostra entre em colapso. Durante o ensaio, são obtidos os dados de deformação, de carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico. O ensaio é normatizado pela norma AASHTO TP 107-14 - *Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Concrete from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*.

O ensaio pode apresentar diferentes tipologias de modo de carregamento, entre elas, o de tensão controlada, o de deformação controlada, e o de deslocamento do atuador controlado. Segundo Zhang (2012) o controle de deslocamento do atuador (*controlled crosshead test*) (CX), tem como vantagem permitir o ensaio completo até a falha da amostra limitando os efeitos da viscoplasticidade até certo ponto. Além disso, os ensaios cíclicos de CX são de fácil operação em amostras cilíndricas quando comparados aos ensaios tradicionais de controle de deformação pelos LVDTs.

Durante o ensaio cíclico de CX o deslocamento do atuador é programado para chegar a um valor de pico constante em cada ciclo. Entretanto conforme Hou (2009), Underwood (2010) e Zhang (2012), devido a mudança na taxa de conformidade entre a amostra e o equipamento de carga, as deformações medidas na amostra crescem em magnitude (Figura 2.27). Os valores de tensão aplicados para garantir o deslocamento programado apresentam valores iniciais praticamente acima do eixo do zero, e tendem a se estabilizar com o valor médio de amplitude em zero após alguns poucos ciclos.

Figura 2.27 - Tensão e deformação iniciais em ensaio com controle de deslocamento do atuador



Fonte: Zhang (2012)

De maneira geral, os ensaios cíclicos de controle do atuador empregam um modo de carga misto, não se configurando nem puramente como tensão controlada, nem puramente como deformação controlada. Após os primeiros ciclos a tensão média se estabiliza dentro da amostra de maneira que os carregamentos seguintes se apresentam como ciclos de tração-compressão.

A execução do ensaio consiste em duas fases. Primeiramente, aplica-se, utilizando a mesma frequência do ensaio de fadiga, um pequeno carregamento na amostra, levando está a um intervalo de deformação de 50 a 75 μm , medido nos LVDTs acoplados à amostra. Esse pequeno ensaio de módulo precedendo o ensaio de fadiga é conhecido como *fingerprint*.

O *fingerprint* é um pequeno teste que tem por objetivo determinar as variações de amostra para amostra, de maneira que o carregamento para dado nível de deformação pré-determinado seja conhecido para cada corpo de prova.

Em seguida, a amostra é submetida ao ensaio de fadiga propriamente dito, em que o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga. Como descrito anteriormente, o ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração direta é um ensaio homogêneo, desta forma, os dados obtidos podem ser tratados diretamente para a caracterização da fadiga, não sendo necessárias soluções estruturais.

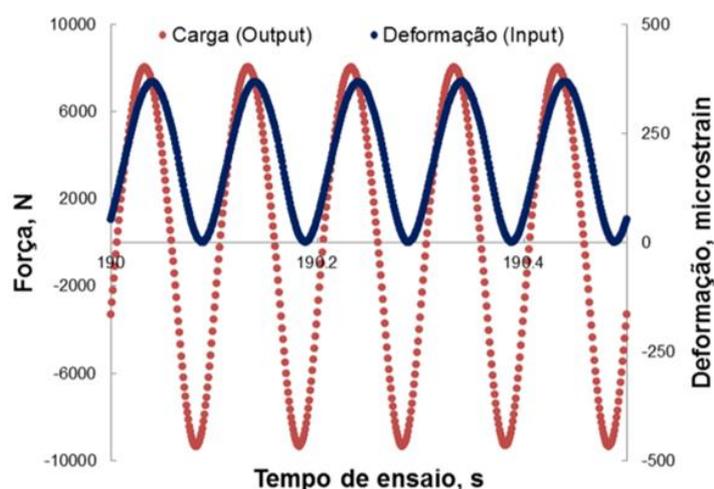
Através deste ensaio, diferentes abordagens de fadiga podem ser feitas. Os critérios de falha por fadiga tradicionais podem ser aplicados diretamente, por meio do monitoramento das tensões e deformações, do módulo dinâmico e do ângulo de fase durante o ensaio. Após a determinação do ciclo de falha (N_f) a abordagem pode seguir com o uso das curvas de Wöhler.

O ensaio permite também a caracterização das misturas asfálticas por meio do modelo S-VECD, sendo necessário para tal, que se realize também o ensaio de módulo complexo para cada uma das misturas, visando a determinação das propriedades viscoelásticas lineares.

É importante ressaltar que, mesmo para as diferentes abordagens de vida de fadiga, os dados provêm do mesmo ensaio, utilizando as mesmas configurações. Para os critérios tradicionais temos uma análise centrada em uma temperatura de referência, enquanto que para o modelo S-VECD obtém-se uma curva característica de dado que independe das temperaturas. O modelo S-VECD será apresentado na próxima seção.

Os ciclos de carregamento (Figura 2.28) são então aplicados na amostra, visando atingir a deformação pré-determinada. Nota-se que diferentemente da Figura 2.27, a Figura 2.28 mostra uma história de tensões-deformações em ciclos mais avançados, onde a tensão na amostra já se encontra estabilizada.

Figura 2.28 - Exemplo de aplicação dos ciclos de carregamento no ensaio de tração-compressão em deformação controlada



Fonte: Nascimento (2015)

Verifica-se através da Figura 2.28 que no ensaio de tração-compressão, há alteração dos sinais das cargas, entretanto, a resposta de deformação está sempre acima ou igual as dimensões originais da amostra. De forma geral, o ensaio inicia aplicando uma força de tração, que deforma o corpo de prova até a deformação determinada, após isso, a aplicação da carga vai diminuindo até que está inverte o sinal, estando então em força de compressão. A amostra é “comprimida” até voltar a sua dimensão original, mas não há exatamente uma deformação de compressão com inversão de sinal na resposta de deformação. O corpo de prova nunca comprime além das suas próprias dimensões iniciais.

Os ensaios são geralmente conduzidos a frequência de 10 Hz e temperatura de 20°C em condições diferentes, ou seja, variando a amplitude de deformação. Conforme a norma AASHTO TP 107-14, três corpos de prova são necessários para o ensaio. Inicia-se o teste de fadiga após o fingerprint, com um nível de deformação de 300 $\mu\epsilon$, e verifica-se o número de

ciclos até a falha (N_{f1}), se N_{f1} é menor do que 500 ciclos, desconsidera-se o ensaio e se reinicia o processo de fingerprint e fadiga para deformação de $250 \mu\epsilon$, se for maior, as deformações para a segunda e terceira amostra passam a ser condicionadas ao N_{f1} conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Níveis de deformação propostos pela ASSHTO TP 107-14

Caso	ϵ_{os2}	ϵ_{os3}
$500 < N_{f1} < 1,000$	$\epsilon_{os1} - 100$	$\epsilon_{os1} - 150$
$1,000 < N_{f1} < 5,000$	$\epsilon_{os1} - 50$	$\epsilon_{os1} - 100$
$5,000 < N_{f1} < 20,000$	$\epsilon_{os1} + 50$	$\epsilon_{os1} - 50$
$20,000 < N_{f1} < 100,000$	$\epsilon_{os1} + 100$	$\epsilon_{os1} + 50$
$100,000 < N_{f1}$	$\epsilon_{os1} + 150$	$\epsilon_{os1} + 100$

Fonte: Adaptado de ASSHTO TP 107-14

Através do modelo S-VECD, alimentado com os dados provenientes do ensaio uniaxial cíclico e fadiga a tração-compressão, é possível obter então a curva característica de dano do material. A concepção do modelo S-VECD, a teoria que está por trás da modelagem viscoelástica de dano contínuo, o critério de falha associado ao método, e a curva característica de dano, serão assuntos abordados a partir da próxima seção.

2.6 MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO (VECD)

A necessidade de uma ferramenta capaz de caracterizar o dano por fadiga de forma precisa e eficiente, e que fosse capaz de prever o mesmo, fez com que diversas pesquisas se direcionassem na tentativa de unir o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas com alguma teoria que fosse capaz de representar o acúmulo de dano no material. Desta forma, surge o VECD, que busca analisar o desempenho das misturas, trazendo uma propriedade desta em relação ao dano por fadiga, em um protocolo de ensaios rápido e de grande acurácia, simplificando a previsão do fenômeno fadiga em campo.

A concepção da teoria viscoelástica de dano contínuo começa com Kim e Little (1990), que aplicaram com sucesso a teoria constitutiva viscoelástica não linear com dano distribuído de Schapery em misturas do tipo areia asfalto, submetidas a carregamentos cíclicos. A teoria original foi desenvolvida por Schapery (1981), visando a modelagem de propulsores sólidos de foguetes, e é baseada em formulações termodinâmicas com equações constitutivas viscoelásticas e viscoplásticas, além de variáveis de estado interno relacionadas com a fissuração do material.

Mais tarde, Schapery (1990) desenvolveu a teoria do trabalho potencial para materiais com danos crescentes com base na termodinâmica de processos irreversíveis, que se tornou um dos pilares do VECD passando a ser aplicada nos trabalhos posteriores.

Então, Lee e Kim (1998) desenvolveram o modelo VECD e mostraram a sua aplicabilidade em concretos asfálticos submetidos a carregamentos controlados tanto por tensão quanto por deformação.

Vários trabalhos se sucederam aprimorando o VECD, como os trabalhos de Daniel e Kim (2002), que experimentalmente concluíram que a função $C(S)$ é independente das condições de aplicação de carga, sendo elas cíclicas ou monotônicas, para um mesmo material; Chehab et. al. (2002) e Chehab et. al. (2003) que estenderam o princípio de superposição tempo-temperatura para misturas asfálticas com dano crescente; Underwood et. al. (2006) e Underwood et. al. (2009), que validaram o uso do modelo para ligantes modificados e encontram fortes correlações entre resultados de desempenho das misturas a partir do VECD e os encontrados em simulador de tráfego, confirmando que as premissas utilizadas na metodologia são válidas e aplicáveis.

O modelo VECD era até então predominantemente baseado em ensaios de tração direta monotônicos, muito mais simples do que testes cíclicos, para obter curvas características de dano, entretanto, nenhum critério de fadiga poderia ser extraído dessas curvas, uma vez que não ocorreu repetição de ciclos. Isso significa que, embora a propriedade de danos principais possa ser extraída de testes monotônicos, nenhum critério de falha de fadiga pode ser aplicado.

Entre os esforços de pesquisa mais recentes, estão os estudos de Underwood et al. (2010) e Underwood et al. (2012) que levaram a uma simplificação desses modelos de danos contínuos para testes cíclicos e, portanto, à caracterização da falha por fadiga sob carga cíclica de misturas asfálticas, formulando então o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD).

Sabouri e Kim (2014) propuseram um critério de falha de fadiga com base na taxa de liberação da energia de pseudo-deformação (G^R), que é independente do modo de carga e temperatura. Este critério de falha requer testes de caracterização em apenas uma única temperatura e um único modo de carregamento, reduzindo significativamente os custos associados ao teste. O critério proposto apresentou grande acurácia na previsão da vida de fadiga das misturas ensaiadas pelos autores.

A nível nacional, Nascimento (2015) em sua tese de doutorado pela *North Carolina State University*, aplicou e validou o modelo S-VECD e o critério de falha por fadiga proposto por Sabouri e Kim (2014) para as misturas asfálticas brasileiras.

2.6.1 Bases teóricas do modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)

A mecânica do dano contínuo, ou *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD), utiliza propriedades fundamentais das misturas asfálticas para efetivamente caracterizar seu comportamento através de um programa experimental simplificado. Trata-se de uma abordagem funcional, embora sua teoria seja envolvente, a qual assume algumas simplificações que praticamente não reduzem sua capacidade preditiva, ao mesmo tempo em que aumentam enormemente a aplicação do modelo na caracterização da vida de fadiga de misturas asfálticas (HOU, 2009).

As teorias de dano contínuo, entre elas o modelo VECD, ignoram comportamentos específicos de microescala e se propõem a caracterizar o material usando observações a nível de macroescala, ou seja, o consequente efeito que mudanças micro estruturais provocam em propriedades observáveis. Os dois parâmetros essenciais que a teoria do dano contínuo busca quantificar são a rigidez e o dano efetivo.

A rigidez efetiva, que representa a integridade estrutural do material, pode ser facilmente avaliada na forma de módulo secante instantâneo; enquanto o dano é difícil de quantificar e geralmente depende de teorias rigorosas. Uma das teorias é a teoria do potencial de trabalho desenvolvida pela Schapery (1990) para materiais elásticos com danos crescentes com base na termodinâmica do processo irreversível. Na teoria de Schapery, o dano é quantificado por uma variável de estado interno (S) que explica mudanças estruturais no material. Com o uso do princípio de correspondência elástico-viscoelástico, a teoria pode então ser ampliada para os meios viscoelásticos (NASCIMENTO, 2015).

Desta forma, para a utilização do modelo VECD, dois parâmetros principais devem ser quantificados: a pseudo-rigidez (C), também chamada de integridade do material, e o dano (S). Estes parâmetros são únicos para um dado material, definidos pela Curva Característica de Dano (C vs S). Observa Nascimento et. al. (2014) que, independentemente de o ensaio de dano ser cíclico ou monotônico, com controle de tensão ou de deformação, com diferentes amplitudes, em diferentes frequências ou até mesmo em diferentes temperaturas, a curva C vs S obtida será a mesma a uma dada temperatura reduzida utilizada como referência. Assim, visto que estes parâmetros são únicos para um dado material, e que independente das características de ensaio sempre levam a mesma curva característica de dado, fica caracterizada a curva C vs S como uma propriedade fundamental do material.

Hou et al. 2010 é destaca que a chave do modelo VECD é a curva característica de dano, tal propriedade, devidamente implementada em um código de análise de pavimentos, pode ser

empregada para prever o dano por fadiga de camadas asfáltica sujeitas às várias condições de campo durante a vida de serviço.

O modelo VECD está fundamentado em três conceitos principais: (i) Teoria do trabalho potencial de Schapery, (ii) Princípio da correspondência elástico-viscoelástico e, (iii) Superposição tempo-temperatura com dano. Os próximos tópicos apresentaram cada um destes conceitos, para ao final, com a estrutura teórica apresentada, seja possível deduzir o modelo S-VECD.

2.6.2 Princípio de correspondência elástico-viscoelástico

Para a resolução de problemas viscoelásticos, Schapery (1984) propôs o uso do princípio de correspondência elástico-viscoelástico. A relação tensão-deformação para muito materiais viscoelásticos pode ser representada através das equações clássicas de problemas elásticos, fazendo uso das chamadas pseudo-variáveis. Esta característica de simplificação permite que uma ampla classe de princípios de correspondência possa ser estabelecida e aplicada a análises de deformações viscoelásticas.

Na prática, as deformações não são necessariamente quantidades físicas em um corpo viscoelástico, e podem ser substituídas por uma pseudo-variável, ou seja, a pseudo-deformação (ε^R). É nesse conceito de pseudo-deformação que o princípio de correspondência elástico-viscoelástico está inserido no modelo VECD.

A pseudo-deformação uniaxial é determinada por Schapery (1984) através da seguinte Equação:

$$\varepsilon^r = \frac{1}{E_r} \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (42)$$

onde E_R é o módulo de referência, o qual é uma constante e possui a mesma dimensão do módulo de relaxação.

Conforme Nascimento (2015), através da Equação 42, pode ser encontrada uma correspondência com relação a tensão-deformação elástica linear, isto é, a Equação 42 assume a forma de equações elásticas de tensão-deformação, mesmo que estas sejam equações de caráter viscoelástico.

Considerando a Equação 43 de relação tensão-deformação para materiais de comportamento viscoelástico linear:

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (43)$$

é possível observar que as equações 42 e 43 podem ser reescritas da forma:

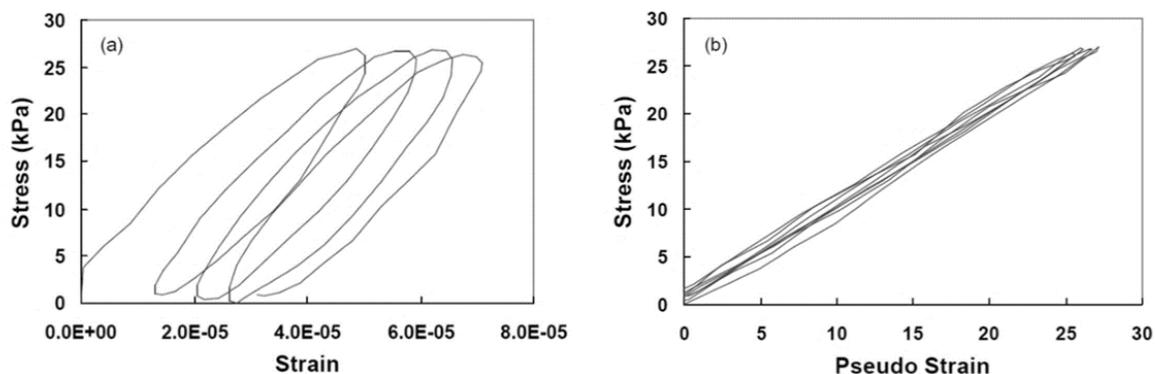
$$\sigma = E_R \times \varepsilon^r \quad (44)$$

Torna-se fácil notar que a Equação 44 assume forma similar a lei de Hooke para materiais de comportamento elástico, mesmo que realmente sejam equações viscoelásticas, e a correspondência entre as relações de tensão-deformação elásticas e viscoelásticas pode ser encontrada. Observa-se também que a pseudo-deformação é idêntica à tensão viscoelástica linear para o caso de $E_r = 1$.

Essas observações sugerem que, se o comportamento de histerese do concreto asfáltico, ou seja, um comportamento cujas propriedades dependem de todo o histórico de tensões e deformações, está apenas no domínio LVE, a apresentação dos dados em termos de tensão e pseudo-deformação tornaria o comportamento tempo-dependente em um comportamento elástico linear.

De fato, com o uso do conceito de pseudo-deformação é exatamente isso que acontece, conforme Figura 2.29.

Figura 2.29 - Comportamento tensão-deformação em ensaio cíclico de tensão controlada em material LVE



Fonte: Adaptado de Daniel (2001)

A Figura 2.29a demonstra o comportamento de tensão-deformação para o carregamento cíclico de tensão controlada dentro do domínio LVE. Como o material está sendo testado em sua faixa viscoelástica linear, nenhum dano é induzido e o comportamento histerético e a tensão acumulada são devidos apenas à viscoelasticidade. A Figura 2.29b mostra os mesmos dados de

tensão plotados pela pseudo-deformação calculada. Todos os ciclos tendem para uma única configuração, com uma inclinação de razão igual a um. Desta forma $E_R = 1$.

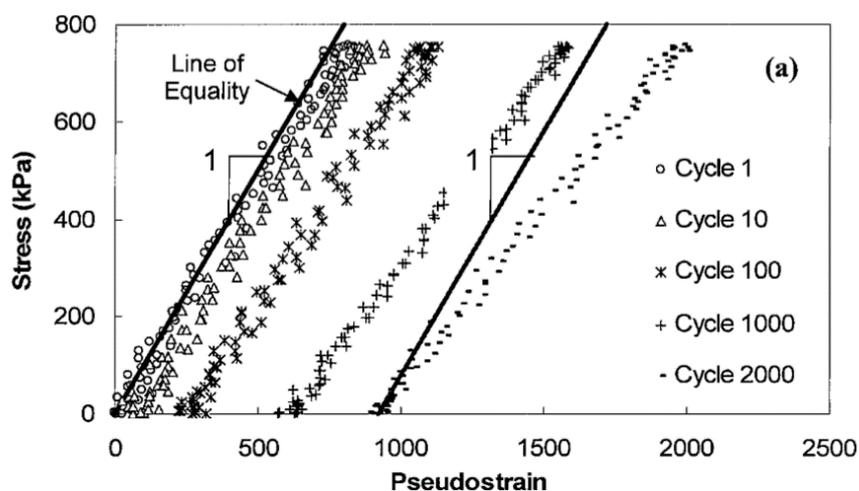
Sendo assim, dentro do domínio LVE, sem nenhum dano induzido ao material, o módulo de referência (E_R) exibirá valor unitário igual a um. Como visto anteriormente, quando $E_R = 1$, a pseudo-deformação é idêntica a tensão viscoelástica linear, o que leva a conclusão de que, em condições de comportamento LVE, a razão tensão/pseudo-deformação (σ/ε^R), também conhecida como pseudo-rigidez (C) apresentara valor igual a um ($C = 1$).

Como visto anteriormente, o parâmetro C é um dos elementos principais do VECD, e representa fisicamente a integridade do material. É calculado pela razão exposta acima e demonstrada na Equação 45.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (45)$$

Quando o material é então induzido a danificação, com mudança da microestrutura interna, a tensão aplicada necessária para o mesmo nível de deformação pré-determinado passa a ser menor. Logo a pseudo-rigidez (C) começa a diminuir, e a inclinação da curva de tensão/pseudo-deformação muda, não sendo mais uma reta de igualdade, como pode ser visto na Figura 2.30.

Figura 2.30 - Pseudo deformação em ensaio de tensão controlada com danificação ao longo dos ciclos



Fonte: Kim (2009)

Baseado nestas observações, justifica-se a necessidade de uma variável de dano atrelada a função C , que equacione a queda da pseudo-rigidez com o crescimento do dano. Para

determinar uma representação analítica da função de dano, adota-se então a teoria do trabalho potencial, desenvolvida por Schapery (1990).

2.6.3 Teoria do trabalho potencial

Schapery (1990) desenvolveu a teoria do trabalho potencial para descrever o comportamento mecânico de materiais compósitos elásticos com danos crescentes. Segundo o autor, quando o dano ocorre devido ao carregamento externo, o trabalho realizado não é totalmente armazenado como energia de deformação, sendo parte dele consumido causando danificação ao material. A quantidade de trabalho necessária para produzir uma determinada quantidade de dano pode ser expressa como uma função das variáveis de estado interno no contexto da termodinâmica do processo irreversível. Os elementos da teoria de Schapery podem ser descritos como apresentado abaixo.

O comportamento mecânico de um material elástico com mudança estrutural é definido em termos de uma relação entre as tensões generalizadas (σ_i) e os deformações generalizados (ε_i). Estas variáveis generalizadas se transformam em variáveis físicas para diferentes situações, podendo ser forças e deslocamentos ou tensões e deformações, dependendo do problema a ser resolvido. Dessa forma temos a seguinte relação:

$$\delta W = \sigma_i \times \delta \varepsilon_i \quad (46)$$

onde δW é o trabalho virtual, e $\delta \varepsilon_i$ as deformações virtuais.

Segundo a teoria, assume-se que existe uma função de densidade de energia de deformação $W = W(\varepsilon, S_m)$ na qual S_m representa as variáveis de estado internas do material. O índice (m) representa as inúmeras variáveis de estado interno que podem atuar na danificação.

Para uma variação infinitesimal em S_m e ε , temos a seguinte equação:

$$dW = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial W}{\partial S_m} dS_m = \sigma_i d\varepsilon_i - f_m dS_m \quad (47)$$

onde $f_m = -\partial W / \partial S_m$, chamada então de força termodinâmica.

Como pode ser visto, a primeira parcela da Equação 47 indica a contribuição das forças (ou deformações) generalizadas no trabalho (W) de um processo infinitesimal, enquanto a segunda parcela (f_m) está ligada a danificação.

Conforme Park e Schapery (1997), a lei de dano é dada então pela equação:

$$f_m = \frac{\partial W_s}{\partial S_m} \text{ ou } -\frac{\partial W}{\partial S_m} = \frac{\partial W_s}{\partial S_m} \quad (48)$$

onde cada f_m deve ser visto como uma força termodinâmica com capacidade de produzir mudanças no parâmetro estrutural S_m , e $\partial W_s/\partial S_m$ como a força requerida para estas mudanças.

Até o momento, apresentou-se a teoria para meios elásticos, contudo, ao usar o princípio da correspondência descrito na seção anterior, a teoria do trabalho potencial pode então ser estendida aos meios viscoelásticos. Para tal, as equações devem ser escritas em termos de pseudo-deformação ao invés da deformação física. Desta forma a função de densidade de energia de deformação $W = W(\varepsilon, S_m)$ torna-se uma função de densidade de energia de pseudo-deformação:

$$W^R = W^R(\varepsilon^R, S_m) \quad (49)$$

Da mesma forma, aplicando a pseudo-deformação a Equação 46 temos a relação tensão deformação para os meios viscoelásticos:

$$\sigma = \frac{W^R}{\varepsilon_R} \quad (50)$$

Entretanto, conforme estudo experimentais conduzidos por Park (1996) a lei de evolução de dano para materiais elásticos não pode ser transcrita diretamente para uma lei de evolução de dano viscoelástica através do princípio de correspondência. Isso se deve ao fato de que tanto a força disponível para o crescimento de S_m quanto a resistência contra o crescimento de S_m na lei de evolução de dano são dependentes da taxa de aplicação das cargas para a maioria dos materiais viscoelásticos.

Sendo assim, adota-se a lei de evolução de dano apresentada por Schapery (1975) para elastômeros, que é semelhante em forma as conhecidas leis de crescimento de fissuras em meio viscoelástico, e representa bem o processo de evolução de dano em muitos materiais

viscoelásticos. A equação de evolução de dano apresentada por Schapery (1975) e Schapery (1984) é demonstrada abaixo:

$$S_m = \left(-\frac{\partial W^r}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (51)$$

Verifica-se que a lei, para os materiais viscoelásticos, apresenta forma semelhante a apresentada para os meios elásticos. A força termodinâmica descrita por $f_m = -\partial W/\partial S_m$, agora leva a incorporação da pseudo-deformação. Além disso, acrescenta-se o expoente α_m a equação. Nesta situação, α_m é uma constante dependente do material, e ligada diretamente as propriedades de creep e relaxação.

Até aqui, temos então a lei de evolução de dano para matérias viscoelásticos. Está lei, especifica uma variável de estado interno (S_m) que quantifica o dano do material, definido como mudanças micro estruturais que resultam em redução da rigidez.

Quando tratamos do fenômeno de dano por fadiga em misturas asfálticas, estamos interessados no fenômeno da fissuração, e relacionamos assim apenas uma variável de estado interno (S), usada para modelar o crescimento do dano em tensão. Conforme Kim (2009), o método usado para determinar o parâmetro (S) é uma questão de preferência entre duas diferentes soluções geralmente propostas. A primeira delas foi proposta por Park et. al. (1996), enquanto a segunda, aqui deduzida, por Lee e Kim (1998). Ambas foram aplicadas com sucesso a partir de Daniel e Kim (2002) e nos estudos que se sucederam com a utilização do VECD.

É possível verificar que as equações constitutivas para materiais LVE sem dano (Equação 52) e com dano (Equação 53) são as seguintes:

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (52)$$

$$\sigma = C(S) \varepsilon^R \quad (53)$$

onde $C(S)$ é a pseudo-rigidez (C), dada pela Equação I, atrelada a função de dano (S), ou seja, a pseudo-rigidez variando conforme o aumento da danificação.

Tomando a Equação (53) e sabendo que a área sob um gráfico tensão-deformação fornece o trabalho realizado sobre o material, é possível calcular a função de densidade de energia de pseudo-deformação. Como a área sobre a curva é um triângulo, visto que com o uso

da pseudo-deformação o material assume representação elástica do comportamento, a função é dada pela seguinte equação:

$$W^R = \frac{1}{2} C(S) (\varepsilon^R)^2 \quad (54)$$

A partir daqui, combinando a lei de evolução de dano (Equação 51) e a função de densidade de energia de pseudo-deformação (Equação 54) temos segundo Lee (1996):

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{1}{2} \frac{dC}{dS} (\varepsilon^R)^2 \right)^\alpha \quad (55)$$

aplicando a regra da cadeia:

$$S = \int_0^t \left(\frac{1}{2} \frac{dC}{dt} (\varepsilon^R)^2 \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt \quad (56)$$

Conforme Lee e Kim (1998), uma aproximação numérica pode ser então utilizada para determinar S em função do tempo:

$$S = \sum_{t=1}^N \left[\frac{1}{2} (\varepsilon^R)^2 (C_{i-1} - C_1) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_{i-1} - t_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (57)$$

2.6.4 Princípio da superposição tempo-temperatura

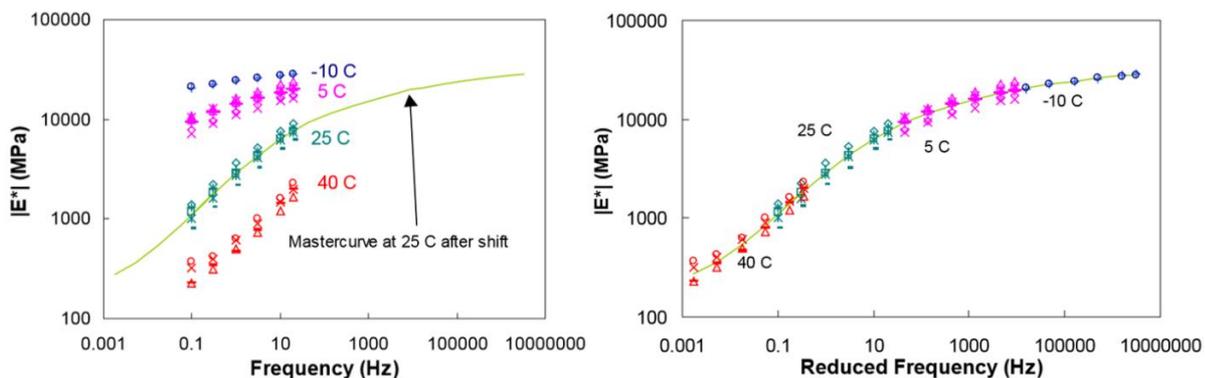
Para materiais viscoelásticos, a rigidez é dependente do tempo ou taxa de aplicação de carga, e da temperatura. Para capturar todo o espectro de rigidez, os testes precisam ser realizados em várias frequências de carga e de temperaturas. No entanto, devido à limitação da capacidade da máquina e do tempo de ensaios, essa tarefa nem sempre é viável de ser realizada. O princípio da superposição tempo-temperatura é então extremamente útil quando aplicado, reduzindo significativamente o tempo de ensaios necessário.

De acordo com Hou (2010), o mesmo valor de rigidez pode ser obtido em ensaios de baixas temperaturas e longos tempos de carregamento ou com ensaios a altas temperaturas, mas altas frequências de aplicação de carga. Em outras palavras, o efeito do tempo e da temperatura podem ser combinados em um único parâmetro.

Pagliosa (2004) explica que em diferentes condições de temperatura, o módulo de relaxação assim como o módulo de fluência são funções que não mudam de forma, sofrendo apenas translação no eixo do tempo, isso leva a uma relação de equivalência entre tempo e temperatura. Materiais que exibem esta propriedade são denominados termo reologicamente simples, tal propriedade é usada para estender a escala de tempo dos dados experimentais, sendo a base do princípio da superposição tempo-temperatura.

Os dados de ensaios realizados em todas as outras temperaturas são deslocados horizontalmente em relação ao tempo até que as curvas se fundam à uma temperatura de referência que deve ser selecionada e fixada inicialmente, compondo uma função suavizada do comportamento reológico do material ao longo de uma faixa extensa de frequências de carregamento (Figura 2.31).

Figura 2.31 - Translação Tempo-Temperatura em curva mestra



Fonte: Chehab (2002)

Do ponto de vista matemático, a partir da escolha da temperatura de referência (T_{ref}), a translação para todas as outras isotermas se dá pela multiplicação da frequência de todos os pontos de cada curva pelo coeficiente a_T , também chamado de *shift factor*, que é função da curva primitiva de ensaio (T) e da isoterma que se pretende formar a partir da translação.

O coeficiente a_T pode ser calculado por meio da Equação 58, desenvolvida por William, Landal e Ferry (1955):

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (58)$$

Teoricamente conforme Daniel (2001), o *shift factor* é uma propriedade do material, visto que o *shift factor* obtido por meio da construção da curva mestra de módulo dinâmico

pode ser aplicado para a translação de qualquer outra propriedade do mesmo material. Cita Witczak (2004), que a quantidade de deslocamento em cada temperatura, necessária para a translação e formação da curva mestra, descreve a dependência que o material apresenta em relação a variação de temperatura.

2.6.4.1 Princípio de superposição tempo-temperatura com dano contínuo

As misturas asfálticas podem ser consideradas termo reologicamente simples se o nível de deformações impostas está dentro do intervalo linear viscoelástico. Ou seja, até aqui, a redução do protocolo de ensaios por meio do princípio de superposição tempo-temperatura é válida para estados não danificados. Isto implica até então que ensaios de dano, como o ensaio de fadiga, não podem se valer desta redução de protocolo, não podem analisar todo o espectro de comportamento por meio de uma única temperatura de referência, sendo necessários esforços inviáveis para a caracterização do dano por fadiga nas inúmeras condições de temperatura.

Esta limitação gerou a necessidade de pesquisas em relação ao tema. Chehab et al. (2002) mostrou então que o princípio de superposição tempo-temperatura se aplica a misturas asfálticas típicas mesmo com grandes estados de danificação. Os autores fixaram níveis de deformação altos o suficiente para causar dano as amostras e partiram da hipótese de que, se o princípio é válido para estados danificados, então os coeficientes de translação para a construção das curvas de tensão pelo tempo reduzido durante o ensaio devem ser iguais aos coeficientes de construção da curva mestra em domínios lineares viscoelásticos, onde não há dano.

Esse pressuposto assume por consequência que o princípio não é influenciado pelas condições de deformação do material. Visto isso, os autores associaram diferentes níveis de tensões para determinados deslocamentos do atuador, que levavam a deformação pré-determinada (Figura 2.32), em diferentes temperaturas de ensaio.

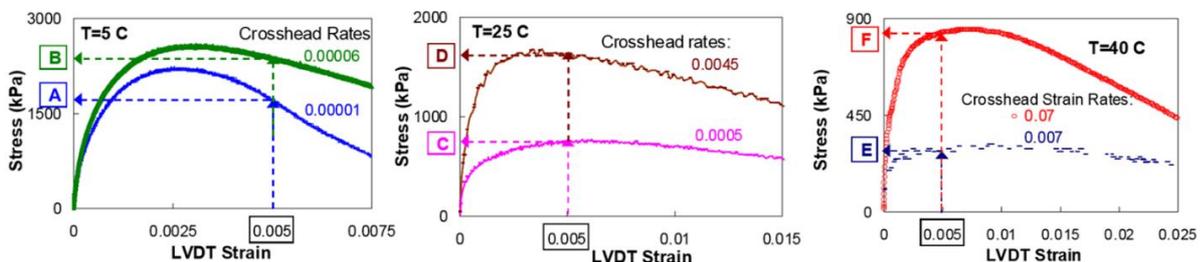
Após a determinação das tensões os autores aplicaram os coeficientes de translação (a_T) obtidos na construção da curva mestra sem danos (Figura 2.33).

Perceberam assim, que os mesmos *shift factors* utilizados na construção da curva mestra sem danos, servem para domínios de danificação, visto que a translação funciona entre as diferentes temperaturas, formando uma única curva de tensão pelo tempo reduzido, mesmo para grandes amplitudes de deformação. Outros trabalhos, como os de Zhao (2003) e Schwartz et al. (2002) também estendem o princípio de superposição a intervalos de dano contínuo. Para

informações completas a respeito do tema, indica-se a leituras de ambos os autores e do trabalho de Chehab (2002).

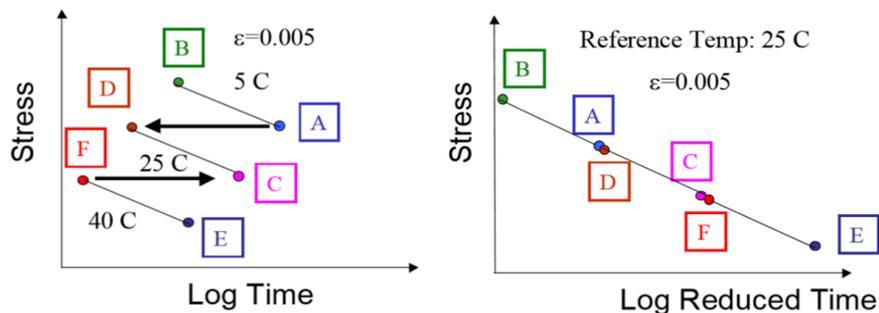
Assim, foi demonstrado que a superposição tempo-temperatura para misturas asfálticas não é apenas válida para o estado livre de dano, mas também para os estados de danificação. É de notar que estes pressupostos permitem danos laboratoriais mais rápidos e a análise da fadiga de materiais asfálticos em um menor intervalo de tempo, visto a grande redução do protocolo de caracterização.

Figura 2.32 - Determinação da tensão para deformação fixada em diferentes temperaturas e ensaios de controle do atuador



Fonte: Chehab (2002)

Figura 2.33 - Translação das curvas de tensão para tempo reduzido e temperatura de referência de 25°C



Fonte: Chehab (2002)

2.6.5 Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD)

O modelo VECD baseava-se até então em ensaios monotônicos. Essa configuração de teste era capaz de gerar a curva característica de dano, entretanto apresentava alguns problemas, entre eles: as altas cargas necessárias para o ensaio, e a impossibilidade de utilização de critério de falha por fadiga pelo método.

Conforme Underwood et al. (2012) as cargas até então chegavam muito próximas do limite de capacidade do *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT), um equipamento de teste que tem se tornado padrão nos laboratórios dos Estados Unidos da América. Desta forma, repensar o modelo para cargas menores se fazia necessário.

Quanto ao critério de falha, Nascimento (2015) cita que este é um dos principais componentes de um modelo de previsão de dano por fadiga, porém, como disserta Babadopulos (2014), com o ensaio monotônico nenhum critério de falha pode ser obtido, visto que não há a aplicação de ciclos.

Assim, visto a existência de limitações, Underwood et al. (2009) revisaram os modelos simplificados de dano contínuo que vinham sendo propostos, como Kim et al. (2008), e sugeriram um novo modelo que aproveitasse os pontos fortes dessas abordagens existentes, mantendo o rigor matemático, de maneira que permanecesse válido, e também que pudesse apresentar uma caracterização rápida dos ensaios cíclicos.

Como define Kim (2009), o S-VECD foi concebido então para a utilização em laboratórios como um procedimento de caracterização de danos com economia de tempo e, por meio de ensaios cíclicos, obter-se os critérios de falha por fadiga.

Este modelo simplificado fornece uma aplicação mais completa e precisa da abordagem de danos contínuos, e está fundamentado nos trabalhos realizado por Underwood et al. (2009) e Underwood et al. (2012). Além disso, como comentam os autores, a estrutura do modelo S-VECD pode identificar os efeitos de fatores de mistura, como o teor de asfalto, tamanho agregado, conteúdo de vazio do ar e fragilização devido ao RAP. Esta capacidade permite que os engenheiros avaliem alternativas de design de mistura potenciais de forma abrangente sem precisar realizar um grande conjunto de testes de fadiga. A principal vantagem do modelo S-VECD, no entanto, é a sua derivação rigorosa do modelo VECD, com uma estrutura mecanicamente fechada. Esta característica significa que as funções do modelo podem ser implementadas em uma ferramenta de análise estrutural, como elementos finitos, sem fazer ajustes empíricos. Essa vantagem permite uma simulação mais precisa do desempenho do pavimento do que foi possível anteriormente.

Uma das principais vantagens do modelo S-VECD é a obtenção de propriedades de dano das misturas que independem das condições de ensaio, tais como temperatura, amplitude, modo de controle (tensão ou deformação), entre outras. Tal fato permite que a partir de testes numa dada condição, seja obtido o comportamento dos materiais em diversas outras condições diferentes daquela utilizada nos ensaios, reduzindo o trabalho experimental de caracterização.

Underwood et al. (2012) forneceu a formulação final do S-VECD (Equações 59, 60, 61, 62, 63 e 64) e exemplificou seu uso para a modelagem de fadiga. Abaixo, serão apresentadas as equações, seguidas posteriormente de informações pertinentes a respeito das mesmas.

$$\varepsilon^R = \begin{cases} \varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\xi & \xi \leq \xi_p \\ (\varepsilon_{0,ta}^R)_{ciclo\ i} = \frac{1}{E_R} \times \frac{\beta + 1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i \times |E^*|_{LVE} \right) & \xi > \xi_p \end{cases} \quad (59)$$

$$C = \begin{cases} C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \times DMR} & \xi \leq \xi_p \\ C^* = \frac{(\beta + 1)}{2} \times \frac{(\sigma_{0,pp})}{(\varepsilon_{0,ta}^R) \times DMR} & \xi > \xi_p \end{cases} \quad (61)$$

$$dS = \begin{cases} (dS_{transitório})_j = \left(-\frac{DMR}{2} (\varepsilon^R)_j^2 \Delta C_j \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_j^{\frac{1}{1+\alpha}} & \xi \leq \xi_p \\ (dS_{ciclo\ i}) = \left(-\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta N_i \times \xi_p \times K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} & \xi > \xi_p \end{cases} \quad (63)$$

Onde:

ε^R = pseudo-deformação;

E_R = módulo de referência;

$E(t)$ = módulo de relaxação;

ξ = tempo reduzido;

τ = variável de integração;

ε = deformação;

$(\varepsilon_{0,ta}^R)$ = pseudo-deformação de amplitude de tração;

β = fator de forma do carregamento;

$(\varepsilon_{0,pp})$ = deformação de pico a pico;

$|E^*|_{LVE}$ = norma do módulo complexo ensaiado;

DMR = razão do módulo dinâmico;

$(\sigma_{0,pp})$ = tensão de pico a pico;

ΔC_j = variação de C entre as etapas j e $j - 1$;

ΔC_i = variação de C entre os ciclos i e $i - \Delta N_i$;

α = taxa de evolução do dano;

$\Delta \xi$ = diferença entre o tempo reduzido e o tempo transcorrido entre as etapas j e $j - 1$;

ΔN_i = variação do número de ciclos;

ξ_p = tempo de pulso reduzido;

K_1 = fator de ajuste de carga.

dS = evolução do dano

No primeiro momento, é possível notar que o S-VECD faz uso das mesmas equações de pseudo-deformação (ε^R), de pseudo rigidez (C), e do parâmetro de evolução de dano (dS), deduzidas anteriormente no modelo VECD. Acrescenta-se agora mais três equações, sendo uma para cada uma destas variáveis. Desta forma, temos agora duas equações diferentes para a pseudo deformação, a pseudo rigidez e o parâmetro de evolução do dano.

Essa nova abordagem é adotada porque os cálculos são diferentes entre os primeiros ciclos e os ciclos subsequentes, e suas razões são apresentadas com clareza por Kim et al. (2008) e Underwood et al. (2010). Underwood et. al. (2012) comenta que através de observações experimentais, verificou-se que a quantidade de dano que ocorre no primeiro ciclo de carregamento é muito significativa e deve ser interpretada com mais rigor. Portanto, o método de cálculo para este ciclo de carregamento deve ser diferente dos demais, visto que as bases que tornam o S-VECD possíveis não são precisas neste primeiro momento. Essas mesmas observações experimentais, mostraram que, quando utilizado o novo procedimento de cálculo para o primeiro ciclo, os resultados do segundo e terceiro ciclo subsequentes podem ser comprometidos. Desta forma, o modelo prevê na inclusão do cálculo de dano, o primeiro ciclo de carregamento, e deixa de fora alguns poucos ciclos subsequentes a este. Conforme os autores, esta abordagem equilibra o rigor teórico com preocupações de ordem prática, produzindo curvas características de dano com extrema precisão.

O processo de cálculo do S-VECD considera então que para o primeiro ciclo (do zero até o primeiro pico de carregamento) a análise deve ser rigorosa, e a formulação matemática é essencialmente a mesma do VECD, para ensaios monotônicos. Essa primeira porção de dano é chamada de $dS_{transitório}$. Para o restante do ensaio então, utiliza-se a nova formulação simplificada, de forma que a porção de dano que se segue é conhecida por $dS_{cíclico}$. Temos assim a seguinte condição:

$$dS = \begin{cases} dS_{transitório} & \xi \leq \xi_p \\ dS_{cíclico} & \xi > \xi_p \end{cases} \quad (65)$$

Observa-se que o princípio da superposição tempo-temperatura deve ser aplicado, de forma que a influência da temperatura no comportamento viscoelástico seja considerada. Assim, aplica-se a Equação 66 do tempo reduzido (ξ).

$$\xi = \frac{1}{a_t} \times t \quad (66)$$

A Equação 66 é utilizada conforme Babadopulos (2014) até o primeiro pico de carregamento, onde o estado estacionário ainda não foi atingido, para o restante dos dados, ou seja, no cálculo cíclico, o procedimento simplificado é utilizado para obter um tempo reduzido pelo tempo em que cada ciclo ocorreu (Equação 67).

$$\xi = \frac{1}{a_t} \left[\frac{t_{pico} + t_{vale}}{2} \right] \quad (67)$$

O processo de simplificação tem início com o novo cálculo para a pseudo-deformação. O processo de cálculo da pseudo-deformação (ε^R) pela integral de convolução (Equação 59), é extremamente rigoroso e de grande precisão. Entretanto, conforme Hou (2010), quando aplicado em ensaios cíclicos, torna-se um método computacionalmente caro, demandando muito tempo de análise, visto que os ensaios produzem facilmente mais de 10 milhões de pontos de dados. O método simplificado, utilizado somente durante o cálculo cíclico (o método rigoroso baseado na integral de convolução continua sendo aplicado na etapa de cálculo transitório), reduz drasticamente a quantidade de dados para análise sem a introdução de erros significantes.

Assume-se então que o acúmulo de dano por fadiga acontece somente em condições de carregamento de tração, de tal forma que temos a pseudo-deformação de amplitude de tração ($\varepsilon_{0,ta}^R$). Esta condição de pseudo-deformação pode ser calculada como o produto da deformação e do módulo dinâmico, para dada condição de temperatura e frequência investigada. (Equação 68)

$$(\varepsilon_{0,ta}^R) = \frac{1}{E_R} \times \frac{\beta + 1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp}) \times |E^*|_{LVE} \right) \quad (68)$$

onde $\varepsilon_{0,pp}$ é a amplitude de deformação de pico a pico, e $|E^*|_{LVE}$ o módulo dinâmico. O parâmetro β conhecido como o fator de forma do carregamento é o fator que permite a quantificação do esforço de tração dentro do histórico de carregamento, e é obtido através da Equação 69.

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (69)$$

Nota-se que quando $\beta = 1$, toda a história de tensão é tração; quando $\beta = 0$, metade da história é tração; e quando $\beta = -1$, toda a história é compressão.

Para o cálculo da pseudo rigidez (C), utiliza-se a Equação 61 para o cálculo transitório, visto que até o primeiro pico de tensão no ensaio, a força está sempre tracionando a amostra. Para o cálculo cíclico, o método simplificado faz uso da Equação 62. Representaremos novamente aqui a Equação 62 para melhor visualização.

$$C^* = \frac{(\beta + 1)}{2} \times \frac{(\sigma_{0,pp})}{(\varepsilon_{0,ta}^R) \times DMR} \quad (62)$$

Verifica-se que novamente fazemos uso do fator de forma do carregamento (β), e também das variáveis de tensão de pico a pico ($\sigma_{0,pp}$), e pseudo-deformação de amplitude de tração ($\varepsilon_{0,ta}^R$). Estes índices podem ser visualizados, para ensaios de controle de deslocamento do atuador, na Figura 2.34.

Por fim, a pseudo rigidez é normalizada utilizando a relação de módulo dinâmico (DMR). Essa normalização busca retirar a variabilidade de amostra para amostra dos resultados dos ensaios. O DMR é obtido através da Equação 70.

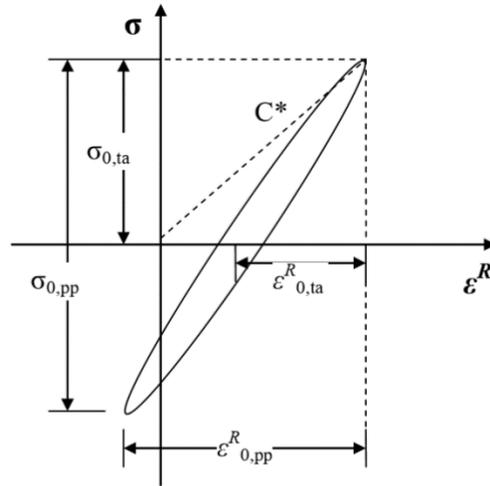
$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (70)$$

Na Equação 70, $|E^*|_{LVE}$ é o módulo dinâmico do material para uma temperatura e uma frequência particular do ensaio, obtido através da curva mestra de comportamento viscoelástico, que é obtida pelo ensaio de módulo complexo. Já a parcela $|E^*|_{fingerprint}$, é o módulo obtido pelo procedimento de *fingerprint*, que é realizado em cada amostra antes do ensaio cíclico de fadiga, em amplitudes muito pequenas de deformação, de modo que não se induza dano ao material antes do ensaio de fadiga. Conforme Nascimento (2015), os valores típicos de DMR estão na faixa entre 1,1 e 0,9, sugerindo que a variação de amostra para amostra se encontre no máximo em 10%.

Como último acréscimo do S-VECD, temos a nova formulação para o cálculo cíclico do parâmetro de evolução do dano (dS), representado novamente aqui pela Equação (64).

$$dS_{ciclo_i} = \left(-\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta N_i \times \xi_p \times K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (64)$$

Figura 2.34 - Esquema gráfico das variáveis em ensaio de controle do deslocamento do atuador



Fonte: Adaptado de Hou (2010)

Nesta nova equação, adiciona-se a formulação original do VECD, os parâmetros de variação de número de ciclos (ΔN_i); o tempo reduzido de pulso (ξ_p), e o fator de ajuste de carga (K_1). O tempo reduzido de pulso ξ_p é dado pela razão entre o tempo de pulso (t_p) e o coeficiente de translação (a_t): $\xi_p = t_p/a_t$. Já o coeficiente K_1 , que de acordo com Hou (2010), depende de toda a história de carregamento, é calculado pela seguinte equação:

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \left[\frac{1}{\beta + 1} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (\beta - \cos(2\pi f t))^{2\alpha} d\xi \right] \quad (71)$$

As constantes ξ_i e ξ_f são os tempos reduzidos de início e fim do intervalo de tração de cada ciclo, e são dadas pelas Equações 72 e 73.

$$\xi_i = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (72)$$

$$\xi_f = \frac{2\pi - \cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (73)$$

A norma AASHTO TP 107 (2014) apresenta os detalhes dos procedimentos de teste e o processo de cálculo, culminando com a caracterização da curva de dano para um material dado. A dedução completa das equações que compõem o S-VECD é um trabalho extremamente amplo, devendo o leitor reportar a uma sequência de trabalhos, dentre eles: Kim et al. (2003), Kutay et al. (2008), Kim et al. (2008), Underwood et al. (2009), Underwood et al. (2010), Hou (2010), e Underwood et al. (2012). Uma revisão abrangente do modelo pode ser encontrada em Nascimento (2015).

2.6.6 Critério de falha por fadiga do modelo S-VECD

Dissertam Sabouri e Kim (2014) que nos últimos anos, os modelos de fadiga com bases na teoria da viscoelasticidade e na mecânica de dano contínuo permitiram uma compreensão significativamente melhor de como o dano evolui em misturas asfálticas sob diferentes condições de carga e ambiente. Estes modelos aprimorados de previsão de dano por fadiga necessitam de um critério de falha de fadiga preciso e efetivo, que tenha sua base em propriedades fundamentais do material.

Conforme Zhang et al. (2013) e Sabouri e Kim (2014), os critérios de falha tradicionais (seção 2.4.3) apresentam alguns problemas conceituais. Como dissertam os autores, o critério de ângulo de fase, que leva em conta o comportamento viscoelástico do material parece definir bem a vida de fadiga, entretanto, o problema desta abordagem é que os modelos de dano contínuo como o VECD, não são capazes de prever a evolução do ângulo de fase, nem sua queda, ou seja, o critério é capaz de definir bem a falha, mas não é capaz de prever ela. O critério clássico, de queda de 50% da rigidez é segundo os autores extremamente empírico. Já a abordagem energética ainda não foi incorporada ao modelo, e a dissipação de energia nos *loops* de histerese não pode ser calculada, de maneira que um critério com essas bases não pode ser implementado.

Desta forma, visto que os critérios tradicionais são demasiadamente empíricos, ou não se adaptam ao S-VECD, surge a necessidade de um novo critério de falha que se adapte bem ao modelo e fosse capaz de prever a falha com grande precisão.

A partir dessa necessidade, Zhang et al. (2013) desenvolveram um novo cálculo de energia representando a taxa de dissipação de dano, que poderia ser aplicado no modelo S-VECD, sendo capaz de prever a falha de fadiga de maneira equivalente a queda do ângulo de fase em observações experimentais, com consistência e precisão. Os autores propuseram a abordagem G_O^R através da qual a energia foi avaliada em um sentido cumulativo, e baseia-se na

liberação da quantidade máxima de energia de pseudo-deformação armazenada ao longo do histórico de carregamento. A energia máxima de pseudo-deformação por ciclo é dada pela Equação 74.

$$(W_{max}^R)_i = \frac{1}{2}(\sigma_{max})_i(\varepsilon_{max}^R)_i = \frac{1}{2}(\sigma_{0,ta})_i(\varepsilon_{0,ta}^R)_i \quad (74)$$

onde:

$(W_{max}^R)_i$ = máxima energia de pseudo-deformação armazenada no ciclo i;

$(\sigma_{0,ta})_i$ = amplitude de tensão no ciclo i;

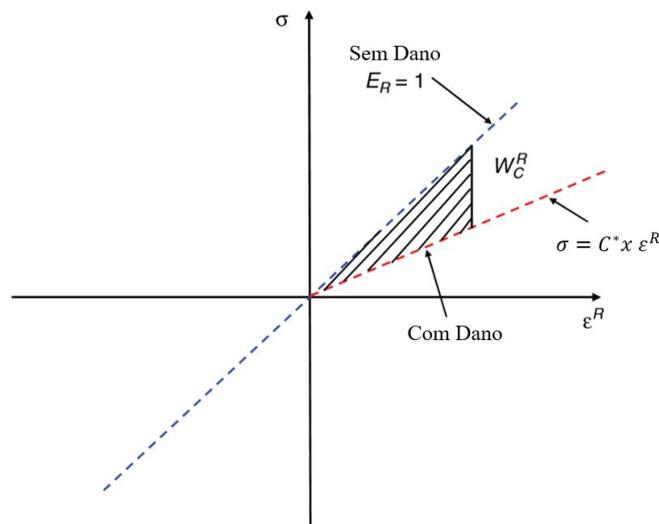
$(\varepsilon_{0,ta}^R)_i$ = pseudo-deformação de amplitude de tensão no ciclo i.

Por meio da relação entre a tensão e a pseudo-deformação conforme Equação 53, temos:

$$(W_{max}^R)_i = \frac{1}{2}(C^*)_i(\varepsilon_{0,ta}^R)_i^2 \quad (75)$$

A energia de pseudo-deformação máxima armazenada em cada ciclo reflete a capacidade do material para armazenar energia nesse momento específico. À medida que o dano se acumula, o material passa a perder a energia armazenada, como resultado da redução da pseudo-rigidez. A diferença entre a energia de pseudo-deformação máxima armazenada e o estado em que o material não é submetido ao dano (Figura 2.35), é referida como a energia de pseudo-deformação total liberada e é denotada como W_C^R .

Figura 2.35 - Representação gráfica da energia de pseudo-deformação liberada (W_C^R)

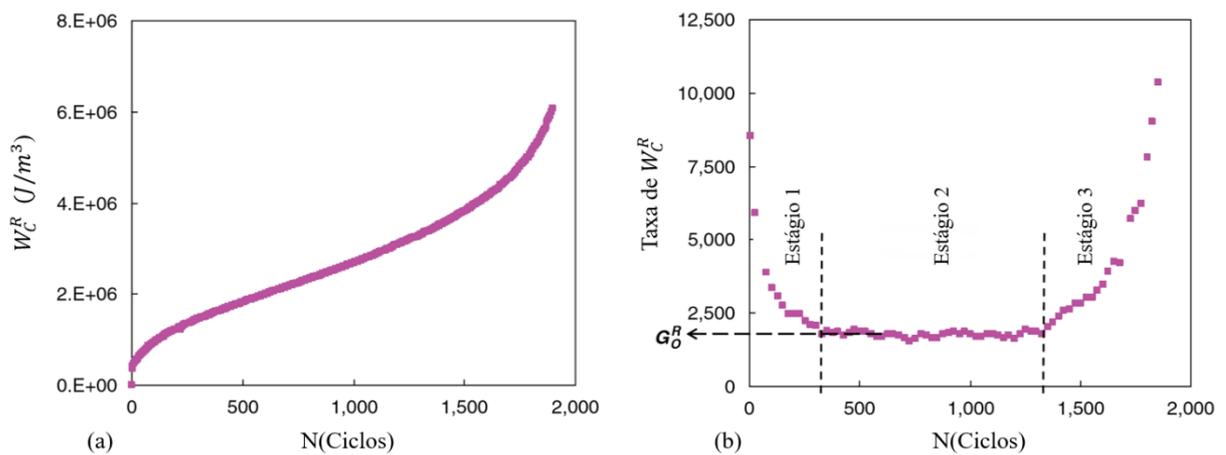


O índice W_C^R pode ser calculado analiticamente por meio da Equação 76:

$$(W_C^R)_i = \frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)_i^2 (1 - C_i^*) \quad (76)$$

Como podemos perceber pela Equação 76, W_C^R é afetado por dois fatores: a amplitude de pseudodeformação ($\varepsilon_{0,ta}^R$), e a redução da pseudo-rigidez (C^*), ou seja, é afetada pelo carregamento externo e pelas propriedades do material. A Figura 2.36 mostra a evolução e a taxa da energia de pseudodeformação dissipada, calculadas experimentalmente através do ensaio de tração-compressão em mistura asfáltica de interesse.

Figura 2.36 - Evolução (a) e taxa (b) da energia de pseudo deformação liberada (W_C^R)

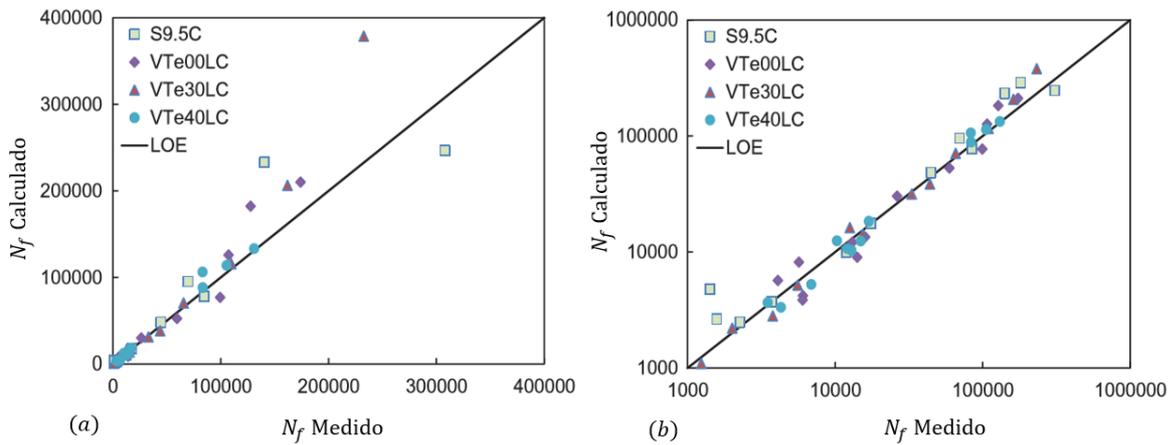


Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014)

Observam Zhang et al. (2013) que para todos os ensaios, a evolução da taxa de W_C^R pode ser dividida em três regiões. Inicialmente temos uma queda da taxa, como resposta aos comportamentos típicos dos ensaios cíclicos (seção 2.5.1), já quando a amostra está próxima a ruptura, a taxa de W_C^R cresce exponencialmente, sugerindo o início de propagação da macro trinca. Entre os estágios 1 e 3 da Figura 36, temos uma zona de taxa estável, onde a energia de pseudodeformação liberada por ciclo é constante, ficando este estágio caracterizado como a taxa estável de energia de pseudodeformação liberada (G_O^R). Os autores cruzaram então os dados de G_O^R com o número de ciclos de falha por fadiga (N_f) definidos através da queda do ângulo de fase e encontram resultados com uma correlação muito boa, para diferentes misturas testadas em diferentes temperaturas. A partir desta verificação, puderam os autores implementar o critério G_O^R no protocolo S-VECD e prever o ciclo de falha por fadiga (N_f), cruzando estes

resultados modelados com resultado experimentais conforme Figura 2.37, encontrando ótima correlação e validando o critério.

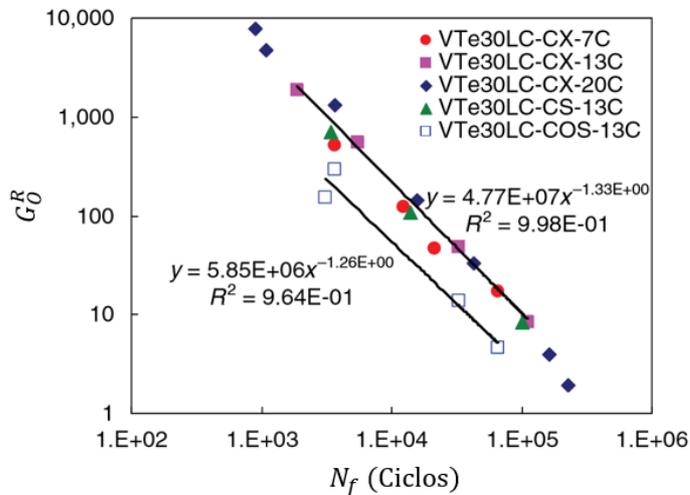
Figura 2.37 - Comparação entre N_f previsto pelo critério G_0^R e N_f experimental definido pela queda do ângulo de fase. (a) Escala aritmética; (b) Escala logarítmica



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2013)

Entretanto, Sabouri e Kim (2014), afirmam que o critério G_0^R é dependente do modo de carregamento utilizado durante o ensaio (Figura 2.38), visto que o modelo apresenta resultados que colapsam em uma mesma linha para ensaios de tensão controlada e deslocamento do atuador controlado, mas não para o ensaio de deformação controlada na amostra.

Figura 2.38 - G vs N_f para diferentes modos de carregamento



Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014)

Dessa forma, utilizando a mesma base teórica do G_O^R , Sabouri e Kim (2014) atualizaram o critério para diferentes modos de carregamento comentando que um critério de falha independente do tipo de carregamento é preferível para o uso de simulação visto os diferentes carregamentos impostos nos pavimentos.

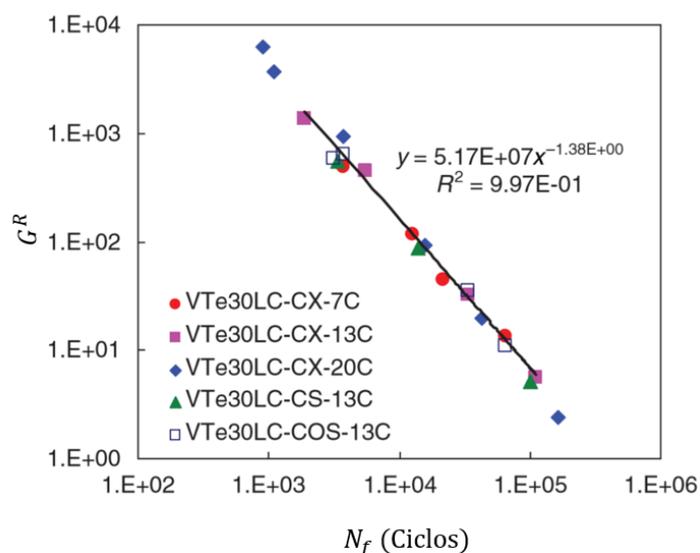
Para tal, os autores partiram do princípio que os diferentes modos de carregamento induzem diferentes modos de evolução da energia de pseudodeformação liberada, dessa forma para uma mesma análise de diferentes testes, toda a história de carregamento, e, portanto, de W_C^R , deveria ser levada em consideração.

Assim, Sabouri e Kim (2014) definem o novo critério G^R como sendo a taxa de mudança da média da energia de pseudodeformação liberada, por ciclo, através de toda a história de carregamento (Equação 77).

$$G^R = \frac{\overline{W_C^R}}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{N_f} \quad (77)$$

Conforme os autores, a partir dessa nova abordagem de análise, todos os modos de carregamento colapsam sobre a mesma linha (Figura 2.39), com um R^2 alto e uma ótima correlação.

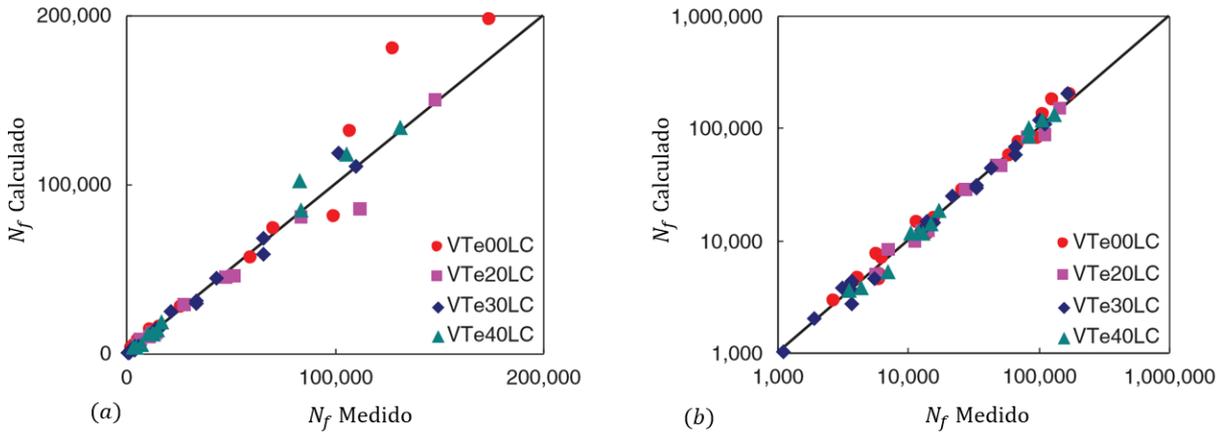
Figura 2.39 - G^R vs N_f para diferentes modos de carregamento



Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014)

Da mesma forma que Zhang et al. (2013), os autores implementaram o critério G^R no S-VECD compararam o N_f previsto com o N_f medido experimentalmente pelo ângulo de fase, apresentando os resultados na Figura 2.40.

Figura 2.40 - Comparação entre N_f previsto pelo critério G^R e N_f experimental definido pela queda do ângulo de fase. (a) Escala aritmética; (b) Escala logarítmica



Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014)

Tem-se assim, por meio do critério G^R e do modelo S-VECD um protocolo de previsão de falha por fadiga de elevada acurácia, que independe do modo de carregamento e de diferentes temperaturas, levando em conta apenas a história dos carregamentos aplicados e a pseudo-rigidez do material. O modelo final requer apenas os dados das propriedades viscoelásticas do material, oriundos do ensaio de módulo complexo, e do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão. Esse protocolo, após implementado, se torna muito efetivo, levando a uma caracterização completa da fadiga com poucas amostras ensaiadas.

3 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente capítulo, serão apresentados o planejamento da pesquisa, os materiais utilizados, bem como os métodos e procedimentos propostos e realizados durante o estudo.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Visto que o trincamento por fadiga é o principal tipo de defeito encontrado nos revestimentos asfálticos, é de interesse o entendimento do fenômeno e a verificação da resposta dos materiais que estão sendo empregados nas rodovias frente a este problema.

Desta forma, por meio do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão, implantado por Boeira (2018) no LMCC da Universidade Federal de Santa Maria, a pesquisa tem por objetivo caracterizar o comportamento a fadiga de vinte e quatro misturas asfálticas densas aplicadas em campo no Estado do Rio Grande do Sul.

Este estudo complementa a pesquisa de Faccin (2018) que caracterizou as mesmas vinte e quatro misturas quanto as características de rigidez, através do ensaio de módulo complexo e aplicação do modelo 2S2P1D; e a resistência a deformação permanente, por meio do ensaio uniaxial de carga repetida e do parâmetro *Flow Number* oriundo deste. O referido autor apresentou índices obtidos através do ensaio de resistência a tração por compressão diametral que neste trabalho passarão por processo de validação, a partir dos resultados e análise do ensaio de fadiga.

Faccin (2018) também fez a caracterização dos agregados, apresentando dados de índice de forma, lamelaridade, e resultados através do sistema AIMS 2 para a verificação da forma, angularidade e textura. O autor, por meio da extração de betume com o equipamento Rotarex apresentou os dados de granulometria e de teor de ligante. Faccin (2018) aplicou também os métodos Bailey e da faixa de agregados dominantes (FAD) buscando interpretar o intertravamento do esqueleto pétreo das misturas analisadas.

Estes dados serão apresentados neste trabalho de maneira resumida, buscando entender como influenciam o comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Para uma análise mais detalhada da rigidez, do dano por deformação permanente, dos agregados, e de como o autor obteve tais resultados sugere-se a leitura de Faccin (2018).

Assim, com as misturas já coletadas e armazenadas em laboratório, foi possível começar o processo de moldagem das mesmas. Foram moldados cinco corpos de prova para cada uma das misturas, totalizando 120 amostras para o ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-

compressão. Com os dados deste ensaio, aplicou-se o modelo S-VECD e também os demais protocolos de caracterização de vida de fadiga apresentados no referencial teórico deste estudo.

O modelo S-VECD, como visto anteriormente é capaz de gerar uma curva de integridade pelo dano induzido, trazendo à tona mais do que um parâmetro, mas sim uma propriedade do material. O modelo também leva a um critério de falha por fadiga baseado na pseudo-energia liberada durante a ciclagem de carga do ensaio.

Por meio do extenso levantamento de características das misturas, passando pelas propriedades dos agregados e ligantes, pelos parâmetros volumétricos, composições granulométricas, inferências do dano por deformação permanente, caracterização das propriedades viscoelásticas, e pela análise do fenômeno de fadiga e da curva característica de dano, o estudo gera um complexo banco de dados em torno de 24 misturas aplicadas em campo no estado do Rio Grande do Sul.

Fazendo uso de todas estas informações, esta pesquisa ranqueou as diferentes misturas quanto a resistência a fadiga, por meio do uso do software de análise mecanicista FlexPAVE 1.0 - *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distressed*, cedido pela *North Carolina State University*, centro de desenvolvimento do modelo S-VECD.

O programa FlexPAVE é uma ferramenta de análise de desempenho de pavimento que se baseia em uma estrutura eficiente desenvolvida para a análise estrutural levando em conta as propriedades viscoelásticas e de dano por fadiga das camadas asfálticas. O programa leva em conta as características climáticas e de tráfego, as propriedades viscoelásticas, as envoltórias de ruptura e a curva característica de dano C vs S. A análise através do software é fundamental para a avaliação das misturas, visto que apenas com os dados experimentais não é possível ranquear as misturas, devido ao fato de que em laboratório, através do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão, todas elas são levadas aos mesmos níveis de deformação, fenômeno que não ocorre em campo visto as diferentes rigidezes das misturas.

Com a obtenção final do panorama do fenômeno fadiga, foi possível correlacionar então o parâmetro de deformação permanente *flow number* obtido por Faccin (2018) com a resistência à fadiga avaliada neste trabalho. Por fim obteve-se então uma classificação das misturas em torno da resistência a fadiga, e uma classificação global, levando em conta a resistência a deformação permanente e a resistência a fadiga. Para ambas as classificações avaliou-se de forma estatística a influência das características das misturas, como o teor e tipo de ligante, os agregados, a granulometria, o comportamento viscoelástico e a rigidez, entre outras, buscando entender como cada uma dessas afeta o desempenho das misturas asfálticas.

Para que os objetivos propostos neste trabalho fossem alcançados, a pesquisa foi dividida em dez etapas, sendo elas:

- I) Coleta e armazenamento do material nas dependências do LMCC;
- II) Moldagem das amostras;
- III) Realização do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão;
- IV) Aplicação do modelo S-VECD;
- V) Análise clássica dos resultados por meio das curvas de Wöhler;
- VI) Análise da performance do pavimento por meio do software FlexPAVE 1.0;
- VII) Análise estatística dos resultados e fatores de influência das misturas na resistência a fadiga;
- VIII) Validação dos índices do ensaio RT obtidos por Faccin (2016);
- IX) Classificação das misturas quanto a resistência à fadiga;
- X) Classificação global das misturas quanto à deformação permanente e à resistência a fadiga.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais empregados nesta pesquisa são misturas asfálticas densas utilizadas em obras de restauração e implantação de rodovias no estado do Rio Grande do Sul, no período de março de 2016 até março de 2017.

Para o desenvolvimento do estudo, e então caracterizar o comportamento à fadiga dos concretos asfálticos em utilização no estado do Rio Grande do Sul, esta pesquisa avaliou vinte e quatro misturas asfálticas densas, distribuídas em cinco tipos de ligantes asfálticos, cindo faixas granulométricas (três para especificações do DAER e duas para especificações do DNIT), além de diferentes agregados minerais. As misturas asfálticas foram coletadas em quatorze usinas de produção de CA, em diferentes regiões do Rio Grande do Sul. A Tabela 3.1 apresenta um resumo das misturas utilizadas nesta pesquisa.

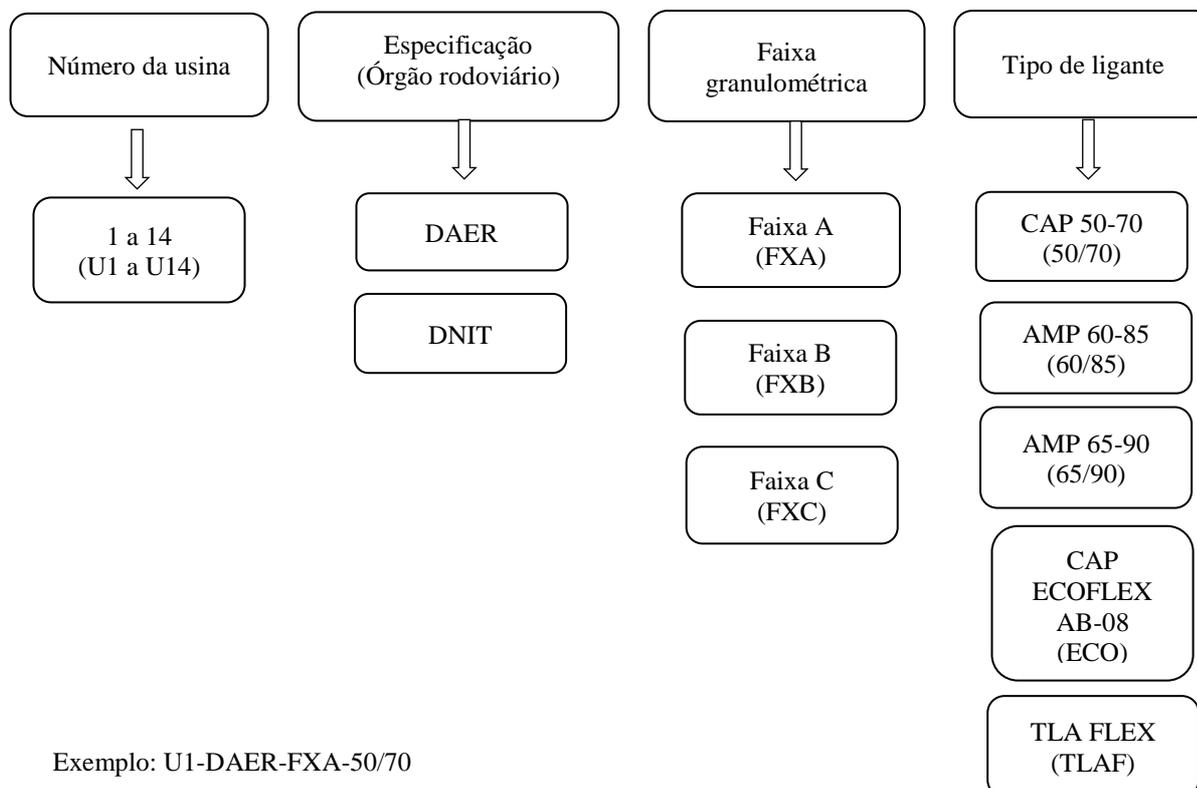
As coletas foram realizadas nas unidades de produção, em que se localizam as usinas de asfalto e instalações de britagem, ou diretamente no momento de execução dos trechos. Além disso, foram também obtidos os parâmetros dos projetos de dosagem das misturas, dados de tráfego das rodovias e características dos ligantes e agregados juntamente aos órgãos rodoviários, empreiteiras e supervisoras responsáveis pela produção e fiscalização dos respectivos concretos asfálticos.

Tabela 3.1 - Resumo dos materiais coletados

Misturas	Quantidade
Total de misturas coletadas	24
Quantidade de usinas asfálticas amostradas	14
Misturas com CAP 50/70	11
Misturas com AMP 60/85	8
Misturas com AMP 65/90	1
Misturas com CAP TLA FLEX	1
Misturas com asfalto borracha AB-08	3
Misturas faixa granulométrica A - DAER	2
Misturas faixa granulométrica B -DAER	4
Misturas faixa granulométrica C -DAER	1
Misturas faixa granulométrica B - DNIT	6
Misturas faixa granulométrica C - DNIT	11

Neste trabalho as misturas foram designadas conforme nomenclatura proposta na Figura 3.1, a fim de facilitar a análise dos dados no decorrer do trabalho, de acordo com a usina de produção, especificação do órgão rodoviário utilizado para elaboração do traço, tipo de faixa granulométrica e ligante asfáltico.

Figura 3.1 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas



3.2.1 Misturas asfálticas densas

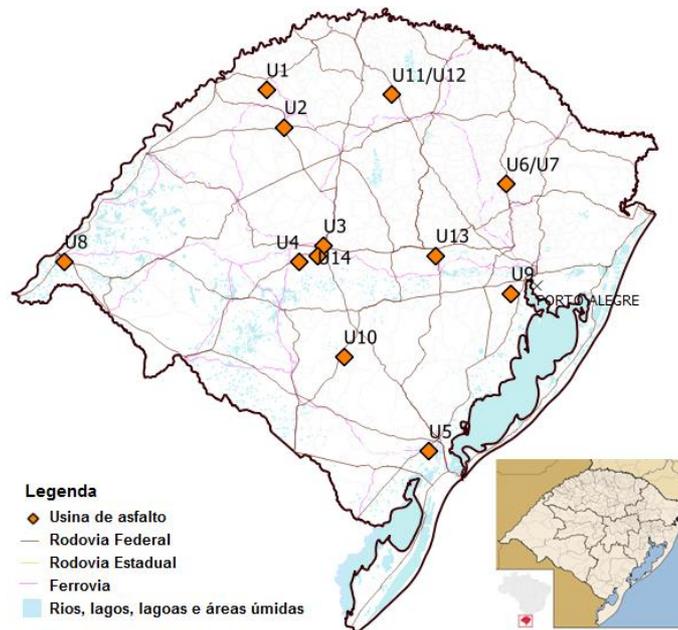
As misturas asfálticas densas, objeto de estudo neste trabalho, foram coletadas em diferentes regiões do RS, objetivando-se caracterizar e avaliar concretos asfálticos com agregados das principais formações geológicas do estado, diferentes faixas granulométricas do DAER e do DNIT, diferentes tipos de ligantes asfálticos, e diferentes usinas em operação, além de situações diversas de tráfego em que as rodovias se encontram submetidas.

Todas as misturas a serem estudadas foram dosadas pelo método Marshall, conforme informações das empresas executoras. A localização das usinas onde as amostras foram coletadas, o tipo de faixa granulométrica, ligante e a nomenclatura utilizada, no decorrer do trabalho, estão apresentados na Tabela 3.2 e Figura 3.2

Tabela 3.2 - Relação de coletas e nomenclaturas das misturas³

Usina de asfalto	Município de localização da usina	Faixa granulométrica	Tipo de ligante asfáltico	Nomenclatura utilizada
U1	Santa Rosa	FX A- DAER	50/70	U1-DAER-FXA-50/70
U2	Santo Ângelo	FX B- DAER	50/70	U2-DAER-FXB-50/70
		FX C- DNIT	AMP 60-85	U2-DNIT-FXC-60/85
		FX C- DNIT	AMP 65-90	U2-DNIT-FXC-65/90
U3	Itaara	FX B- DAER	ECOFLEX AB-8	U3-DAER-FXB-ECO
U4	Dilermando de Aguiar	FX C- DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXC-50/70
		FX B - DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXB-50/70
U5	Capão do Leão	FX B-DNIT	AMP 60-85	U5-DNIT-FXB-60/85
		FX B-DNIT	ECOFLEX AB-8	U5-DNIT-FXB-ECO
		FX B-DAER	ECOFLEX AB-8	U5-DAER-FXB-ECO
U6	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U6-DNIT-FXC-60/85
U7	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U7-DNIT-FXC-60/85
U8	Uruguaiana	FX B-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXB-50/70
		FX C-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXC-50/70
U9	Eldorado do Sul	FX C-DNIT	AMP 60-85	U9-DNIT-FXC-60/85
		FX C-DNIT	TLA FLEX	U9-DNIT-FXC-TLAF
U10	Caçapava do Sul	FX C-DNIT	CAP 50/70	U10-DNIT-FXC-50/70
U11	Sarandi	FX A-DAER	CAP 50/70	U11-DAER-FXA-50/70
U12	Sarandi	FX B-DAER	AMP 60/85	U12-DAER-FXB-60/85
		FX C-DAER	AMP 60-85	U12-DAER-FXC-60/85
U13	Santa Cruz do Sul	FX B-DNIT	CAP 50/70	U13-DNIT-FXB-50/70
U14	Santa Maria	FXC DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXC-50/70
		FXB DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXB-50/70
		FXC DNIT	AMP 60-85	U14-DNIT-FXC-60/85

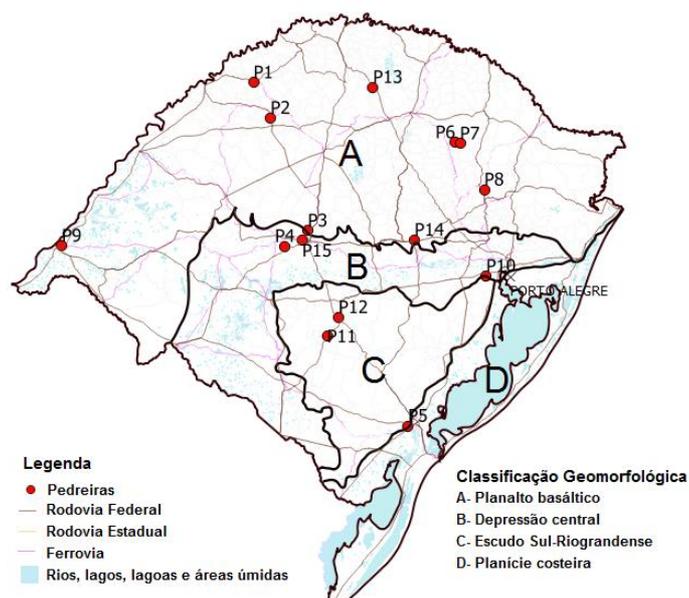
Figura 3.2 - Mapa localização das usinas amostradas



3.2.1.1 Agregados minerais

A localização de origem dos agregados minerais é apresentada na Figura 3.3. Observa-se que serão utilizados materiais de diferentes regiões, com objetivo de contemplar as formações geológicas do estado que possuem extração de agregados para pavimentação.

Figura 3.3 - Localização das pedreiras com coleta de material



De acordo com a Figura 3.3, algumas áreas de exploração de agregados encontram-se na depressão central. Essas áreas, provavelmente, referem-se a diques, que são fraturas preenchidas por rochas ígneas ou rochas sedimentares clásticas remobilizadas, ou morros testemunhos. Para as misturas U6-DNIT-FXC-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85, a empresa executora utilizou agregados de 3 britagens diferentes (P6/P7/P8) para a produção das mesmas. Mesma situação ocorre para a mistura U10-DNIT-FXC-50/70, que utiliza agregados de duas britagens diferentes (pó de pedra da P12 e os demais da P11). As composições de agregados das misturas coletadas, com os respectivos percentuais, são apresentadas na Tabela 3.3, juntamente com os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados para Absorção, Abrasão, Equivalente de Areia e Sanidade, conforme valores informados nos projetos de dosagem e ensaios realizados por Faccin (2018) no LMCC. A geologia das rochas para as respectivas pedreiras, com base na pesquisa de Boeira (2014) e análise visual para as demais, encontra-se na Tabela 3.4, juntamente com os resultados de morfologia dos agregados para cada fração. É possível perceber que, com exceção da Pedreira P15, que apresenta sanidade de 16,5 %, para todas as demais, os agregados atendem os limites das especificações vigentes no estado para produção de misturas asfálticas.

As composições granulométricas de cada misturas podem ser visualizadas no Apêndice I, em que se encontram as planilhas resumo de cada mistura juntamente com as porcentagens retidas e passantes em cada malha.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais

Pedreira	Mistura	Percentagem dos agregados por mistura							Absorção (%)	Abrasão (%)	Equivalente de areia (%)	Sanidade (%)
		Brita 1½"	Brita 1"	Brita ¾"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia	Cal				
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)				
P1	U1-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	27,0	73,0	0,0	0,0	1,0	23,1	61,4	3,0
P2	U2-DAER-FXB-50/70	0,0	0,0	20,0	16,0	59,0	5,0	0,0	1,4	16,0	56,9	3,2
	U2-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
	U2-DNIT-FXC-65/90	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
P3	U3-DAER-FXB-ECO	0,0	0,0	20,0	20,0	58,0	0,0	2,0	2,8	14,5	60,7	0,4
P4	U4-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	25,0	20,0	55,0	0,0	2,0	1,5	11,0	57,7	1,9
	U4-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	35,0	15,0	50,0	0,0	0,0	0,3			1,9
P5	U5-DNIT-FXB-60/85¹	0,0	0,0	40,0	15,0	44,0	0,0	1,0	0,5	26,4	71,0	5,4
	U5-DNIT-FXB-ECO¹	0,0	0,0	35,0	18,0	46,0	0,0	1,0	0,5			
	U5-DAER-FXB-ECO¹	0,0	0,0	20,0	25,0	54,0	0,0	1,0	0,5			
P6/P7/P8	U6-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9	11,8	62,5	3,7
	U7-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9			
P9	U8-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	31,0	10,0	57,0	0,0	2,0	2,6	12,5	61,7	4,7
	U8-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	12,0	62,0	0,0	2,0	2,6			
P10	U9-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0	19,8	63,0	4,8
	U9-DNIT-FXC-TLAF	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0			
P11/P12	U10-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	21,0	18,0	60,0	0,0	1,0	0,4	14,8	58,3	4,3
P13	U11-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	36,0	64,0	0,0	0,0	1,9	16,9	69,9	1,2
	U12-DAER-FXB-60/85	0,0	0,0	20,0	20,0	60,0	0,0	0,0	1,9			
	U12-DAER-FXC-60/85	0,0	6,0	21,0	10,0	59,0	0,0	0,0	1,5			
P14	U13-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	32,0	28,0	40,0	0,0	0,0	1,0	13,1	60,8	5,8
P15	U14-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0	13,7	63,0	16,5
	U14-DNIT-FXB-50/70	10,0	0,0	44,0	0,0	49,0	0,0	1,0	1,0			
	U14-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0			

Fonte: Faccin (2018)

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de morfologia dos agregados minerais

Pedreira	Mineralogia	Propriedades Morfológicas dos Agregados																							
		Índice de forma			Lamellaridade			Esfericidade				Angularidade do Miúdo			Angularidade do Graúdo				Textura				Forma 2D		
		1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)
P1	Basalto	-		0,79	-	-	25,90	-	-	0,71	0,70	2858,32	2741,14	-	-	-	2618,07	2890,27	-		679,72	724,27	7,64	7,72	-
P2	Basalto	-	0,77	0,55	-	25,80	50,80	-	-	0,55	0,58	3290,70	3408,00	-	-	3000,50	3133,70	3183,20	-	737,00	774,10	753,70	9,27	8,39	-
P3	Riodacito	-	0,94	0,78	-	9,20	27,40	-	0,75	0,80	-	3214,14	3200,44	-	-	2915,36	3081,58	-	-	349,39	369,26	-	7,80	8,00	-
P4	Basalto ¹	-	0,87	0,75	-	14,80	17,80	-	0,77	0,80	0,82	2765,35	3434,19	-	-	2762,40	2759,03	2634,29	-	506,51	624,88	704,88	7,38	8,49	-
P5	Granítica	-	0,84	0,70	-	20,70	37,00	-	0,64	0,64	0,66	3691,08	2971,48	-	-	3088,08	3286,51	3418,22	-	211,71	196,41	168,45	9,15	8,56	-
P6/P7/P8	Basalto ¹	-	0,81	0,78	-	20,80	19,20	-	0,67	0,72	-	2844,29	3065,07	-	-	2970,39	2973,40	-	-	561,62	465,37	-	7,83	8,66	-
P9	Basalto ¹	-	0,94	0,72	-	9,70	27,80	-	0,72	0,72	0,73	3011,00	3101,40	-	-	2619,62	2816,03	2745,10	-	527,88	567,00	521,91	8,59	7,99	-
P10	Granítica	-	0,87	0,81	-	18,30	28,70	-	0,64	0,65	0,69	3605,24	3016,53	-	-	3160,87	3219,58	3200,04	-	354,79	253,47	240,18	9,64	8,74	-
P11/P12	Rocha metamórfica	-	0,76	0,79	-	29,70	17,60	-	0,63	0,65	-	3278,34	2791,68	-	-	3265,86	2956,56	-	-	470,97	485,59	-	9,20	8,36	-
P13	Diabásio	0,80	0,92	0,82	23,40	8,20	12,50	0,66	0,73	0,76	0,68	3060,42	2764,61	2765,70	2837,62	2478,66	2592,01	3198,96	533,58	614,57	661,48	653,84	7,44	8,11	7,96
P14	Basalto ¹	-	0,83	0,71	-	24,50	29,50	-	0,65	*	-	*	*	-	-	2829,41	*	-	-	701,66	*	-	*	*	-
P15	Basalto ¹	0,70	0,73	0,66	28,90	26,25	32,60	-	0,70	0,73	0,69	3001,70	2696,17	-	-	2863,51	2735,66	3046,18	-	608,65	428,74	532,43	8,00	8,10	-

Fonte: Faccin (2018)

3.2.1.2 Ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos utilizados nas misturas são o CAP 50-70, o AMP 60-85, o AMP 65-90, o ECOFLEX AB-08 e o TLA FLEX. Algumas misturas utilizaram o aditivo surfactante Evotherm™, para produção de misturas asfálticas mornas, acrescido em função do peso do ligante. As informações a respeito deste e outras observações relevantes das misturas coletadas são apresentadas na Tabela 3.5.

Os resultados da caracterização dos ligantes foram obtidos dos laudos fornecidos pela distribuidora de material para a obra e disponibilizados pelas empreiteiras ou órgãos rodoviários, sendo apresentados na Tabela 3.6, Tabela 3.7, Tabela 3.8, Tabela 3.9 e Tabela 3.10, respectivamente. As especificações de qualidade dos materiais asfálticos foram atendidas segundo especificações em vigor - ANP (2005), ANP (2008) e ANP (2010).

Tabela 3.5 – Ligantes asfálticos utilizados nas misturas

Mistura	Tipo de Ligante	Observações
U1-DAER-FXA-50/70	CAP 50-70	
U2-DAER-FXB-50/70	CAP 50-70	
U2-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	
U2-DNIT-FXC-65/90	AMP 65-90	
U3-DAER-FXB-ECO	ECOFLEX AB-08	0,03 % dope
U4-DNIT-FXC-50/70	CAP 50-70	
U4-DNIT-FXB-50/70	CAP 50-70	
U5-DNIT-FXB-60/85	AMP 60-85	0,4% Evhoterm™
U5-DNIT-FXB-ECO	ECOFLEX AB-08	0,4% Evhoterm™
U5-DAER-FXB-ECO	ECOFLEX AB-08	0,4% Evhoterm™
U6-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U7-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U8-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	
U8-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	
U9-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	0,05 % dope
U9-DNIT-FXC-TLAF	TLA FLEX	0,04 % dope
U10-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	
U11-DAER-FXA-50/70	CAP 50/70	
U12-DAER-FXB-60/85	AMP 60-85	
U12-DAER-FXC-60/85	AMP 60-85	
U13-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	
U14-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	
U14-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	
U14-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	

Tabela 3.6 – Propriedades dos ligantes convencionais (CAP 50-70)

Misturas	Propriedades / Especificações						
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	50 a 70	46 min	274 min	112 min	57 a 285 min	235 min	
U1-DAER-FXA-50/70	55	50	348	174	65	>236	1,003
U2-DAER-FXB-50/70	60	49,4	335	169	64	>236	1,002
U4-DNIT-FXC-50/70	-	-	-	-	-	-	-
U4-DNIT-FXB-50/70	-	-	-	-	-	-	-
U8-DNIT-FXB-50/70	51	50,8	282	162	63	>236	1,000
U8-DNIT-FXC-50/70	57	48,2	335	162	66	>236	1,000
U10-DNIT-FXC-50/70	57	48,2	335	162	66	>236	1,000
U11-DAER-FXA-50/70	56	49,5	343	161	65	>236	1,000
U13-DNIT-FXB-50/70	57	48,2	355	162	66	>236	1,000
U14-DNIT-FXC-50/70	52	48,6	328	163	64	>236	1,001
U14-DNIT-FXB-50/70	58	49,4	295	152	60	>236	1,001

Tabela 3.7 – Propriedades dos cimentos asfálticos modificados (AMP 60-85)

Misturas	Propriedades / Especificações							
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	40 a 70	60 min	3.000,0 máx	2.000,0máx	1.000,0máx	85 mín	235 min	
U2-DNIT-FXC-60/85	56	68	991	466	168	86	>236	1,005
U5-DNIT-FXB-60/85	51	65,2	1850	739	199	86	>236	1,008
U6-DNIT-FXC-60/85	48	66	1395	705	384	87	>236	1,028
U7-DNIT-FXC-60/85	48	66	1395	705	384	87	>236	1,028
U9-DNIT-FXC-60/85	56,5	72	1115	471	170	86,5	>236	-
U12-DAER-FXB-60/85	52	72	1610	620	340	88,5	>240	1,01
U12-DAER-FXC-60/85	52	72	1610	620	340	88,5	>240	1,01
U14-DNIT-FXC-60/85	56	73	1252	581	208	86,5	>236	1,003

Tabela 3.8 – Propriedades do cimento asfáltico modificado (AMP 65-90)

Misturas	Propriedades / Especificações							
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	50 a 70	65 min	3.000,0 máx	2.000,0máx	1.000,0máx	90 mín	235 min	
U2-DNIT-FXC-65/90	50	87,5	1448	842	302	91	>236	1,006

Tabela 3.9 – Propriedades dos ligantes modificados por borracha (ECOFLEX AB-08)

Misturas	Propriedades / Especificações					
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 175 °C – spindle 3,20 rpm NBR 15529	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	30 a 70	50 min	800-2000	50 min	235 min	
U3-DAER-FXB-ECO	53	63	1850	70	>240	1,01
U5-DNIT-FXB-ECO	48	56,3	1318	68	279	1,019
U5-DAER-FXB-ECO	48	56,3	1318	68	279	1,019

Tabela 3.10 - Propriedades do cimento asfáltico modificado (TLA FLEX)

Misturas	Propriedades / Especificações							
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	20 a 40	60 min	1000 a 5000	500 a 2500	100 a 1600	60 mín	235 min	
U9-DNIT-FXC-TLA	29	70,6	1528	698	249	80	>236	1,094

Os parâmetros volumétricos e as características das misturas coletadas, conforme projetos de dosagem, estão apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Parâmetros volumétricos e características das misturas

Mistura	Teor (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	DMM ¹ ou DMT ²	Gmb	Estabilidade (Kg)	Fluência 1/100" (mm)	RT (MPa)
U1-DAER-FXA-50/70	5,03	4,00	16,70	76,00	2,640 ¹	2,535	1145	3,30	1,31
U2-DAER-FXB-50/70	5,10	4,00	17,20	76,10	2,678 ²	2,568	1385	3,11	-
U2-DNIT-FXC-60/85	5,15	4,00	18,00	76,00	2,669 ¹	2,590	1630	3,56	2,1
U2-DNIT-FXC-65/90	5,15	4,00	18,00	76,00	2,669 ¹	2,590	-	-	-
U3-DAER-FXB-ECO	6,76	4,10	18,60	78,30	2,393 ¹	2,215	1287	3,20	-
U4-DNIT-FXC-50/70	5,10	3,70	16,50	78,00	2,635 ¹	2,537	1027	2,92	-
U4-DNIT-FXB-50/70	4,70	3,49	15,10	78,00	2,670 ²	2,551	1230	2,10	1,19
U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	4,80	4,00	15,10	75,00	2,442 ¹	2,345	1190	3,30	-
U5-DNIT-FXB-ECO ¹	6,20	4,00	18,00	78,00	2,388 ²	2,293	710	2,79	-
U5-DAER-FXB-ECO ¹	6,02	4,00	17,30	76,70	2,389 ¹	2,293	1351	2,55	1,3
U6-DNIT-FXC-60/85	5,40	4,50	18,80	75,00	2,354 ¹	2,254	1750	3,56	2,15
U7-DNIT-FXC-60/85	5,40	4,50	18,80	75,00	2,354 ¹	2,254	1750	3,56	2,15
U8-DNIT-FXB-50/70	4,60	5,03	16,25	69,05	2,584 ²	2,454	1042	3,15	-
U8-DNIT-FXC-50/70	5,00	4,05	16,30	75,15	2,568 ²	2,464	1210	3,04	-
U9-DNIT-FXC-60/85	5,24	3,57	16,32	78,20	2,374 ¹	2,289	1292	2,96	-
U9-DNIT-FXC-TLAF	5,49	3,47	16,37	78,85	2,376 ¹	2,293	1542	2,99	-
U10-DNIT-FXC-50/70	4,84	3,71	15,81	76,16	2,590 ¹	2,491	1495	3,02	-
U11-DAER-FXA-50/70	5,55	4,00	17,00	76,00	2,674 ²	2,562	1390	3,30	1,68
U12-DAER-FXB-60/85	5,00	4,00	15,80	75,00	2,688 ²	2,580	1450	3,05	1,79
U12-DAER-FXC-60/85	5,15	4,00	17,20	77,00	2,692 ²	2,584	1765	3,30	1,60
U13-DNIT-FXB-50/70	4,83	4,80	16,20	71,02	2,602 ¹	2,485	1132,85	2,70	1,104
U14-DNIT-FXC-50/70	5,00	4,07	15,47	81,26	2,627 ²	2,520	1234,43	3,11	1,195
U14-DNIT-FXB-50/70	4,60	4,31	14,78	79,25	2,666 ²	2,551	1192,82	2,73	1,124
U14-DNIT-FXC-60/85	5,10	3,93	15,47	82,22	2,640 ²	2,552	1244,3	3,20	1,201

Como é possível observar, alguns projetos de dosagens não apresentavam os valores para determinados parâmetros e 12 projetos utilizam o DMT para dosagem. Tal fato ocorre devido os órgãos não exigirem o cálculo utilizando o DMM e de a maioria das empreiteiras não possuir o equipamento.

3.2.1.3 Módulo de Resiliência

Os valores de módulo de resiliência das misturas são apresentados na Tabela 3.12 abaixo.

Tabela 3.12 - Valores de Módulo de Resiliência a 25°

Mistura	Média VV (%)	MR @25°C (MPa)	DP @25°C (MPa)	CV @25°C (%)
U1-DAER-FXA-50/70	3,28	6675	318	4,77
U2-DAER-FXB-50/70	3,70	8210	401	4,88
U2-DNIT-FXC-60/85	3,56	9222	566	6,13
U2-DNIT-FXC-65/90	3,29	7262	317	4,37
U3-DAER-FXB-ECO	3,62	4966	249	5,01
U4-DNIT-FXC-50/70	3,20	7377	320	4,34
U4-DNIT-FXB-50/70	3,16	9826	650	6,62
U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	3,78	8054	297	3,69
U5-DNIT-FXB-ECO ¹	4,07	5431	300	5,52
U5-DAER-FXB-ECO ¹	4,07	4738	206	4,35
U6-DNIT-FXC-60/85	4,13	8576	538	6,28
U7-DNIT-FXC-60/85	3,78	10377	756	7,29
U8-DNIT-FXB-50/70	4,14	10399	478	4,60
U8-DNIT-FXC-50/70	5,45	9707	536	5,52
U9-DNIT-FXC-60/85	3,88	7406	423	5,71
U9-DNIT-FXC-TLAF	4,54	9590	387	4,04
U10-DNIT-FXC-50/70	3,09	8297	489	5,90
U11-DAER-FXA-50/70	4,40	8277	386	4,67
U12-DAER-FXB-60/85	3,63	8390	453	5,40
U12-DAER-FXC-60/85	4,14	7890	323	4,09
U13-DNIT-FXB-50/70	3,66	7410	364	4,91
U14-DNIT-FXC-50/70	4,34	8576	516	6,02
U14-DNIT-FXB-50/70	4,34	10076	560	5,55
U14-DNIT-FXC-60/85	4,48	11520	633	5,49

Fonte: Faccin (2018)

Conforme disserta Faccin (2018), as misturas que apresentaram os menores valores de MR são as com ligante do tipo asfalto borracha. Para as demais, não é possível definir uma tendência em função do tipo de ligante ou características dos agregados. No entanto, considerando os resultados para as misturas produzidas na mesma usina de asfalto, com agregados da mesma britagem e mesmo tipo de ligante, percebe-se um pequeno aumento da rigidez à medida que se utilizam faixas granulométricas com maior percentual de agregados graúdos. Também, para misturas da mesma usina e tipo de agregado, as misturas com ligante

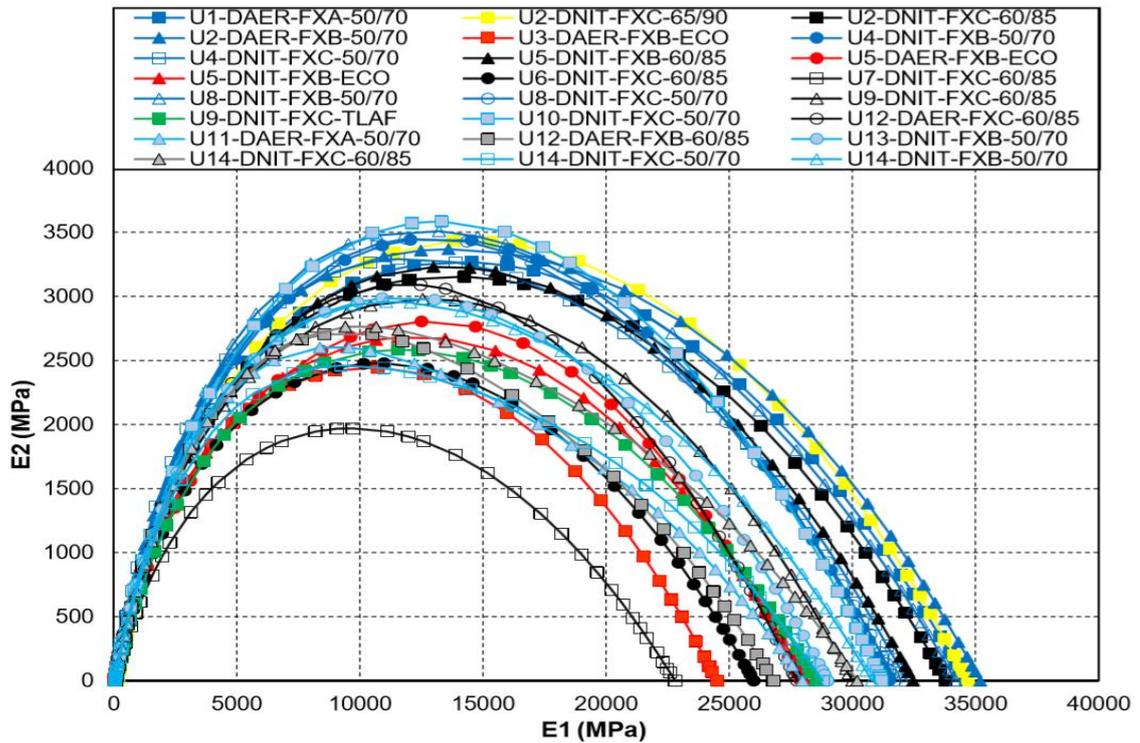
tipo AMP-60/85 apresentam maiores valores de MR quando comparadas às misturas com CAP 50/70.

3.2.1.4 Caracterização linear viscoelástica

O ensaio para a determinação do Módulo Complexo (E^*) foi conduzido por Faccin (2018) e seguiu as prescrições da AASHTO T 342 – Determining Dynamic Modulus of Hotmix Asphalt Concrete Mixtures, onde são utilizadas amostras com as seguintes dimensões de tamanho do corpo de prova: diâmetro entre 100 e 104 mm, altura entre 147,5 e 152,5 mm e tamanho máximo nominal de 37,5 mm, moldados no compactador giratório, ensaiados e condicionados na prensa hidráulica UTM-25. O Módulo Complexo foi determinado após aplicação de carga nas frequências de 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz, e nas temperaturas de -10°C , 4°C , 21°C , 37°C e 54°C , conforme recomendação da referida norma. Para a análise dos dados de caracterização do comportamento linear viscoelástico apresentados a seguir, tomou-se como base a análise de resultados realizada por Faccin (2018). Segue abaixo a caracterização do comportamento viscoelástico linear pela análise do espaço Cole-Cole (Figura 3.4), do diagrama black (Figura 3.5), da curva mestras de módulo dinâmico (Figura 3.6) e da curva mestra de ângulo de fase (Figura 3.7).

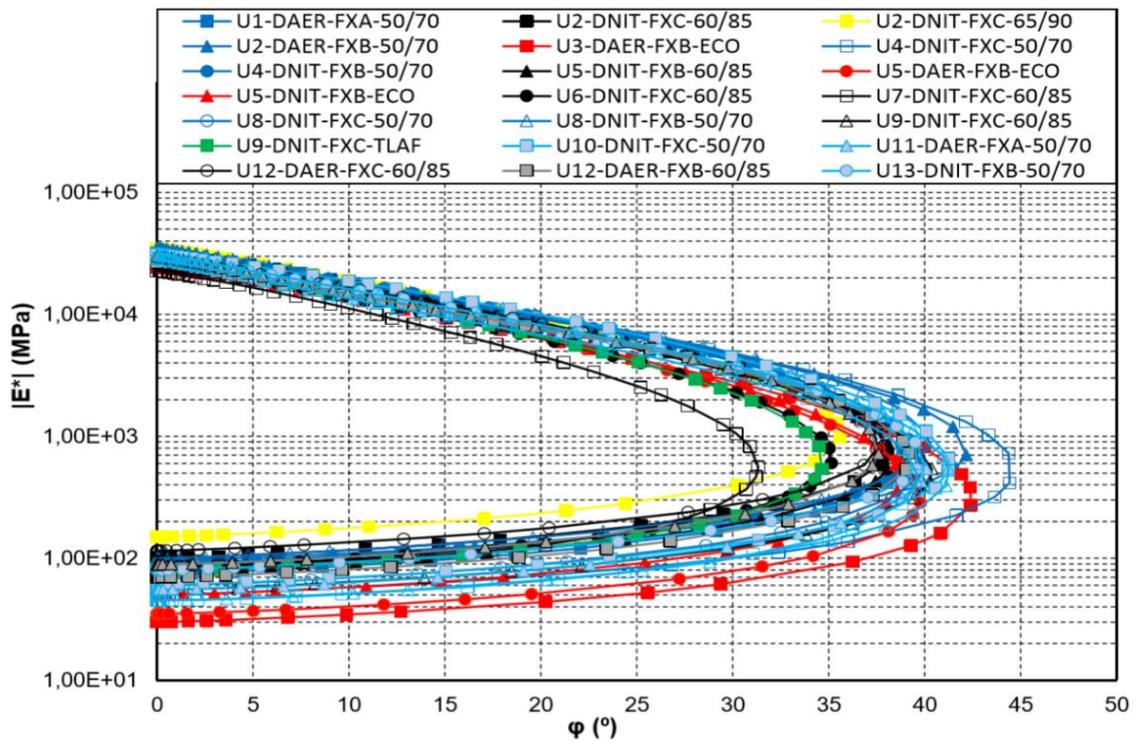
Ao analisar o plano Cole-Cole, destaca-se o valor mais baixo de E_2 e E_1 da mistura U7-DNIT-FXC-60/85, indicando uma menor tendência viscosa da mistura em relação às demais (há relativamente menos energia dissipada sob carga), inferindo-se que a mesma apresenta maior capacidade de atenuação dos esforços e retorno às condições iniciais. As misturas com ligante AMP 60/85 e 65/90 demonstram elevadas diferenças de E_2 . Já as misturas com asfalto borracha apresentaram valores baixos de E_2 e comportamento semelhante entre elas, parecidos com a mistura com asfalto tipo TLA Flex. Os maiores valores de E_2 foram encontrados para as misturas com CAP 50/70, coerente com as pesquisas de Bruxel (2015) e Almeida Junior (2016).

Figura 3.4 - Espaço Cole-Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Faccin (2018)

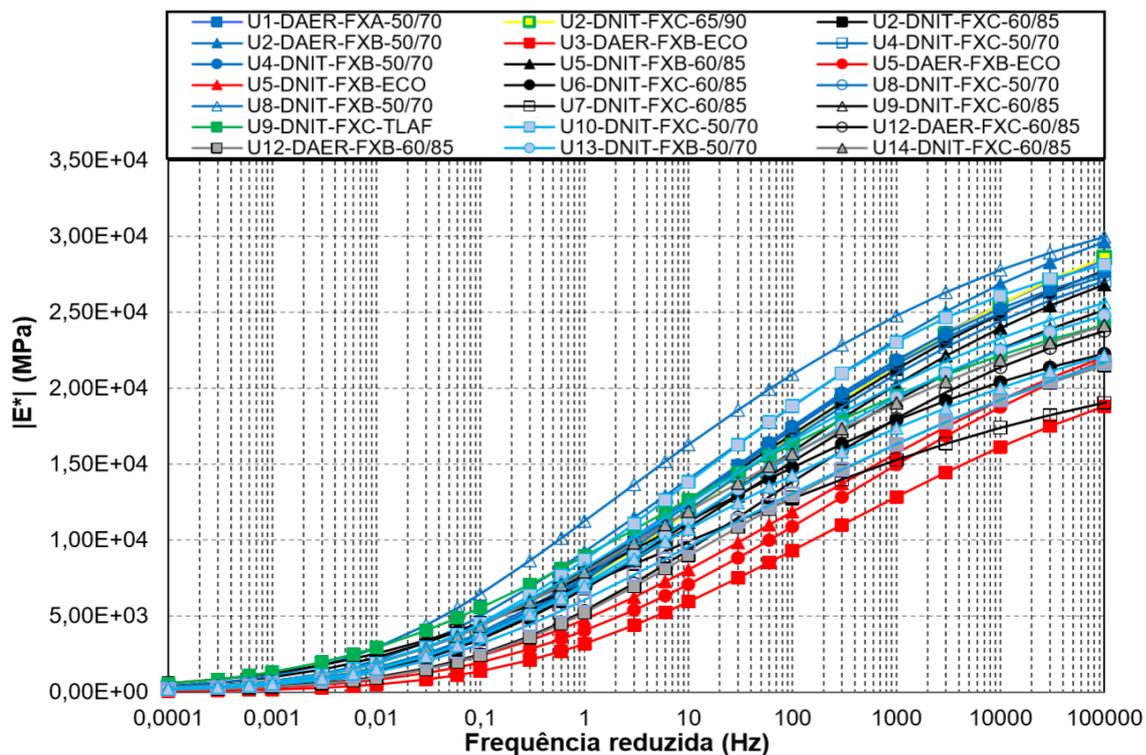
Figura 3.5 - Diagrama de Black para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Faccin (2018)

As curvas do Diagrama Black indicam que as misturas com CAP 50/70 apresentam, em geral, maiores ângulos de fase em relação às misturas com asfaltos modificados, indicando que no comportamento dessas misturas a parcela viscosa é mais atuante que a elástica. Os menores ângulos de fase para as misturas com asfalto modificado, exceção às com asfalto borracha, demonstram que a adição de polímeros aumenta a parcela elástica da mistura. Os resultados do Diagrama Black para as misturas com asfalto do tipo asfalto borracha não são coerentes com os resultados do Espaço Cole-Cole. No Cole-Cole as mesmas apresentam baixos valores de E_2 , indicando menor comportamento viscoso, já no Diagrama Black, as mesmas apresentam valores de ϕ semelhantes com as misturas com CAP 50/70, indicando que a parcela viscosa é mais atuante.

Figura 3.6 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico

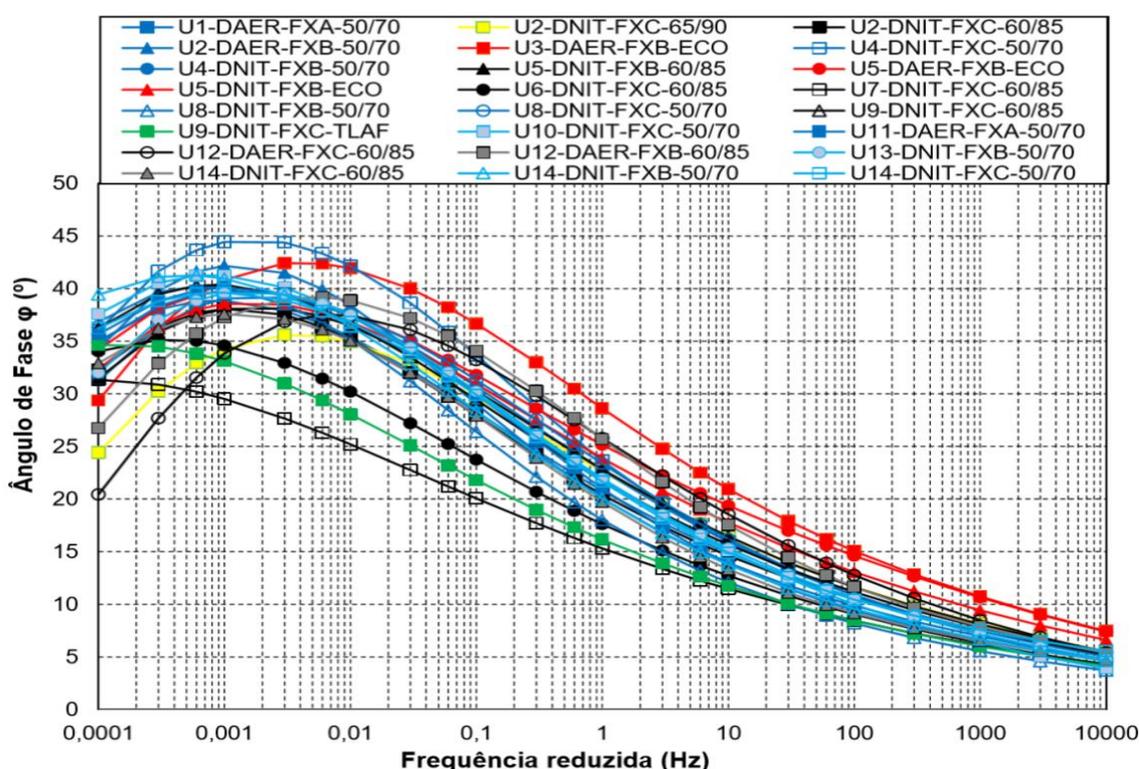


Fonte: Faccin 2018

Considerando as curvas mestras de módulo dinâmico, verifica-se visivelmente que as misturas com asfalto borracha são as que apresentam os menores valores de rigidez ao longo de todo o intervalo de frequência reduzida. Destaca-se entre as misturas mais rígidas aquelas com ligante convencional CAP 50/70, e as misturas com ligante modificado por polímero com um comportamento ao centro das demais. A mistura U7-DNIT-FXC-60/85 apresenta um comportamento distinto, sendo uma das mais rígidas nas baixas frequências e exibindo uma

grande perda de módulo para as frequências mais altas, se assemelhando as misturas com asfalto borracha.

Figura 3.7 - Curvas mestras de Ângulo de Fase



Fonte: Faccin (2018)

Faccin (2018) ao analisar as curvas mestras do ângulo de fase obtidos na modelagem 2S2P1D, observou que a maioria das misturas com os maiores valores de ângulos de fase são as com ligante 50-70, o que representa uma menor elasticidade, já os menores valores são identificados para as misturas com ligante modificado.

Pode-se notar diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante. Destaca-se a reologia da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF, composta por um ligante modificado por TLA e polímero, na qual o Ângulo de Fase, ao atingir o valor máximo, não mostra a mesma tendência das demais misturas, diminuindo muito pouco nas altas temperaturas, indicando que a mesma sofre menor variação de viscosidade nas altas temperaturas. Também, destacam-se os resultados das misturas com asfalto borracha, que apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, menor rigidez.

As misturas com asfalto borracha apresentam comportamento semelhante entre elas, sendo, de maneira geral, menos suscetíveis que as demais. Esse comportamento é confirmado por Zanzotto e Svec (1996) apud Morilha Jr. e Greca (2003), onde os autores afirmam que o

asfalto borracha apresenta como vantagem uma redução da suscetibilidade térmica quando comparado com pavimentos construídos com ligante convencional

De forma a representar o comportamento viscoelásticos linear, apresenta-se na Tabela 3.13 as sete constantes do modelo 2S2P1D e os coeficiente de translação tempo-temperatura C1 e C2 obtidos para WLF. Através destes coeficientes é possível modelar todas as curvas do protocolo de análise da caracterização de rigidez das misturas.

Tabela 3.13 - Coeficientes do modelo 2S2P1D

Mistura	E*							WLF	
	E00 (MPa)	E0 (MPa)	K	h	δ	τE (s)	β	C1	C2 (°C)
U1-DAER-FXA-50/70	75	34600	0,21	0,55	2,6	0,13	10000	21,85	161,96
U2-DAER-FXB-50/70	95	35200	0,215	0,61	2,7	0,22	10000	19,54	152,17
U2-DNIT-FXC-60/85	100	33800	0,21	0,56	2,7	0,15	2000	19,66	151,17
U2-DNIT-FXC-65/90	150	34700	0,221	0,55	2,6	0,08	5000	19,74	151,94
U3-DAER-FXB-ECO	30	24500	0,228	0,58	2,9	0,02	10000	19,52	152,04
U4-DNIT-FXC-50/70	50	32200	0,22	0,605	2,4	0,095	20000	19,54	152,17
U4-DNIT-FXB-50/70	90	31500	0,24	0,575	2,45	0,13	6000	21,61	152,07
U5-DNIT-FXB-60/85	79	32470	0,22	0,55	2,55	0,08	5000	19,53	152,07
U5-DNIT-FXB-ECO	50	28100	0,22	0,55	3	0,05	5000	19,54	152,17
U5-DAER-FXB-ECO	35	27900	0,238	0,565	3,6	0,045	20000	19,75	152,03
U6-DNIT-FXC-60/85	85	26000	0,21	0,52	2,5	0,33	6000	20,68	151,96
U7-DNIT-FXC-60/85	85	22800	0,192	0,468	2,55	0,6	10000	15,29	119,7
U8-DNIT-FXB-50/70	100	34200	0,21	0,57	2,1	0,35	1500	19,75	152,04
U8-DNIT-FXC-50/70	60	31750	0,225	0,545	2,05	0,08	20000	20,66	151,83
U9-DNIT-FXC-60/85	55	30000	0,225	0,57	2,8	0,13	1500	24,66	174,54
U9-DNIT-FXC-TLAF	55	27980	0,175	0,535	1,9	0,08	550	24,78	180,88
U10-DNIT-FXC-50/70	60	31200	0,25	0,58	2,4	0,21	20000	22,67	171,57
U11-DAER-FXA-50/70	55	27980	0,175	0,535	1,9	0,08	700	19,05	141,51
U12-DAER-FXB-60/85	70	26800	0,195	0,54	1,85	0,03	3500	15,70	119,61
U12-DAER-FXC-60/85	115	27750	0,245	0,575	2,475	0,055	6000	19,47	151,71
U13-DNIT-FXB-50/70	80	29000	0,225	0,575	2,45	0,13	6000	20,64	151,7
U14-DNIT-FXC-50/70	45	28800	0,175	0,525	2,21	0,055	3500	15,70	119,61
U14-DNIT-FXB-50/70	45	30800	0,2	0,55	2,21	0,15	4500	18,31	134,37
U14-DNIT-FXC-60/85	89	30200	0,177	0,524	1,95	0,1	750	16,91	116,01

Fonte: Faccin (2018)

São exibidos os valores de módulo dinâmico e ângulo de fase de cada uma das misturas a 21°C e 10 Hz, temperatura e frequência ensaiadas por Faccin (2018), e muito próximas das utilizadas para o ensaio de fadiga desta dissertação, no Apêndice II deste trabalho.

3.2.1.5 Caracterização da resistência à deformação permanente

A avaliação da resistência a deformação permanente das misturas foi realizada por meio do ensaio uniaxial de carga repetida. Este ensaio apresenta parâmetros interessantes no que diz respeito o estudo de deformações permanentes, entretanto, entre todas as análises que podem ser feitas através da curva de deformação plástica vertical uniaxial, Witczak et. al. (2002) cita que o Flow Number é o parâmetro oriundo deste ensaio que melhor se relaciona com a deformação permanente, apresentando boas correlações entre valores ensaiados e valores obtidos em pistas testes.

Os valores de Flow Number para as 24 misturas estudadas, contemplando a média, o desvio padrão e os coeficientes A, B, C e D do modelo de Francken são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Flow Number, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros.

Mistura	Vv Médio (%)	Média FN (Ciclo)	DP	CV (%)	Parâmetros Modelo Francken			
					A	B	C	D
U1-DAER-FXA-50/70	7,24	132	5,6	4,2	824,78	0,64	192,35	0,0145
U2-DAER-FXB-50/70	7,45	262	18,9	7,2	1273,03	0,45	1880,45	0,0057
U2-DNIT-FXC-60/85	6,55	10000	-	-	-	-	-	-
U2-DNIT-FXC-65/90	6,75	1033	62,9	6,1	1016,22	0,44	642,17	0,0015
U3-DAER-FXB-ECO	7,37	141	17,2	12,2	1476,22	0,53	231,02	0,0122
U4-DNIT-FXC-50/70	6,66	284	42,9	15,1	867,3	0,53	712,85	0,0046
U4-DNIT-FXB-50/70	6,54	564	43,4	7,7	602,01	0,53	465,67	0,0027
U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	6,69	175	12	6,9	676,86	0,62	65,49	0,0135
U5-DNIT-FXB-ECO ¹	7,39	37	5	13,7	1234,61	0,75	77,64	0,0613
U5-DAER-FXB-ECO ¹	6,69	61	7	11,5	1004,58	0,92	19647,2	0,0119
U6-DNIT-FXC-60/85	7,13	10000	-	-	-	-	-	-
U7-DNIT-FXC-60/85	7,18	10000	-	-	-	-	-	-
U8-DNIT-FXB-50/70	6,9	779	61	7,8	381,21	0,55	69,12	0,003
U8-DNIT-FXC-50/70	7,15	359	21,9	6,1	929,64	0,51	552,82	0,0044
U9-DNIT-FXC-60/85	7,45	647	98,3	15,2	715,46	0,5	193,8	0,0029
U9-DNIT-FXC-TLAF	7,1	2001	246,8	12,3	233,4	0,56	42,05	0,0014
U10-DNIT-FXC-50/70	6,38	485	20,5	4,2	1154,42	0,47	3913,23	0,0016
U11-DAER-FXA-50/70	7,16	226	36,7	16,2	512,92	0,63	115,84	0,0101
U12-DAER-FXB-60/85	6,7	923	149,7	16,2	481,39	0,54	36,57	0,0033
U12-DAER-FXC-60/85	6,88	986	77,8	7,9	415,58	0,57	16,3	0,0015
U13-DNIT-FXB-50/70	6,87	336	40,3	12	998,94	0,48	1350,3	0,0031
U14-DNIT-FXC-50/70	7,56	822	110,5	13,5	753,35	0,49	625,74	0,0023
U14-DNIT-FXB-50/70	6,94	549	50,1	9,1	698,47	0,52	334,99	0,0031
U14-DNIT-FXC-60/85	6,91	10000	-	-	-	-	-	-

Conforme Faccin (2018) percebe-se a elevada variação do parâmetro FN para as misturas em utilização no estado do RS, com resultados de 37 ciclos até 10000, sem atingir FN.

Considerando o FN como indicador de desempenho à deformação permanente, os resultados deste trabalho demonstram a elevada dependência do parâmetro com o tipo de ligante. No geral, as misturas com asfalto modificado apresentam maiores valores de FN, o que indica que terão melhores desempenhos em campo em comparação com as misturas com asfalto convencional, com exceção das misturas com asfalto borracha e misturas mornas que o autor aborda de forma mais pontual em seu trabalho. O autor também relata que não é possível definir uma tendência de influência nos resultados do parâmetro em função dos diferentes tipos de faixas granulométricas, entretanto é possível verificar uma queda de desempenho para misturas com agregado granítico.

Segundo o limite proposto por Nascimento (2008), apenas 4 misturas dentre as 11 analisadas com CAP 50/70 e nenhuma com asfalto borracha seriam recomendadas para utilização em rodovias com tráfego médio. Considerando o limite proposto pelo autor, para tráfegos pesados, dentre as misturas possíveis de utilização, apenas 10 misturas poderiam ser utilizadas, sendo duas com CAP 50/70, seis com AMP 60/85, uma com AMP 65/90 e uma com asfalto tipo TLA Flex. Para uma análise detalhada da resistência a deformação permanente reportar ao trabalho de Faccin (2018).

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este tópico é destinado a apresentar todos os procedimentos realizados durante a pesquisa, seja a nível de campo, de experimentação laboratorial, e de tratamento de dados. Apresentar-se-á a linha estrutural que dá corpo ao trabalho, sendo colocadas de maneira ordenada as etapas que foram sendo cumpridas.

3.3.1 Coleta das misturas

As coletas das misturas asfálticas deste estudo foram realizadas nos caminhões, conforme preconiza a norma DNER – PRO 013/94, e armazenadas em bandejas de alumínio, a fim de facilitar o manuseio em laboratório. Foi necessário um cuidado especial na coleta, principalmente nas misturas com agregados de maior tamanho nominal, para evitar a segregação do agregado graúdo.

Desse modo, as misturas foram coletadas com auxílio de pá e concha, a 30 cm abaixo da superfície e no centro de cada uma das seis áreas limitadas pela mediana, traçada no sentido do comprimento da caçamba, e pelas linhas transversais que dividem o comprimento desse veículo em três partes, conforme recomenda a norma.

3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

As misturas coletadas foram levadas à estufa para aquecimento até atingirem a temperatura de compactação indicada nos projetos de dosagem para moldagem dos corpos de prova (Tabela 3.15). Foi admitida uma tolerância de +/- 3 C° na temperatura de compactação, conforme especifica a norma NBR 15897- Misturas asfálticas a quente – Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave. Devido à essas misturas já terem passado pelo processo de envelhecimento, na usinagem, não é necessário fazer essa simulação em laboratório.

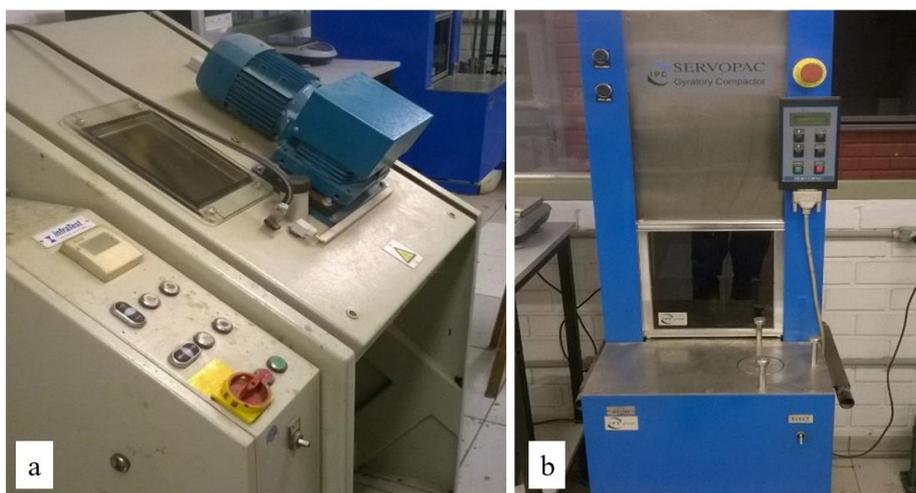
Tabela 3.15 - Temperaturas de compactação das amostras

Composição granulométrica	Temperatura de compactação indicada projeto dosagem (c°)	Temperatura de moldagem adotada (c°)
U1-DAER-FXA-50/70	133 a 139	135
U2-DAER-FXB-50/70	134,5	134
U2-DNIT-FXC-60/85	143 a 149	145
U2-DNIT-FXC-65/90	143 a 149	145
U3-DAER-FXB-ECO	155	155
U4-DNIT-FXC-50/70	137 a 143	140
U4-DNIT-FXB-50/70	140	140
U5-DNIT-FXB-60/85	165	165
U5-DNIT-FXB-ECO	175	170
U5-DAER-FXB-ECO	Mín 150	170
U6-DNIT-FXC-60/85	150,6 a 173,9	160
U7-DNIT-FXC-60/85	150,6 a 173,9	160
U8-DNIT-FXB-50/70	139,95	140
U8-DNIT-FXC-50/70	139,95	140
U9-DNIT-FXC-60/85	160	160
U9-DNIT-FXC-TLAF	164 a 170	165
U10-DNIT-FXC-50/70	140	140
U11-DAER-FXA-50/70	140	140
U12-DAER-FXB-60/85	144	144
U12-DAER-FXC-60/85	144	144
U13-DNIT-FXB-50/70	140	140
U14-DNIT-FXC-50/70	141,5 a 146,4	142
U14-DNIT-FXB-50/70	141,5 a 146,4	142
U14-DNIT-FXC-60/85	146 a 152	150

A mistura já aquecida na temperatura de compactação, é então levada para o processo de remistura, no qual é utilizado o misturador da marca *Infratest testing system* modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version* (Figura 3.8-a), para obter uma mistura mais homogênea, evitando segregação e mantendo a sua temperatura uniforme durante as moldagens.

Após isso, os corpos de prova são moldados no equipamento *IPC - SERVOPAC Gyrotory Compactor*, de maneira que as amostras apresentem 100 mm de diâmetro por 160 mm de altura. A compactação no CGS, durante todo o processo de moldagem das amostras, foi executada com pressão aplicada de 0,60 MPa, ângulo de rotação externo de $1,25^\circ$ e velocidade constante de 30 rpm. A Figura 3.8-b mostra o compactador utilizado.

Figura 3.8 - Misturador (a) e compactador (b) utilizados na moldagem das amostras



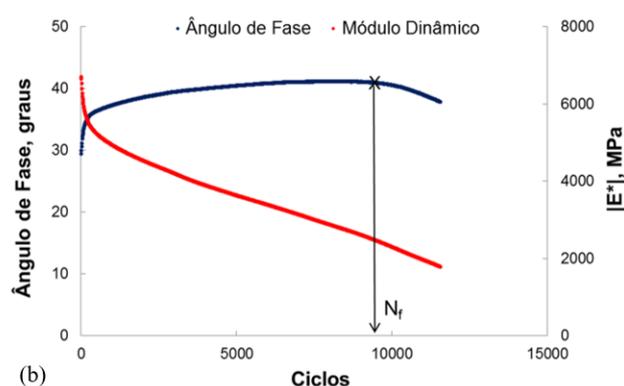
A quantidade de massa foi fixada em função da densidade da mistura, com o número de giros variando de forma a obter o volume de vazios e a altura necessária para atender os requisitos dos ensaios. Os corpos de prova foram moldados com 160 mm de altura visando o posterior faceamento, a fim de se obter um melhor paralelismo das faces, proporcionando uma melhor distribuição das tensões na execução dos ensaios.

3.3.3 Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga por tração-compressão segue as prescrições da norma AASHTO TP 107-14 - *Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*, e consiste em aplicar no

corpo de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que ocorra a ruptura ou a defasagem do ângulo de fase (Figura 3.9). Na realização do ensaio são coletados e monitorados o deslocamento do atuador, a deformação, a carga, as temperaturas de núcleo e superfície, o ângulo de fase e o módulo dinâmico da amostra ensaiada.

Figura 3.9 - Evolução do ângulo de fase e do módulo dinâmico em ensaio de fadiga à tração-compressão.



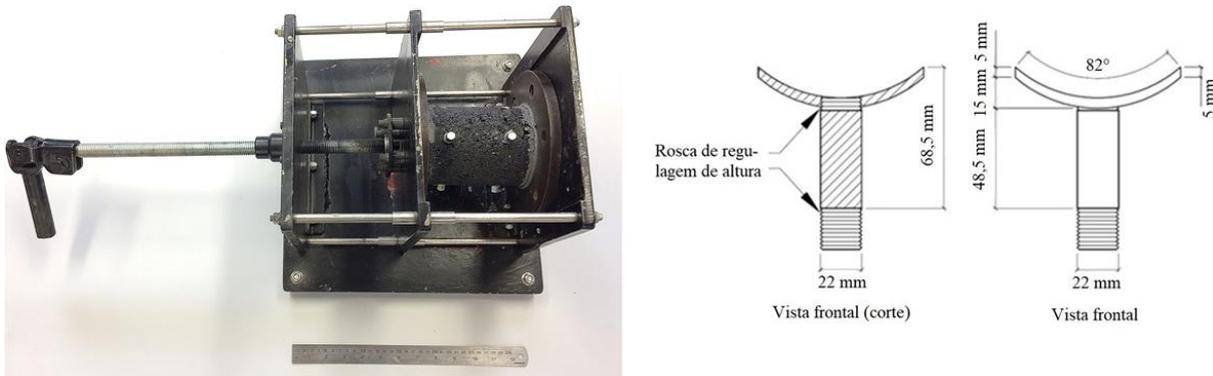
Fonte: Nascimento (2014)

Para a realização do ensaio, as amostras foram moldadas no compactador giratório Superpave (CGS) com dimensões de 10 x 16cm e um volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$. Após o processo de moldagem, prossegue-se com o corte e a retificação das superfícies, ficando a amostras com as dimensões finais de 10 x 13cm.

Após as amostras serem retificadas, são coladas as placas *top* e *down*. O processo de colagem demanda o tempo 20 horas, sendo utilizada a cola epóxi *techbond TIX quartzolit*[®] de baixa plasticidade e alta resistência. Para a colagem, é utilizado um gabarito, como o exemplo demonstrado na Figura 3.10 para que se obtenha um alinhamento preciso entre os eixos das placas e a amostra.

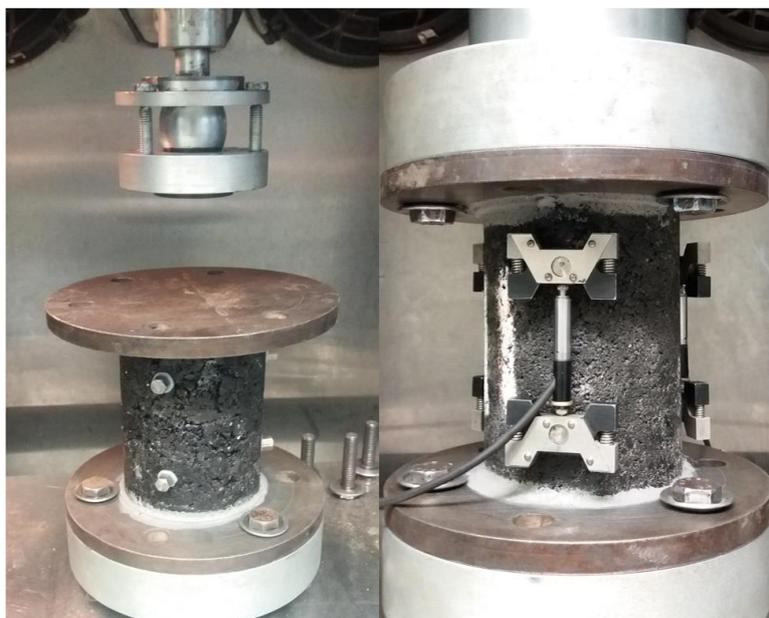
Nesta pesquisa, o ensaio é executado por meio da prensa hidráulica Universal Testing Machine (UTM - 25) da IPC Global, que dispõe de uma célula de carga de ± 25 kN, uma câmara com controle de temperatura, e um sistema de controle e aquisição de dados denominado IMACS (*Integrated Multi-Axis Control System*), conectado a um microcomputador que apresenta instantaneamente os dados de carga, deslocamento do atuador e deformação dos LVDT's, além de dados específicos do ensaio.

Figura 3.10 - Gabarito de colagem da amostra nas placas top e down desenvolvido por Boeira (2018).



O processo de instalação do sistema amostra-placas ao equipamento UTM-25 se dá, primeiramente, pelo encaixe da placa de suporte inferior à mesa da prensa. Acima dessa placa, a amostra, já colada, é posicionada, fixada com o uso de parafusos, e condicionada na temperatura de ensaio. Em seguida, fixa-se a placa de suporte superior, também com ligações aparafusadas, que garantem a conexão entre o sistema de rotulagem e todo sistema de acoplagem à prensa UTM-25. A Figura 3.11 demonstra o sistema completo de ensaio montado e apto para execução do ensaio. Todo o equipamento de ensaio, e os gabaritos de colagem foram desenvolvidos por Boeira (2018) durante sua pesquisa de doutorado.

Figura 3.11 - Amostra colada as placas e fixa ao sistema Amostra colada as placas e fixa ao sistema



Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C em condições diferentes, ou seja, variando a amplitude de deformação. Validou-se os ensaios a partir de três amostras para cada mistura, com algumas misturas contando com quatro amostras ensaiadas validadas, sendo uma para cada nível diferente de deformação (cerca de 150, 200, 250 e 300 μ m), buscando atingir a ruptura em um intervalo entre 1000 a 100000 ciclos.

A execução do ensaio consiste em duas fases. Primeiramente, aplicou-se em cada amostra, utilizando a mesma frequência do ensaio de fadiga, um pequeno carregamento provocando deformações de cerca de 50 a 75 μ m, medido nos LVDTs acoplados ao corpo de prova, para determinar o módulo dinâmico nas condições do ensaio de fadiga (10Hz e 19°). Esse pequeno ensaio de módulo precedendo o ensaio de fadiga é conhecido como *fingerprint*, e é utilizado no S-VECD para a correção da variabilidade entre as amostras, ou seja, para corrigir a diferença entre a rigidez obtida no ensaio completo de módulo complexo, e das amostras produzidas pelas mesmas misturas, mas agora ensaiadas a fadiga. Estes dados então são utilizados para calcular o *Dinamic Modulus Ratio* (DMR).

Em seguida, as amostras foram submetidas ao ensaio de fadiga, em que o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga. O colapso da amostra não coincide necessariamente com a fratura visível no material, sendo a falha definida como o ponto em que ocorre o pico de ângulo de fase durante o ensaio. Para cada corpo de prova ensaiado foi gerado uma curva característica de dano, e a partir das curvas obtidas, ajustado um modelo matemático de potência para representar a curva característica de dano (C vs S) média do material.

Após a realização do ensaio e o tratamento dos dados foi possível aplicar o modelo S-VECD e implementá-lo no programa computacional FlexPAVE 1.0 - *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*, ambos processos detalhados a seguir, para a análise da performance de pavimentos asfálticos. Esse *framework* já foi implementado e validado no Brasil por meio da comparação extensiva entre o desempenho observado em campo e previsto nas análises computacionais utilizando integralmente materiais e pavimentos brasileiros, pelo estudo de Nascimento (2015). Através dos resultados do ensaio, também foi possível aplicar os modelos tradicionais de fadiga pela abordagem através das curvas de Wöhler, relacionado as deformações com o N_f obtido pelo critério de falha da inflexão do ângulo de fase.

3.4 APLICAÇÃO DO MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO SIMPLIFICADO

Esta seção tem por objetivo discretizar o processo de aplicação do modelos S-VECD, desta maneira dividiremos em tópicos o procedimento de forma a demonstrar cada etapa do processo.

3.4.1 Caracterização linear viscoelástica (LVE)

Visando a aplicação do modelo S-VECD, se faz necessário a caracterização das misturas quanto as suas propriedades viscoelásticas lineares.

Os ensaios de módulo complexo foram feitos com base na norma AASHTO T 342 – *Determining Dynamic Modulus of Hotmix Asphalt Concrete Mixtures*, sendo determinado após a aplicação de carga nas frequências de 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz, e nas temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C, conforme recomendação da referida norma.

Este ensaio de caracterização viscoelástica foi conduzido por Faccin (2018), que analisou o comportamento mecânico com ênfase na rigidez e nas propriedades LVE, e por meio do protocolo 2S2P1D modelou matematicamente as equações do espaço Cole-Cole, diagrama Black e curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase de cada uma das vinte e quatro misturas. Os dados provenientes desta modelagem, serão utilizados agora por este trabalho como um dos requisitos do modelo S-VECD.

3.4.2 Calibração das séries de Prony com uso do modelo 2S2P1D

O modelo 2S2P1D está bem adaptado para simular o comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas conforme demonstrado em diferentes publicações (Olard e Di Benedetto 2003; Di Benedetto et al., 2004), e além disso, é de fácil modelagem visto que são poucas as constantes que necessitam de calibração. No entanto, conforme Tiouajni et al. (2011), o modelo 2S2P1D, devido a seu espectro contínuo, dificilmente pode ser usado em cálculos de elementos finitos. Assim, conforme o autor, é comum utilizar o modelo 2S2P1D para a calibração do modelo de Kelvin Voigt Generalizado (GKV) (Figura 2.11) com “n” elementos. O número de elementos "n" é de escolha do usuário, sendo que a qualidade da modelagem melhora com o maior número de elementos adotados.

Sendo assim, em um primeiro momento, as constantes do modelo 2S2P1D (Tabela 3.13), obtidas por Faccin (2018), foram processadas por meio de planilhas eletrônicas para a obtenção dos coeficientes do modelo GKV.

Após a obtenção dos coeficientes da série de Prony para ao modelo GKV, um novo processo de conversão é feito, desta vez do modelo GKV para o modelo de Maxwell Generalizado (GM), visto que estes coeficientes, no formato de séries de Prony para GM são os dados de entrada necessários para representar o comportamento viscoelástico no modelo S-VECD.

Todo o processo de interconversão entre os diferentes modelos foi verificado para cada uma das misturas, como demonstrado na Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 ,para a mistura U2-DNIT-FXC-65/90, de maneira a visualizar a conversão e a correspondência entre os modelos na representação do comportamento viscoelástico linear.

É possível desta maneira perceber que o processo de conversão entre o modelo 2S2P1D, e a modelagem em séries de Prony para Kelvin-Voight e Maxwell Generalizado apresenta uma aproximação satisfatória dos dados da caracterização viscoelástica. Assim se considera válida a conversão que será utilizada para a obtenção da curva característica de dano (C vs S).

Figura 3.12 - Curva mestra de módulo dinâmico obtida em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear

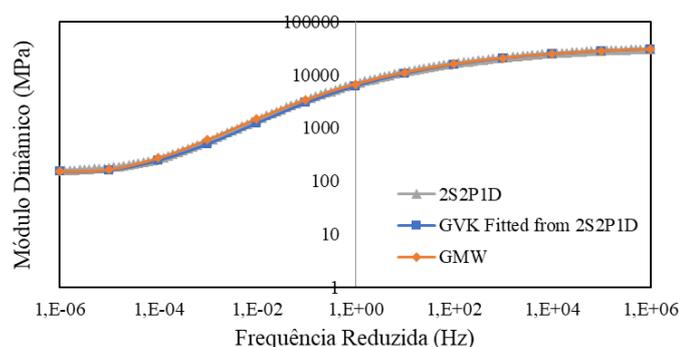


Figura 3.13 - Plano Cole-Cole obtido em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear

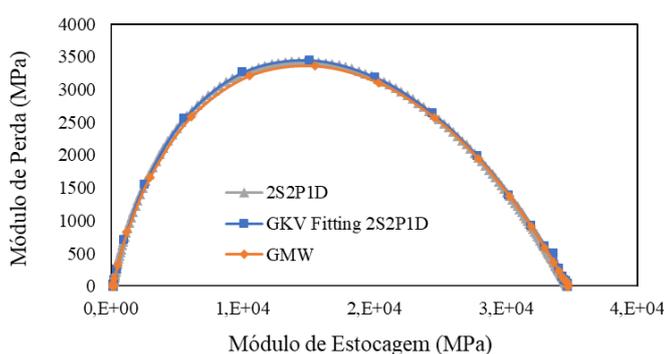


Figura 3.14 - Curva mestra de ângulo de fase obtida em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear

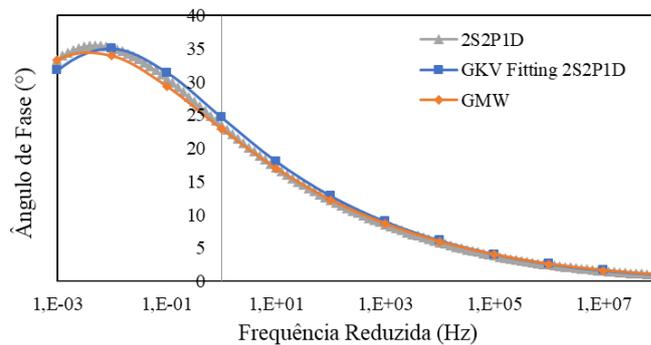
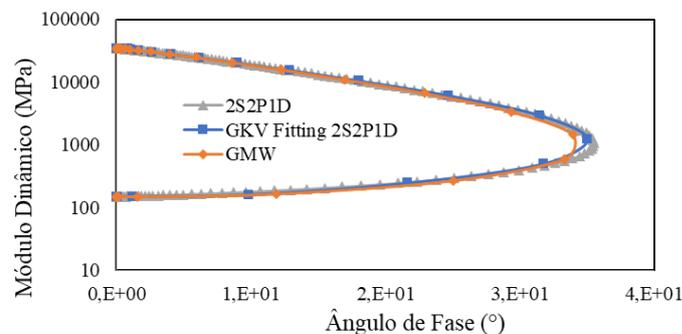


Figura 3.15 - Diagrama Black obtido em diferentes modelagens de simulação do comportamento viscoelástico linear



3.4.3 Obtenção da curva característica de dano

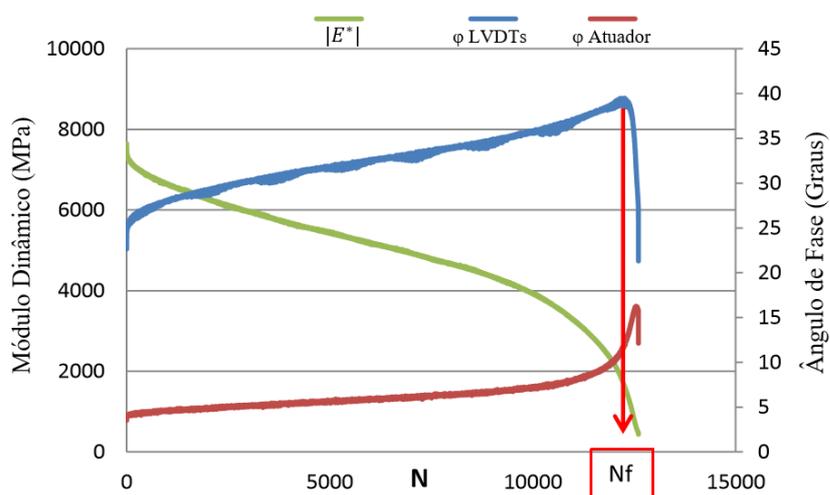
Para a sequência de aplicação do modelo S-VECD, juntamente com as propriedades de viscoelasticidade, são necessários os dados do *fingerprint*, e a entrada dos dados obtidos por meio do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão. Estes dados serão os responsáveis pela análise do dano por fadiga ao longo dos ciclos e pela previsão e definição da falha por fadiga.

O input destas três classes de dados, viscoelasticidade em séries de Prony em Maxwell Generalizado, *fingerprint* para a correção da variabilidade das amostras, e os dados experimentais de fadiga, é feito em um código de MATLAB[®] estruturado especificadamente com as equações do modelo S-VECD (seção 2.6.5), que compila o banco de dados de cada amostra gerando a curva característica de dano e prevendo a falha por fadiga do material.

A rotina de cálculo é dividida em mais de uma parte. Na primeira delas, os dados brutos do ensaio, dispostos em diversas planilhas distintas são processados e combinados em uma

única formatação. Desta maneira é possível plotar o primeiro gráfico de interesse (Figura 3.16), que traz as informações de módulo dinâmico e ângulo de fase durante os ciclos de carga.

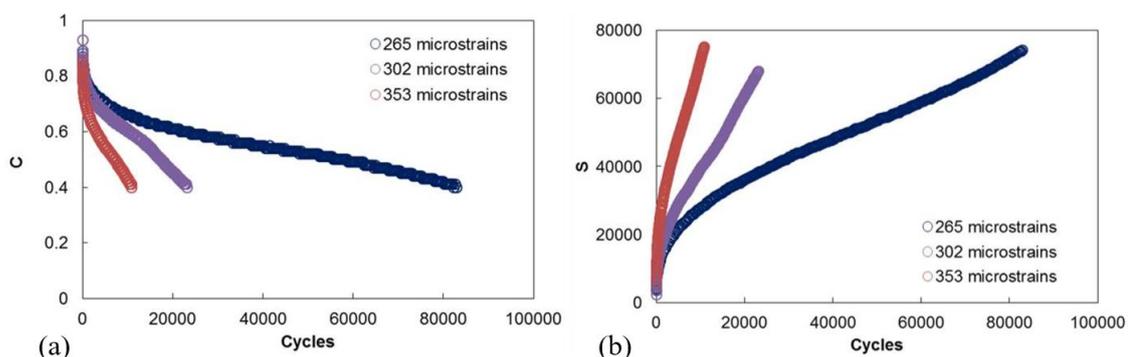
Figura 3.16 - Evolução do Módulo Dinâmico e do Ângulo de Fase ao longo dos ciclos



Fonte: Adaptado de Babadopulos (2014)

Usando estes dados de processamento do ensaio, executa-se a segunda rotina de cálculo, referente a evolução da integridade (pseudo-rigidez) do material, e a evolução do acúmulo de dano. A Figura 3.17-a apresenta a queda da integridade pelo número de ciclos, e a Figura 3.17-b a evolução do acúmulo de dano em diferentes amplitudes de deformação ensaiadas.

Figura 3.17 - Evolução da integridade e do acúmulo de dano pelo S-VECD

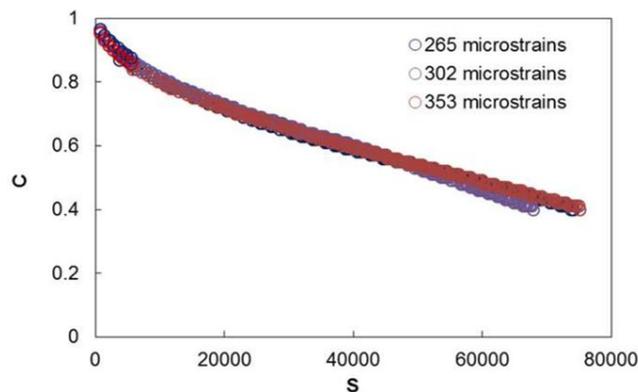


Fonte: Nascimento (2015)

Observa-se que os resultados apresentados na Figura 3.17 são obtidos para diferentes deformações. Para assumirmos então que a curva característica de dano (C vs S) é uma propriedade do material, independente das condições de carregamento e das temperaturas ensaiadas, as curvas obtidas em função do número de ciclos para cada amostra, em níveis

diferentes de deformação, devem agora colapsar umas sobre as outras quando analisadas em relação a integridade do material pelo dano acumulado. É exatamente isso que se apresenta na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Curva característica de dano (C vs S)



Fonte: Nascimento (2015)

As curvas de integridade (C), e de evolução do dano (S), para diferentes deformações, quando comparadas, colapsam umas sobre às outras, de maneira que temos então uma análise que independe de qualquer fator externo de ensaio, levando a obtenção de uma propriedade do material.

Obteve-se, desta maneira, as vinte e quatro curvas características de dano deste estudo, sendo cada uma delas composta pela análise de três ou quatro amostras. Visto que as curvas são delineadas pelos dados experimentais, torna-se necessário o ajuste de um modelo matemático que represente, através de uma lei e algumas variáveis, a curva C vs S . Na literatura sobre o tema, dois modelos são os mais utilizados: o modelo de potência (Equação 78), e o modelo exponencial (Equação 79). Foi adotado neste estudo o modelo de potência, que apresenta um ajuste mais preciso dos dados para as misturas ensaiadas.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (78)$$

Onde C_{11} e C_{12} são as constantes do ajuste

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (79)$$

Onde a e b são as constantes do ajuste

Entretanto, assim como as propriedades viscoelásticas obtidas pelo módulo complexo, as curvas C vs S não servem para classificar as misturas asfálticas quanto ao desempenho que estas apresentarão em campo. Isso se deve ao fato de que misturas que foram induzidas a mesmas deformações em laboratório, podem apresentar diferentes comportamentos para uma mesma carga em campo.

Para que se possa classificar as misturas quanto ao desempenho em campo, é necessário criamos um cenário típico igual para todas as misturas, variando apenas as características do revestimento. Neste trabalho, esta análise é feita por meio do software FlexPAVE 1.0.

3.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO POR MEIO DO FLEXPAVE 1.0

O desempenho de um pavimento está ligado diretamente a relação tensão-deformação que este apresenta quando solicitado. Conforme Huang (2004) o principal método de abordagem desta relação é considerar as camadas do pavimento como materiais elásticos solicitados por cargas axissimétricas estacionárias. Contudo a análise das camadas elásticas não é uma abordagem precisa para as misturas asfálticas, visto que estas exibem comportamento viscoelástico. Baseado em uma abordagem viscoelástica de cargas em movimento, no modelo S-VECD, no critério de falha G^R , e considerando o carregamento em movimento gerando tensões tridimensionais, Eslaminia et al. (2012) desenvolveram o software *Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses* (LVECD), hoje com o nome comercial FlexPAVE 1.0. O programa está estruturado para prever os comportamentos de fadiga e de deformação permanente, utilizando a mecânica do dano contínuo e modelos viscoplásticos respectivamente, capturando assim com eficiência o dano nos pavimentos asfálticos.

O LVECD está baseado nos seguintes pressupostos:

- i) A estrutura do pavimento é considerada como um sistema de camadas infinitas onde as propriedades do material mudam ao longo da profundidade do pavimento. Esta suposição deve-se ao fato de que as dimensões do pavimento são muito grandes em comparação com o tamanho do pneu e a espessura do pavimento;
- ii) A variação da temperatura horária geralmente é lenta, enquanto o carregamento do tráfego muda em poucos segundos. Portanto, a análise do desempenho do pavimento é realizada no perfil de temperatura fixa;
- iii) A temperatura muda ao longo do perfil do pavimento em função da profundidade. Sua variação é considerada insignificante em um nível específico, portanto, a temperatura é constante em todos os pontos em uma determinada profundidade e as

propriedades do material são assumidas como isotrópicas no plano perpendicular à direção da profundidade;

iv) O perfil de temperatura é simulado como função cíclica por um período de um ano. Portanto, os cálculos de tensão e de deformação podem ser reduzidos a um ano representativo;

v) A carga de tráfego é idealizada como uma carga cíclica com forma constante (área de contato do pneu) e velocidade constante;

vi) Apesar da natureza não-linear das camadas de base, elas são idealizadas como materiais elásticos lineares, porque os efeitos da não-linearidade não são significativos em comparação com as aproximações inerentes à modelagem das variações de tráfego e temperatura.

Assim, com os dados climáticos, o tráfego e a estrutura do pavimento, a camada de revestimento asfáltico é modelada quanto as características LVE por séries de Prony e pelos fatores de deslocamento tempo-temperatura, além dos coeficientes do modelo S-VECD, sendo possível simular o desempenho do pavimento quanto ao dano por fadiga ao longo do tempo.

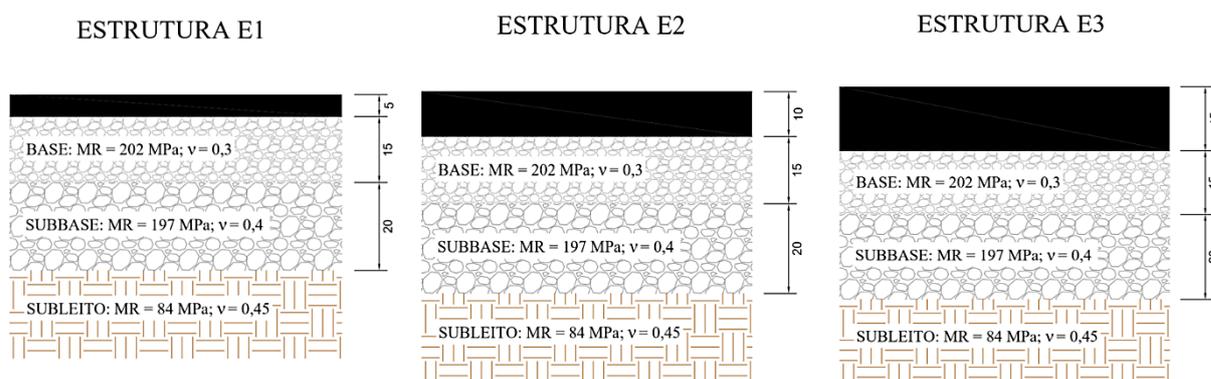
Neste estudo, as simulações do programa FlexPAVE 1.0 foram usadas para avaliar os efeitos das características de cada mistura asfáltica frente ao dano por fadiga em três estruturas típicas de pavimentos. Em todas as estruturas, fixou-se as camadas inferiores e se alterou a espessura do revestimento, de modo a criar uma estrutura com camada asfáltica mais esbelta, uma estrutura com camada asfáltica de espessura intermediária e uma estrutura com camada mais robusta. A partir destas três estruturas foi alterado as características do revestimento, simulando as vinte e quatro misturas asfálticas deste estudo, totalizando um valor de 72 simulações de dano por fadiga ao longo do tempo.

O objetivo das simulações em estruturas com diferentes espessuras é a verificação de como a rigidez própria de cada mistura, atrelada a espessura da camada asfáltica, vem a afetar nos resultados de dano, visto que os níveis de deformação passam a ser menores em camadas mais rígidas, e diferentes misturas apresentam diferentes tolerâncias a estas deformações. Ou seja, uma classificação de dano por fadiga se mantém a medida que os níveis de deformação no pavimento se alteram?

Para a análise do dano por fadiga considerou-se estruturas de pavimento novas com período de projeto de 10 anos. Utilizou-se uma estrutura de com camada de base de brita graduada simples com 15 cm, módulo de 202 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3; sub-base granular com 20 cm, módulo de 197 MPa e coeficiente de Poisson de 0,4; e subleito com módulo de 84 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45. Logo acima destas camadas fixadas está

disposto o revestimento asfáltico, com variação em sua espessura. A estrutura E1 possui revestimento de 5 cm, a estrutura E2 revestimento com 10 cm, e a estrutura E3 revestimento com espessura de 15 cm. (Figura 3.19).

Figura 3.19 - Estruturas de pavimento utilizadas para análise de desempenho frente a fadiga



A interface do software FlexPAVE 1.0 está dividida em seis abas principais, apresentadas em sequência abaixo, sendo cinco destas abas referentes aos inputs dos dados necessários para o cálculo do dano, e uma delas para a verificação dos resultados.

A primeira aba (Figura 3.20) diz respeito às informações gerais do projeto (*General Information*). Nesta etapa são determinadas informações como: o tipo de pavimento, o tipo de entrada de dados para a representação do tráfego, as opções de análise do pavimento, a histórico da data de construção e de abertura ao tráfego, o período de projeto, e demais observações opcionais.

Para o escopo deste trabalho, foi determinado o tipo de pavimento como pavimento novo; os dados de tráfego como o número de passagens diários do eixo padrão, representado nos dados de tráfego como “*design vehicle*”; selecionou-se a opção de análise “*Pavement Performance Analysis*” para a análise do dano por fadiga (a opção “*Pavement Response Analysis*” deve ser escolhida caso se deseje apenas as respostas de tensão e deformação da estrutura do pavimento); e o período de projeto totalizando 10 anos. Para este trabalho, habilitou-se a opção de fadiga e de tensões advindas da variação de temperatura, e não se contemplou o defeito de afundamento de trilha de roda, visto que este não faz parte do escopo desta pesquisa.

As demais opções como reabilitação de pavimentos, localização via coordenadas geográficas para dados climáticos, healing e envelhecimento não estão habilitadas nesta versão

do software, sendo ainda objeto de desenvolvimento por parte da *North Carolina State University*.

Com as informações gerais do projeto contempladas, passa-se para os dados da estrutura do pavimento. Esta aba é onde são inseridos os dados provenientes dos ensaios realizados para a caracterização das misturas asfálticas. Em um primeiro momento são inseridos o nome da estrutura e a largura da faixa ao qual o eixo incidirá o carregamento, aqui determinada em 3,65 metros, e a tipologia estrutural do pavimento. (Figura 3.21)

Figura 3.20 - Aba "General Information" do software FlexPAVE

FlexPAVE 1.0 Program : C:\FlexPAVE1.0\U6-DNIT-FXC-6085-SCM.lve

File Analysis Tools Help

Project

- General Information
- Design Structure
- Climate Data
- Traffic Data
- Outputs and Analysis Options
- Results
 - Response
 - Fatigue Cracking
 - Rutting

Design Structure | General Information

Pavement Type

- New Pavement
- AC-on-AC overlay Rehabilitation

Pavement Location

Latitude:

Longitude:

Traffic

- Design Vehicle
- Traffic Spectrum

Analysis Options

- Pavement Response Analysis
- Pavement Performance Analysis

Fatigue Options

- Fatigue Cracking
- Thermal Stress
- Healing
- Aging

Rutting Options

- Rutting

Pavement Construction Timeline

Pavement Construction Date:

Traffic Opening Date:

Pavement Design Life (years):

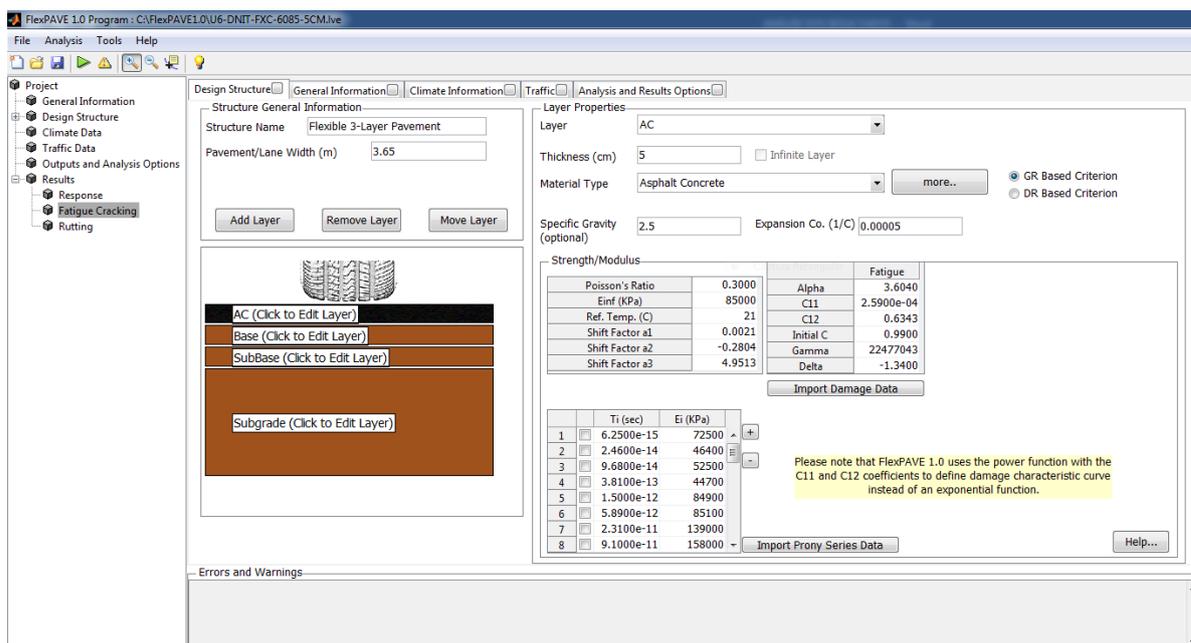
Optional Description

Project Name	U6-DNIT-FXC-60/85
Author	SILVIO SCHUSTER
City/State	SANTA MARIA
Date	03/06/2018
Note	

Units Advanced

Errors and Warnings

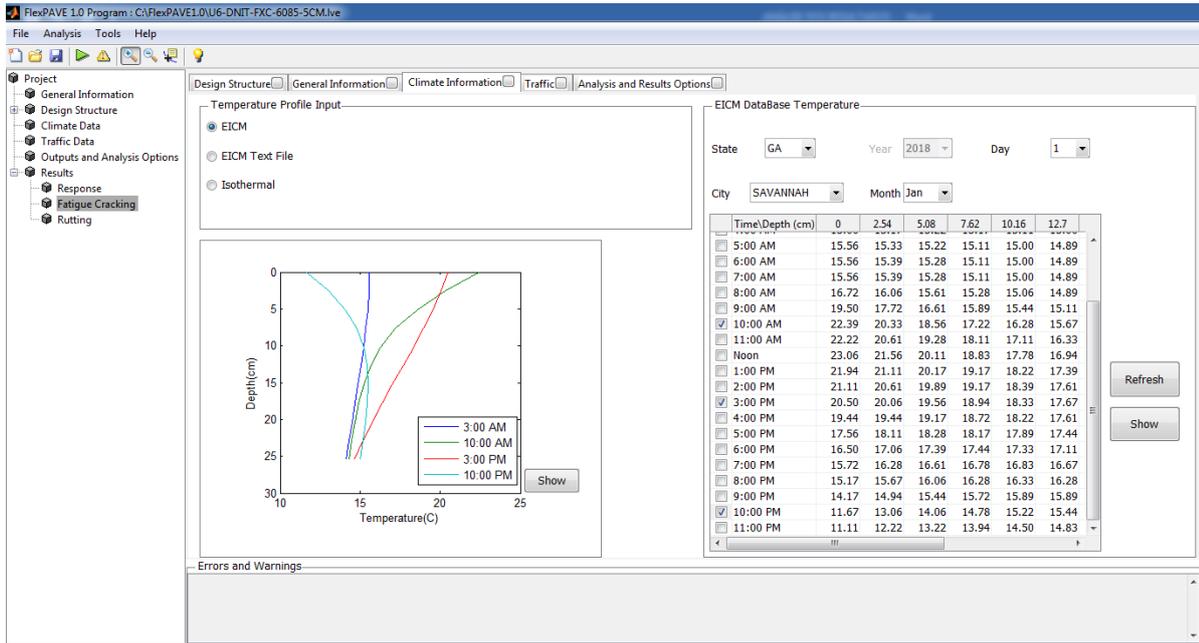
Figura 3.21 - Aba "Desing Structure" do software FlexPAVE



Com a estrutura determinada, edita-se os layers que compõem cada uma das camadas. Para a camada de concreto asfáltico são necessários os dados da caracterização viscoelástica, em termos de séries de Prony; os coeficientes de translação do princípio de superposição tempo-temperatura ajustado pelo modelo de Arrhenius; e os dados provenientes do modelo S-VECD, como os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos pelo ajuste do modelo de potência (Equação 78) sobre a curva C vs S , o parâmetro de evolução de dano α , e os coeficientes γ e Δ das curvas G_R vs N_f .

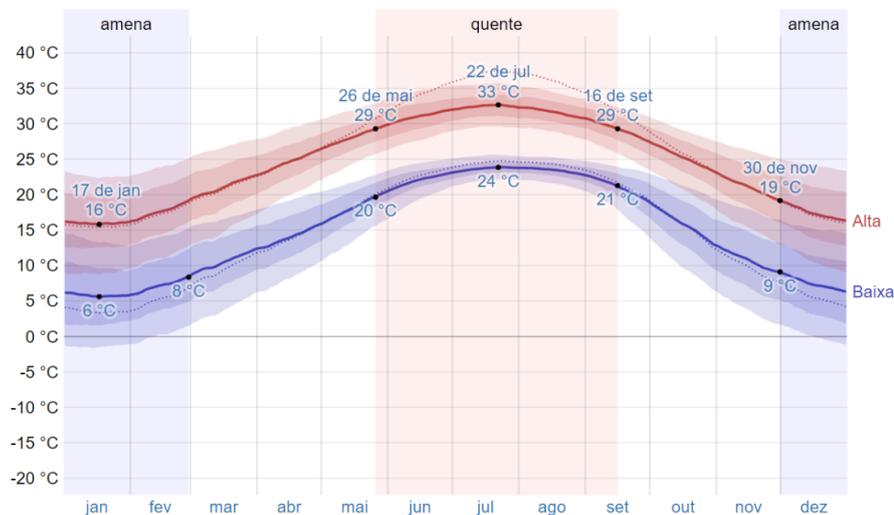
A seguinte aba consiste da entrada dos dados climáticos (Figura 3.22).

Figura 3.22 - Aba "Climate Information" do software FlexPAVE



Utilizou-se para estes um modelo EIMC (*Enhanced Integrated Climate Model*) do banco de dados padrão do software. Este banco de dados conta com dados de temperatura ao longo da profundidade para todos os dias do ano, separados de hora em hora, em diferentes estados e cidades norte americanas. De modo a simular uma condição próxima a apresentada no estado do Rio Grande do Sul, foi utilizado o modelo climático do estado norte americano da Geórgia, sendo a cidade escolhida Savannah (Figura 3.23), que de acordo com o estudo realizado por Brito e Heller (2017), é a cidade com maior semelhança ao clima proposto.

Figura 3.23 - Variação anual de temperaturas na cidade de Savannah



Em relação às características de tráfego, foi determinado um número de 3500 passagens diárias, com uma taxa anual de crescimento de 3%, resultando ao final dos 10 anos de análise um N de cerca de $1,5 \times 10^7$ repetições. O tráfego foi considerado igualmente distribuído ao longo dos meses do ano, entretanto variou ao longo das horas do dia, conforme Tabela 3.16, buscando uma maneira mais fiel de simular a incidência do tráfego em diferentes temperaturas do revestimento ao longo do dia, visto que diferentes temperaturas levam a diferentes rigidezes e, por conseguinte a diferentes relações de tensões e deformações.

Tabela 3.16 - Distribuição do tráfego ao longo das horas do dia

Distribuição do tráfego			
<i>Hora</i>	<i>%</i>	<i>Hora</i>	<i>%</i>
0	0,5	12	8
1	0,5	13	8
2	0,5	14	6
3	0,5	15	6
4	1	16	7
5	2	17	8
6	4	18	6
7	6	19	4
8	8	20	2
9	7	21	1
10	6	22	1
11	6	23	1

Fonte: Nascimento (2015)

Foi utilizada a área de contato retangular entre pneu-pavimento, de relação comprimento/largura de 1,5714; pressão de inflação dos pneus de 800 kPa, com espaçamento entre os centros dos dois pneus do rodado de 30,47 cm e, visto que o software considera carregamentos dinâmicos, a velocidade de passagem foi determinada como 80 km/h. Abaixo na Figura 3.24 segue o layout da aba de entrada de dados de tráfego utilizada pelo software.

Por fim, a última aba de entrada de dados diz respeito a escolha das respostas que o software deverá calcular e apresentar conforme a necessidade de análise do usuário (Figura 3.25).

Figura 3.24 - Aba "Traffic" do software FlexPAVE

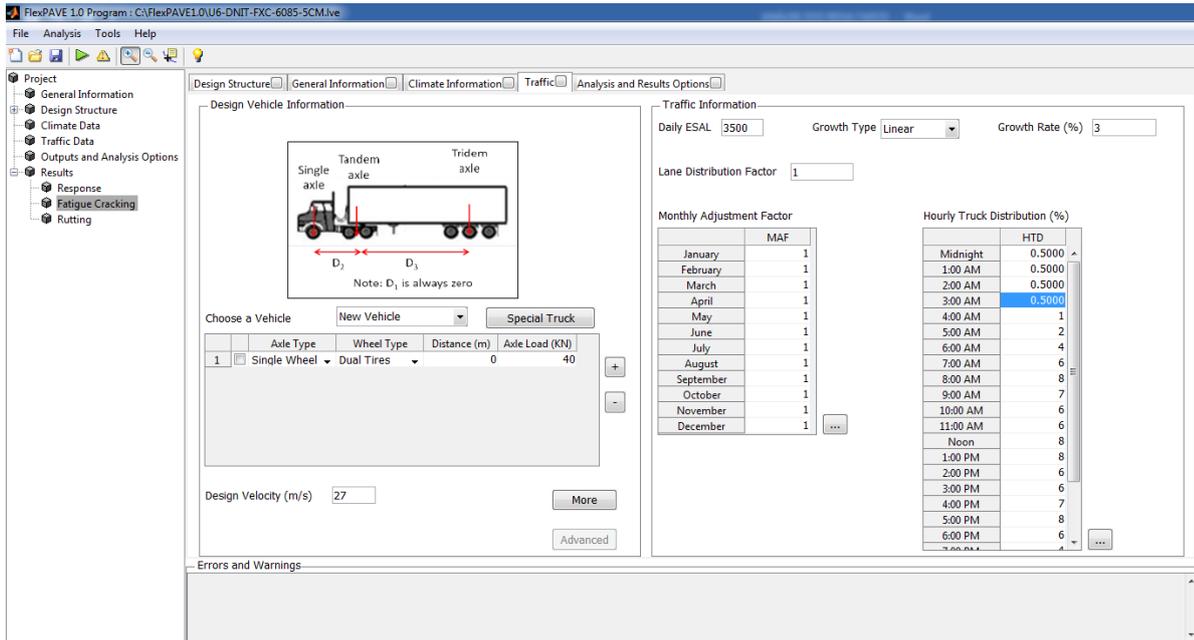
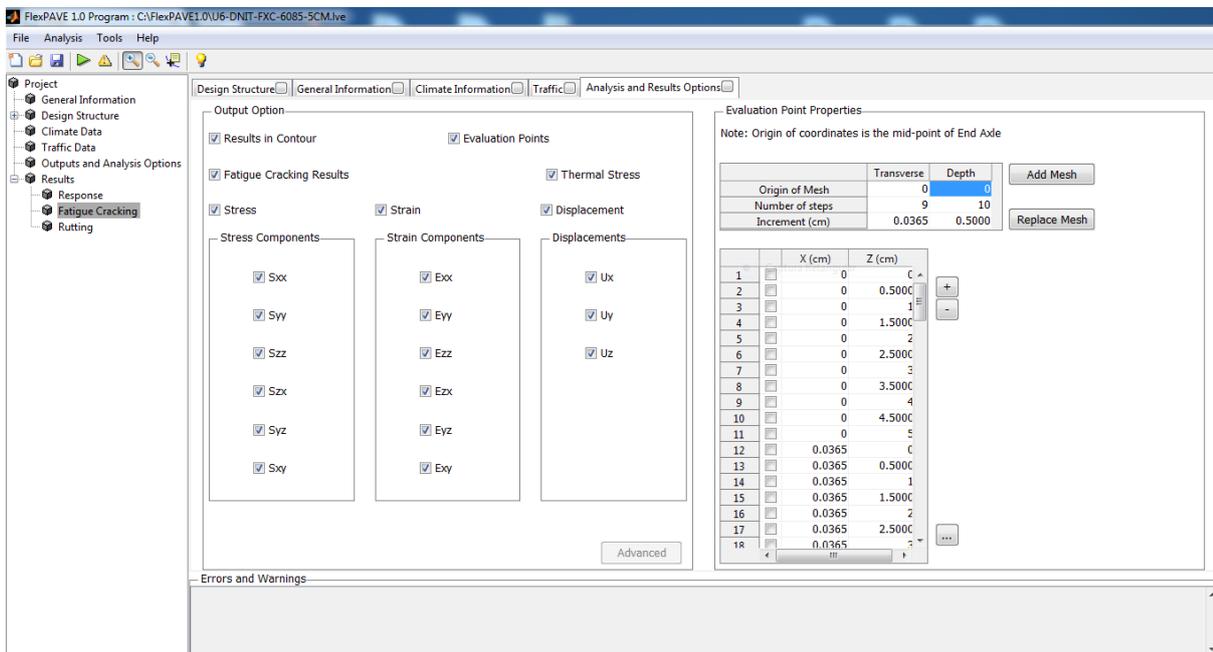


Figura 3.25 - Aba "Analysis and Results Options" do software FlexPAVE

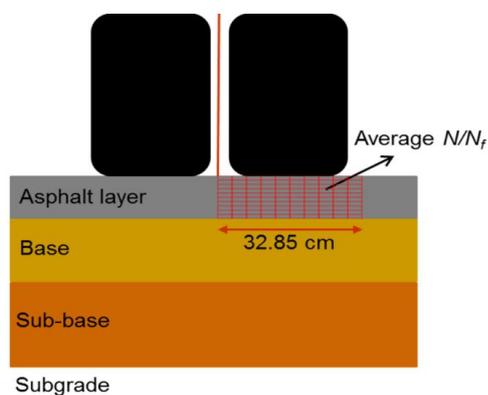


Também é nessa aba a determinação da malha de pontos para a análise tanto dos dados de tensão e deformação como para o cálculo do dano médio (N/N_f) acumulado por fadiga.

Para a análise foi utilizada uma malha com 110 pontos (Figura 3.26), contendo 10 pontos distribuídos por 32,85 cm na horizontal, a partir do centro entre as duas rodas, e 11 pontos na vertical, distribuídos igualmente ao longo da espessura da camada de concreto asfáltico. Esta

mesma malha foi utilizada para o cálculo do dano médio acumulado nos trabalhos de Nascimento (2015), Fritzen (2016) e Mocelin (2018).

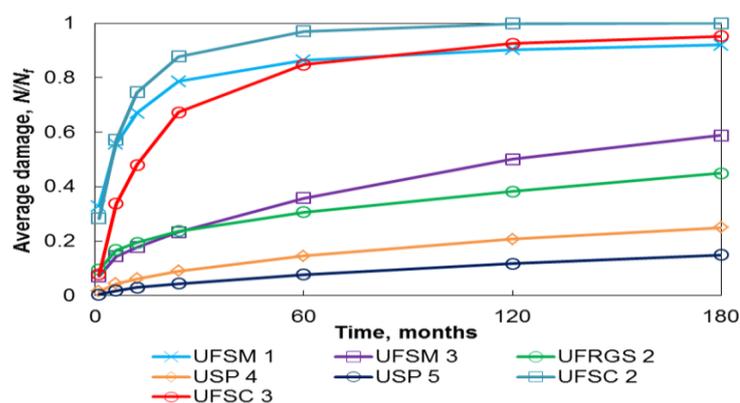
Figura 3.26 - Malha de pontos utilizada para determinação do dano médio acumulado na camada de revestimento



Fonte: Nascimento (2015)

A partir destas análises, foram gerados gráficos com a evolução dos danos médios acumulados (N/N_f) na malha de pontos, calculados pela Lei de Miner, para todas as misturas ao longo do período de projeto (Figura 3.27), permitindo observar a variação do comportamento entre as diferentes misturas quando inseridas na mesma estrutura e submetidas às mesmas condições climáticas e de tráfego.

Figura 3.27 - Dano médio por fadiga ao longo do tempo

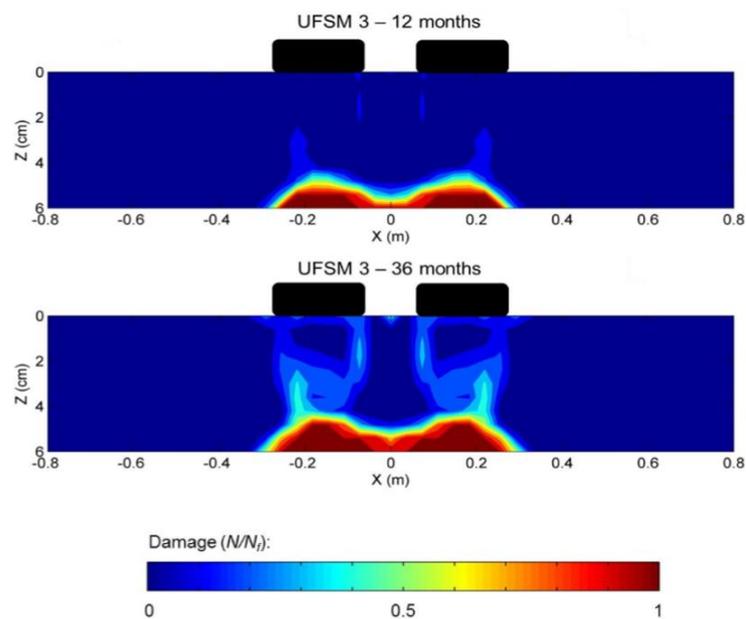


Fonte: Nascimento (2015)

Para uma melhor visualização do dano (N/N_f) nas camadas asfálticas, o software gera gráficos de contorno para todos os meses ao longo do projeto, em que as cores mais quentes (vermelho) representam áreas totalmente danificadas ($N/N_f = 1$), enquanto as mais frias (azul)

representam áreas sem dano ($N/N_f = 0$), conforme escala apresentada abaixo dos contornos de cada mistura (Figura 3.28). Estes gráficos permitem o exame de como a danificação evolui, e em que local do perfil transversal e tempo ela vem ocorrendo.

Figura 3.28 - Localização e quantificação do dano com tempo fixado



Fonte: Nascimento (2015)

Park (2013) concluiu que a abordagem mecanicista baseada no LVECD pode ser usada como um modelo de previsão de desempenho para o projeto e manutenção de pavimentos e pode ajudar a criar estratégias de reabilitação rentáveis para sistemas de gerenciamento de pavimentos. Nascimento (2015) aplicou a modelagem S-VECD juntamente ao LVECD, validando a previsão de dano por fadiga para misturas asfálticas brasileiras.

O objetivo do uso do software neste trabalho é poder classificar as misturas quanto a resistência por fadiga, para assim verificar a influência que as diferentes características das vinte e quatro misturas causam no desempenho destas em campo quando levamos em conta os defeitos de trincamento vinculados ao fenômeno de fadiga. Maiores detalhes a respeito do funcionamento do software podem ser encontrados em Eslaminia et al. (2012).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão, seguindo os procedimentos previstos na metodologia. De maneira geral esta seção tem início com a apresentação dos dados brutos dos ensaios por meio de uma abordagem clássica através das curvas de Wöhler. Com as curvas de Wöhler foi possível calcular o fator de área de fadiga (FAF) de maneira a classificar as misturas quanto ao desempenho a fadiga por este critério.

Em um segundo momento são discutidos os dados provenientes do modelo S-VECD, como as curvas características de dano (C vs S) e as envoltórias de ruptura do critério de falha G^R . Com a implementação destas no software FlexPAVE, apresenta-se as curvas de dano médio acumulado para cada mistura ao longo do período de projeto, de modo que se classifica novamente as misturas, agora levando em conta as características LVE e o dano por fadiga aplicados em uma estrutura típica.

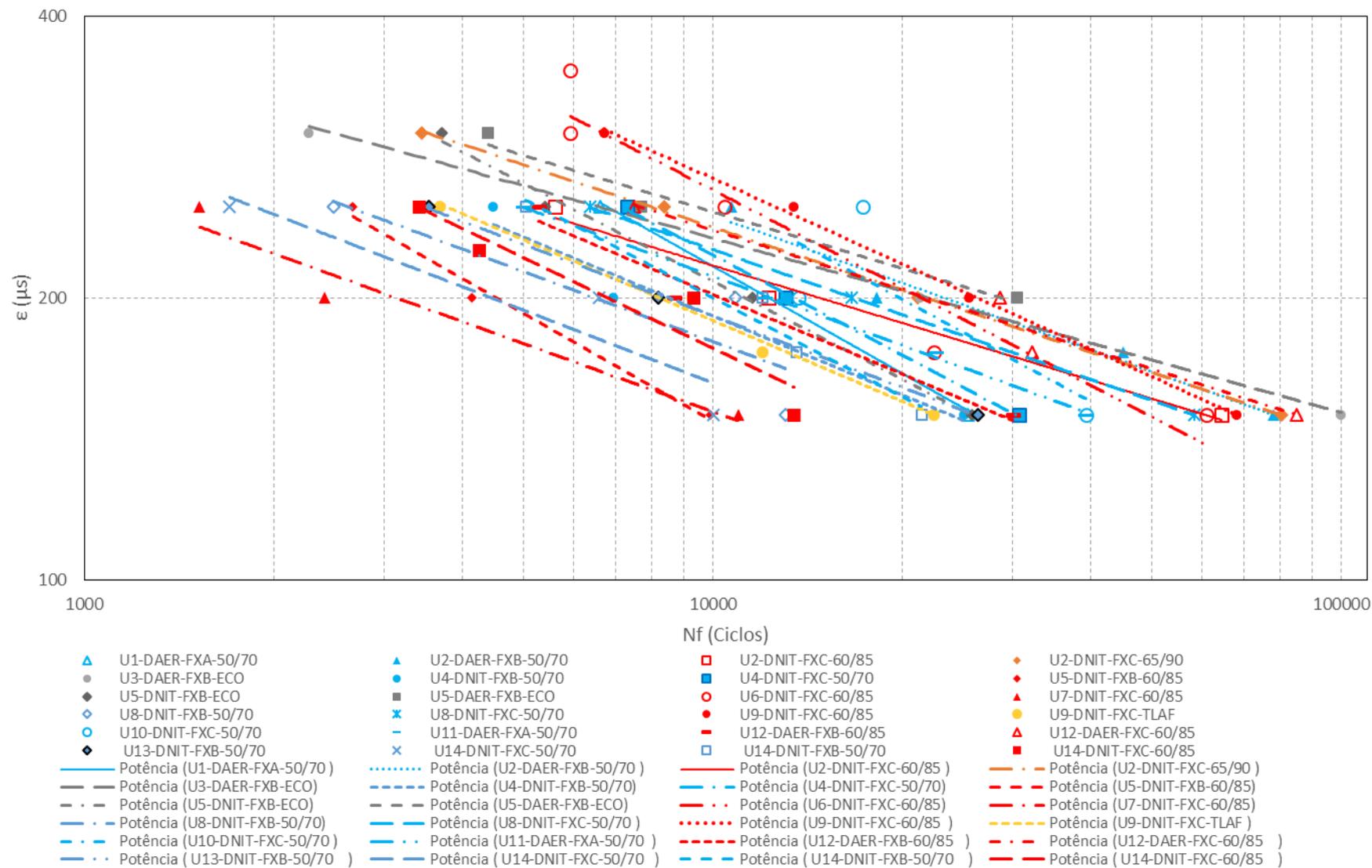
Posteriormente, visto a quantidade de variáveis que afetam a resistência das misturas a fadiga, analisou-se estatisticamente os dados para buscar possíveis correlações entre o dano encontrado e as propriedades das misturas. Realizou-se também análise de regressão múltipla para os índices obtidos por Faccin (2018) no ensaio instrumentado de RT, buscando correlações destes com o dano por fadiga.

Analisou-se pôr fim a resistência integral das misturas, frente a fadiga e a deformação permanente, buscando compreender de maneira geral os principais fatores de influência intrínsecos as misturas no desempenho das mesmas, e ao fim obtendo uma classificação final das vinte e quatro misturas aqui apresentadas.

4.1 CURVAS DE WÖHLER

A análise da vida de fadiga das misturas asfálticas pode ser feita de maneira clássica por meio das curvas de Wöhler, que une os resultados experimentais de deformação pré determinada, e o número de ciclos até a falha (N_f). Visto a existência de diferentes abordagens de falha por fadiga, o estudo buscou determinar o ciclo de falha pela inflexão do ângulo de fase. Estes resultados estão no Apêndice III, e foram utilizados para gerar as curvas de Wöhler (Figura 4.1).

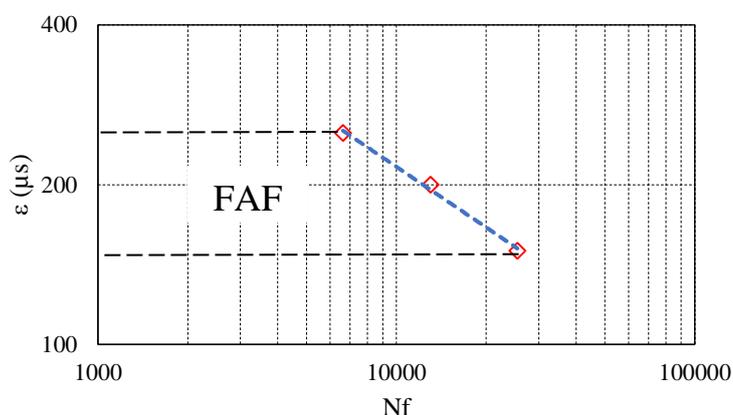
Figura 4.1 - Curvas de Wöhler por meio dos dados experimentais das misturas



As mesmas curvas de Wöhler apresentadas na Figura 4.1 se encontram discretizadas uma a uma, com a respectiva equação analítica de resultados, e valores de R^2 , no Apêndice III, desta dissertação.

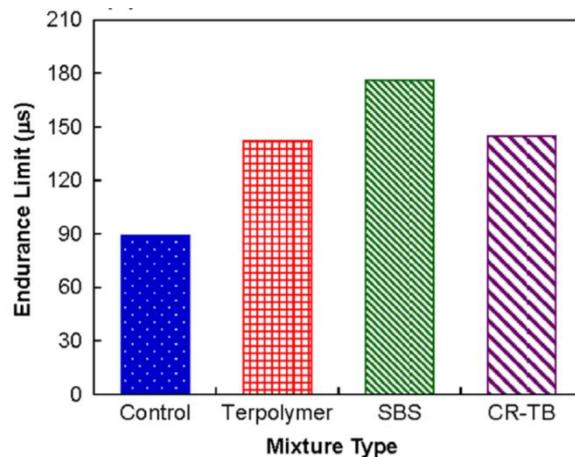
Considerando os resultados brutos experimentais encontrados, e plotados em forma de curvas de Wöhler, é possível classificar as misturas asfálticas quanto a resistência a fadiga por meio do cálculo da área sobre a curva de fadiga em espaço log-log (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Determinação da área sob a curva para cálculo do fator de área de fadiga (FAF)



Para o cálculo do fator de área de fadiga (FAF) foi utilizado um intervalo de deformação fixo entre 150 e 250 μs , visto que a grande maioria das misturas foi ensaiada nestes níveis de deformação. Nascimento (2015) também classificou misturas asfálticas quanto a resistência a fadiga pelo FAF, entretanto utilizou para tal o intervalo de 100 a 200 μs , mais próximos das deformações encontradas na fibra inferior do revestimento segundo o autor, entretanto o autor fez isso após a aplicação do S-VECD. Neste trabalho se optou por não extrapolar os dados para deformações mais baixas nas curvas de Wöhler experimentais visto a percepção de que algumas misturas, principalmente as com asfalto modificado por polímero, quando ensaiadas em níveis de 100 e 125 μs se encontram dentro de um intervalo conhecido por *endurance limit*. Norouzi (2016) disserta sobre o fenômeno e apresenta alguns dados de valores de deformação aos quais a mistura se encontra dentro do intervalo de *endurance limit*. Nota-se na Figura 4.3 apresentada pelo respectivo autor, que as misturas testadas com modificação por polímero SBS apresentam limites para *endurance limit* de até 180 μs .

Figura 4.3 - Endurance Limite para misturas asfálticas com modificação do ligante



Fonte: Norouzi (2016)

Ou seja, se a deformação ensaiada está abaixo de um nível crítico para fadiga, a vida de fadiga da mistura pode ser estendida significativamente, e desta forma a extrapolação pelas equações encontradas nas curvas de Wöhler em deformações mais altas podem não ter ajuste significativo em deformações mais baixas, apresentando resultados não condizentes com a realidade quando realmente ensaiados.

Para quatro misturas que não foram ensaiadas na deformação de 150 μs, foi necessário utilizar a equação obtida junto a curva de Wöhler de cada mistura para a extrapolação do N_f para esse nível de deformação. Segue na Tabela 4.1 os valores de FAF obtidos para cada uma das misturas e a classificação ordenada da melhor a pior mistura segundo o critério utilizado.

De forma geral, quanto maiores os valores de FAF, melhor resistência a fadiga a mistura apresenta. Isso pode ser visualizado através da percepção de que maiores áreas sobre as curvas de Wöhler são ocasionadas pelo aumento do número do ciclo de ruptura, levando as curvas mais para a direita, e também pela menor inclinação das curvas, ocasionada por N_f mais altos em ensaios de maiores deformações.

Tabela 4.1 - Classificação das misturas por meio do FAF das curvas de Wöhler experimentais

<i>Ordenadas por Usina</i>			<i>Ordenadas por classificação</i>		
Mistura	<i>FAF</i>	<i>Classificação</i>	Mistura	<i>FAF</i>	<i>Classificação</i>
U1-DAER-FXA-50/70	1,603	13°	U5-DAER-FXB-ECO ¹	6,511	1°
U2-DAER-FXB-50/70	4,434	5°	U3-DAER-FXB-ECO	5,386	2°
U2-DNIT-FXC-60/85	0,894	20°	U12-DAER-FXC-60/85	4,632	3°
U2-DNIT-FXC-65/90	4,438	4°	U2-DNIT-FXC-65/90	4,438	4°
U3-DAER-FXB-ECO	5,386	2°	U2-DAER-FXB-50/70	4,434	5°
U4-DNIT-FXB-50/70	1,481	16°	U9-DNIT-FXC-60/85	4,083	6°
U4-DNIT-FXC-50/70	1,899	11°	U6-DNIT-FXC-60/85	3,573	7°
U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	0,629	23°	U8-DNIT-FXC-50/70	3,240	8°
U5-DNIT-FXB-ECO ¹	1,563	14°	U10-DNIT-FXC-50/70	2,830	9°
U5-DAER-FXB-ECO ¹	6,511	1°	U11-DAER-FXA-50/70	2,207	10°
U6-DNIT-FXC-60/85	3,573	7°	U4-DNIT-FXC-50/70	1,899	11°
U7-DNIT-FXC-60/85	0,625	23°	U12-DAER-FXB-60/85	1,766	12°
U8-DNIT-FXB-50/70	0,777	21°	U1-DAER-FXA-50/70	1,603	13°
U8-DNIT-FXC-50/70	3,240	8°	U5-DNIT-FXB-ECO ¹	1,563	14°
U9-DNIT-FXC-60/85	4,083	6°	U13-DNIT-FXB-50/70	1,498	15°
U9-DNIT-FXC-TLAF	1,307	18°	U4-DNIT-FXB-50/70	1,481	16°
U10-DNIT-FXC-50/70	2,830	9°	U14-DNIT-FXB-50/70	1,326	17°
U11-DAER-FXA-50/70	2,207	10°	U9-DNIT-FXC-TLAF	1,307	18°
U12-DAER-FXB-60/85	1,766	12°	U2-DNIT-FXC-60/85	0,894	19°
U12-DAER-FXC-60/85	4,632	3°	U14-DNIT-FXC-60/85	0,844	20°
U13-DNIT-FXB-50/70	1,498	15°	U8-DNIT-FXB-50/70	0,777	21°
U14-DNIT-FXC-50/70	0,587	24°	U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	0,629	22°
U14-DNIT-FXB-50/70	1,326	17°	U7-DNIT-FXC-60/85	0,625	23°
U14-DNIT-FXC-60/85	0,844	20°	U14-DNIT-FXC-50/70	0,587	24°

Nota: ¹ Misturas Mornas

De acordo com a Tabela 4.1 é possível verificar que as misturas apresentam uma gama variada e ampla de valores. A mistura U5-DAER-FXB-ECO apresenta um desempenho superior as demais, seguida por outra mistura com asfalto borracha, U3-DAER-FXB-ECO, entretanto de outra usina e com agregado basáltico, ao contrário da primeira com agregado de origem granítica. Percebe-se pela análise do parâmetro FAF que não é possível estabelecer uma relação de resistência a fadiga com o tipo de ligante utilizado, visto que misturas modificadas por polímero, com asfalto borracha, e com ligante convencional apresentam desempenhos parecidos e consideráveis entre si, e que variam de piores a melhores classificações.

Como exemplo temos a mistura U2-DAER-FXB-50/70 de ligante convencional 50/70 com FAF alto e classificada em 5° lugar, enquanto outras misturas de mesmo ligante apresentam FAF baixos e se classificam entre as piores misturas. O mesmo fato se repete para

os ligantes modificados e de asfalto borracha. Para a mistura com ligante TLA Flex observou-se um desempenho ruim em relação as outras misturas, classificado em 18º lugar.

Por meio da análise dos diferentes níveis de FAF por mistura, fica claro que não é possível estabelecer uma relação de resistência a fadiga quando olha-se superficialmente a faixa granulométrica das misturas, visto que a verificação das curvas quando comparada a faixas mais finas e mais grossas não resultam em possíveis padrões de comportamento de fadiga.

As classificações apresentadas na Tabela 4.1 e a análise do FAF não levam em conta os valores de rigidez das misturas, o seu comportamento a temperaturas diferentes da temperatura ensaiada, a combinação das propriedades das misturas com a estrutura do pavimento, o clima, e a carga de tráfego imposta. Estas variáveis podem afetar significativamente o desempenho em serviço das misturas asfálticas, especialmente porque as misturas apresentam propriedades LVE muito diferentes.

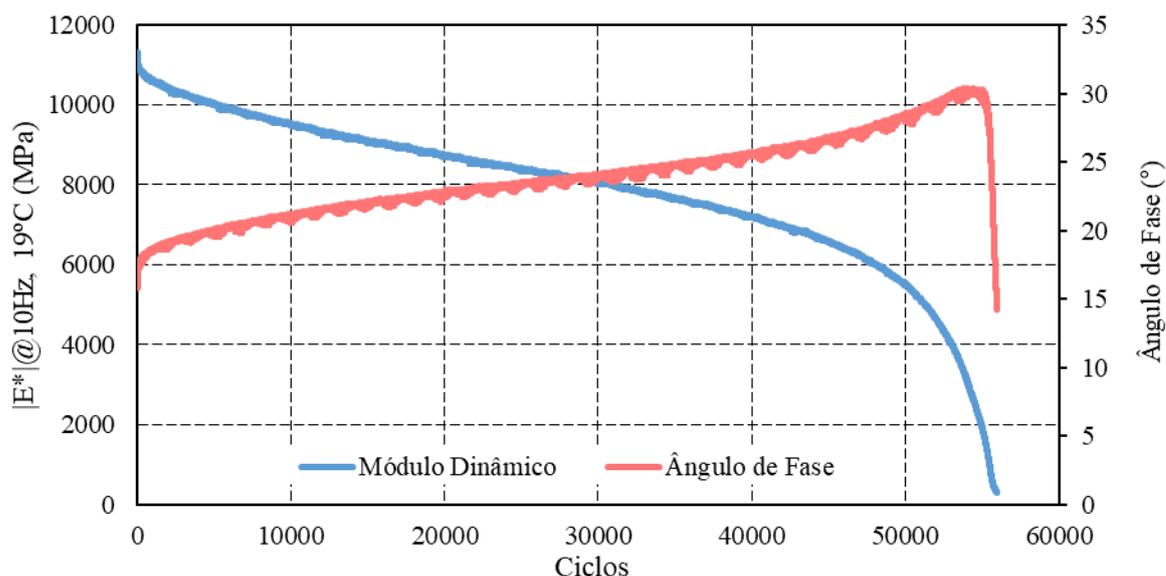
Em momento oportuno deste trabalho, os valores de FAF passaram pelo teste de correlações com os níveis de dano obtidos pelo software FlexPAVE, de modo a verificar a significância da análise deste parâmetro, e a possibilidade de criar intervalos de valores de FAF que representem a qualidade da mistura frente ao dano por fadiga.

4.2 MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO

Os resultados obtidos pelo modelo S-VECD foram obtidos para ensaios conduzidos em diferentes condições, variando a amplitude da deformação. Foi utilizada uma amostra para cada nível de deformação pré-determinado (cerca de 150, 200, e 250 μ S). Antes de cada ensaio de fadiga, realizou-se um ensaio de módulo dinâmico de tração-compressão de curto prazo (teste de *fingerprint*) para obter a variação da rigidez entre as amostras.

Foram geradas em um primeiro momento as curvas de módulo dinâmico e ângulo de fase versus o número de ciclos para cada amostra, de modo a verificar o ciclo de ruptura da amostra. O módulo dinâmico cai constantemente enquanto o ângulo de fase sobe até o pico, onde ocorre uma queda súbita que caracteriza a ruptura. O número de ciclos no pico do ângulo de fase é determinado como o valor de Nf (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga



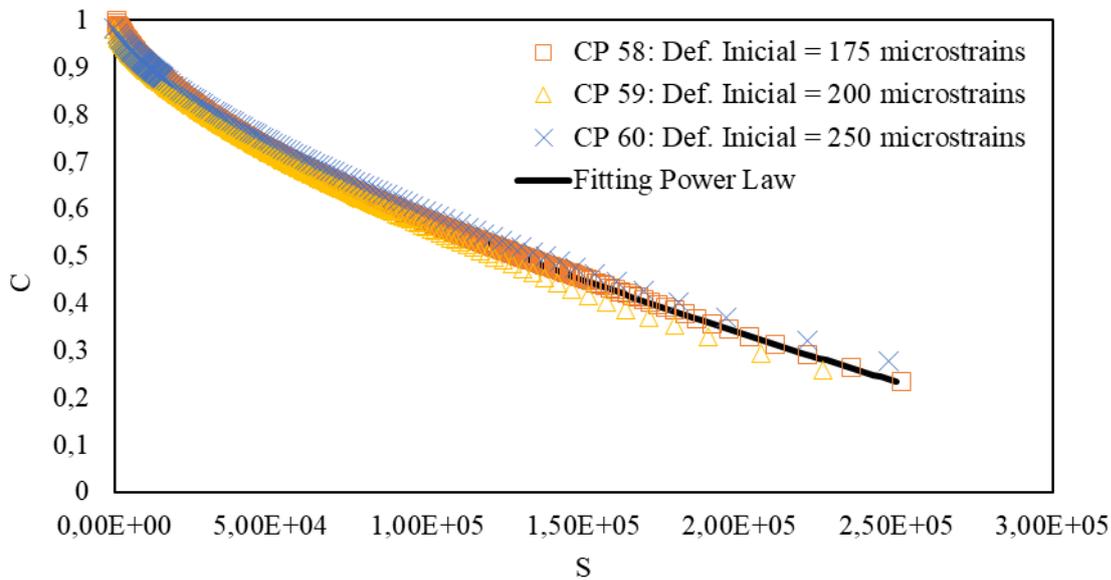
Fonte: Paniz (2018)

A C versus S é uma curva característica do material. Os valores de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) são resultantes da rotina computacional no MATLAB com os dados resultantes do ensaio de módulo complexo e do ensaio de fadiga a tração-compressão. Com os valores de C e S é possível gerar curvas de integridade do material versus acúmulo de dano, as quais devem se sobrepor mesmo quando aplicadas deformações diferentes no ensaio. Isto foi observado para todas as misturas desta pesquisa.

Para o conjunto de curvas de cada mistura foi feito um *fitting*, para obter a curva característica da mistura (Figura 4.5). A equação do modelo de potência (*Power Law*) utilizada é do tipo: $C = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}}$, onde C_{11} e C_{12} são as constantes de regressão.

Observa-se que os resultados apresentados foram obtidos em diferentes amplitudes de carga e deformação. A evolução da integridade do material e o dano acumulado em relação ao crescimento do número de ciclos são muito diferentes para cada nível de deformação. Para validar a hipótese de que a curva característica de dano é uma propriedade do material, e independente das condições de carregamento e da temperatura, como mostrado por Daniel & Kim (2002), as curvas obtidas quando plotadas integridade por dano para cada amostra devem colapsar umas sobre as outras.

Figura 4.5 - Curvas C vs S da mistura U2-DAER-FXB-50/70



É possível verificar que os ensaios e a aplicação do modelo de dano contínuo foram realizados com sucesso pois, embora com deformações diferentes, os CP's de uma mesma mistura possuem o mesmo comportamento frente ao dano. Esta verificação é válida pois as curvas C vs S das amostras de uma mesma mistura se sobrepõem conforme teorizado pelo modelo S-VECD. As curvas C vs S individuais de cada amostra para cada mistura e o ajuste do *fitting* são apresentados com mais detalhes no Apêndice IV.

Nesta pesquisa a taxa de variação média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio (G^R) desenvolvida por Sabouri e Kim (2014) foi utilizada como o critério de falha por fadiga, gerando as envoltórias de ruptura G^R vs N_f . Estas envoltórias são ajustadas por um modelo de potência (Equação 80) apresentando formato linear na escala logarítmica, com o G^R correlacionando fortemente com o N_f . A partir do R^2 da equação é também possível verificar a uniformidade dos ensaios.

$$G^R = Y \times N_f^\Delta \quad (80)$$

Onde Y e Δ são os coeficientes do ajuste.

Na Tabela 4.2 são apresentados os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos pelo fitting da curva C vs S e os coeficientes Y e Δ das envoltórias de ruptura para cada uma das misturas.

Tabela 4.2 - Coeficientes C_{11} , C_{12} , Y e Δ para cada mistura

Mistura	Fitting curvas C x S			Gr vs Nf	
	C10	C11	C12	Y	Δ
U1-DAER-FXA-50/70	1	0,00040	0,61683	367490145	-1,640
U2-DAER-FXB-50/70	1	0,00025	0,64680	8216632	-1,210
U2-DNIT-FXC-60/85	1	0,00042	0,60715	11537547	-1,290
U2-DNIT-FXC-65/90	1	0,00057	0,57350	31453554	-1,350
U3-DAER-FXB-ECO	1	0,00468	0,43244	8671099	-1,230
U4-DNIT-FXC-50/70	1	0,00040	0,62191	61637215	-1,450
U4-DNIT-FXB-50/70	1	0,00047	0,60442	18965136	-1,370
U5-DNIT-FXB-60/85	1	0,00074	0,56745	10761297	-1,240
U5-DNIT-FXB-ECO	1	0,00561	0,40640	1602010083	-1,728
U5-DAER-FXB-ECO	1	0,00421	0,43743	1280242	-1,050
U6-DNIT-FXC-60/85	1	0,00026	0,63430	22477043	-1,340
U7-DNIT-FXC-60/85	1	0,00166	0,50340	1144173908147	-2,720
U8-DNIT-FXB-50/70	1	0,00047	0,59110	7258828	-1,230
U8-DNIT-FXC-50/70	1	0,00086	0,54630	45068115	-1,450
U9-DNIT-FXC-60/85	1	0,00059	0,57780	6270982	-1,230
U9-DNIT-FXC-TLAF	1	0,00101	0,48105	2691812	-1,390
U10-DNIT-FXC-50/70	1	0,00032	0,62960	336507266	-1,649
U11-DAER-FXA-50/70	1	0,00020	0,68860	802919	-1,093
U12-DAER-FXB-60/85	1	0,00040	0,61683	847158	-1,101
U12-DAER-FXC-60/85	1	0,00087	0,55024	519809	-0,983
U13-DNIT-FXB-50/70	1	0,00037	0,63159	1718654926	-1,870
U14-DNIT-FXC-50/70	1	0,00043	0,63639	1191290	-1,130
U14-DNIT-FXB-50/70	1	0,00024	0,66716	1426851634	-1,835
U14-DNIT-FXC-60/85	1	0,00038	0,62707	2621604	-1,210

Na Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 estão exibidas as curvas C vs S para todas as misturas e em sequência para as misturas separadas por tipo de ligante.

Figura 4.6 - Curvas características de dano (C vs S) para as todas as misturas

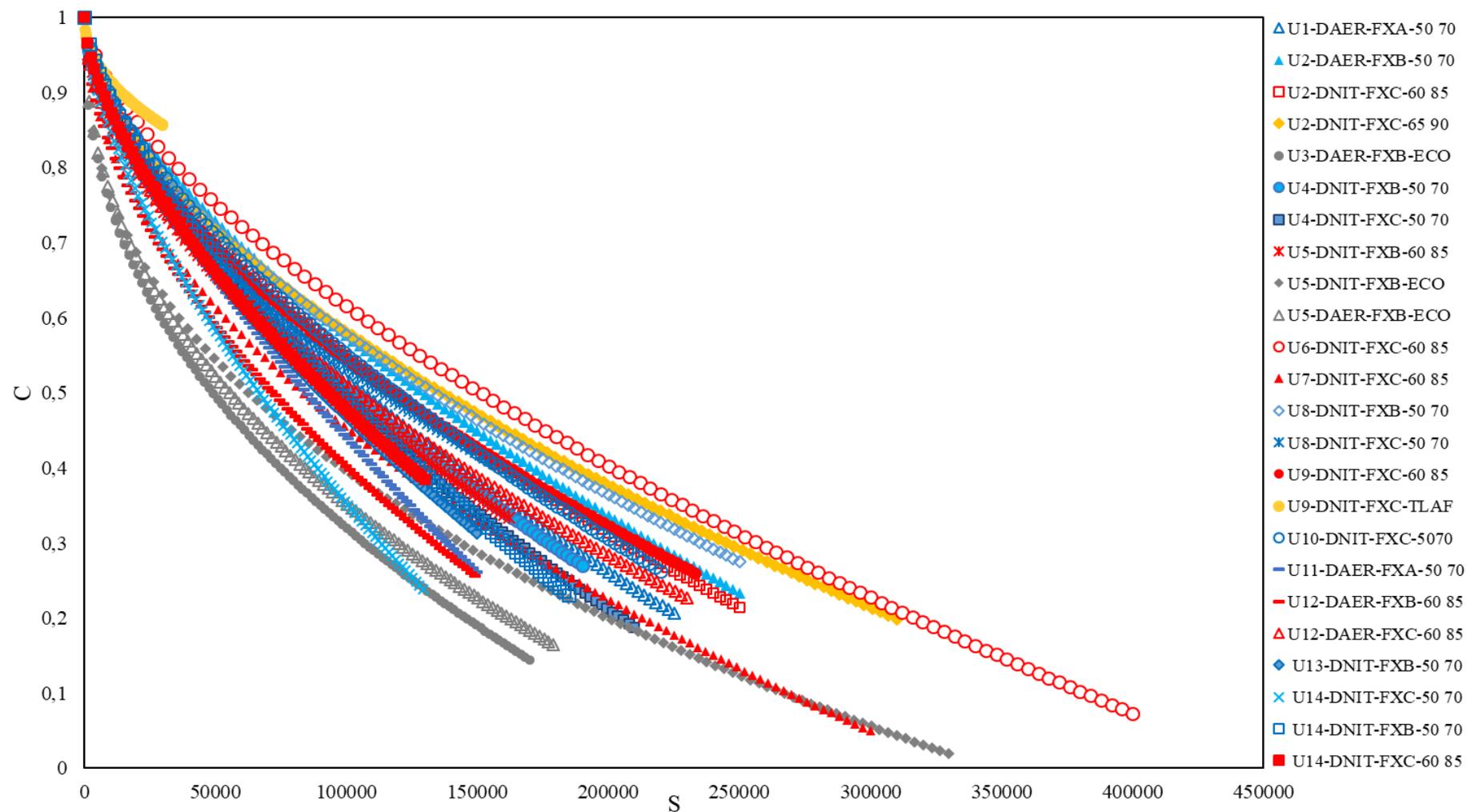


Figura 4.7 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com CAP 50/70

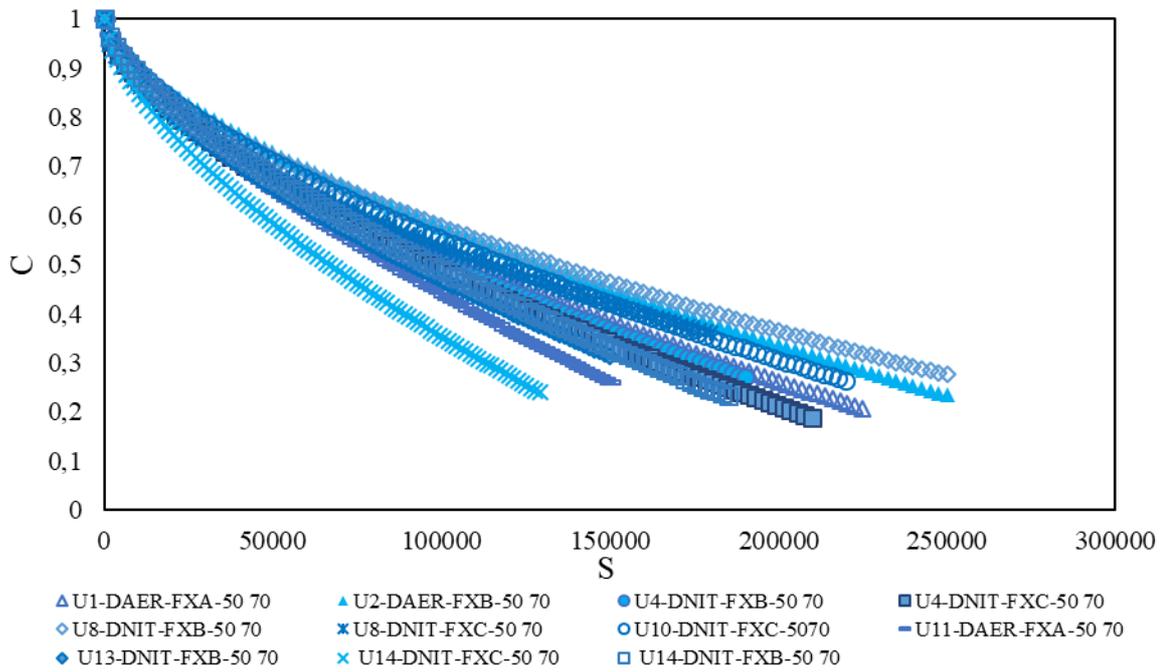


Figura 4.8 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com ligantes AMP 60/85 e AMP 65/90

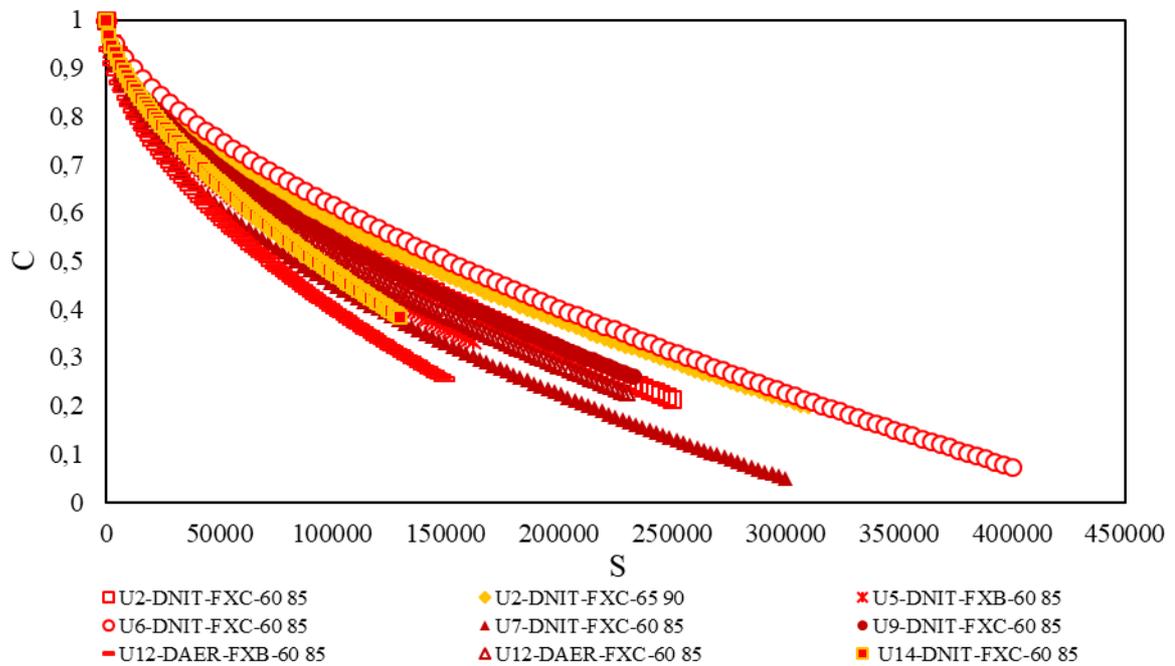
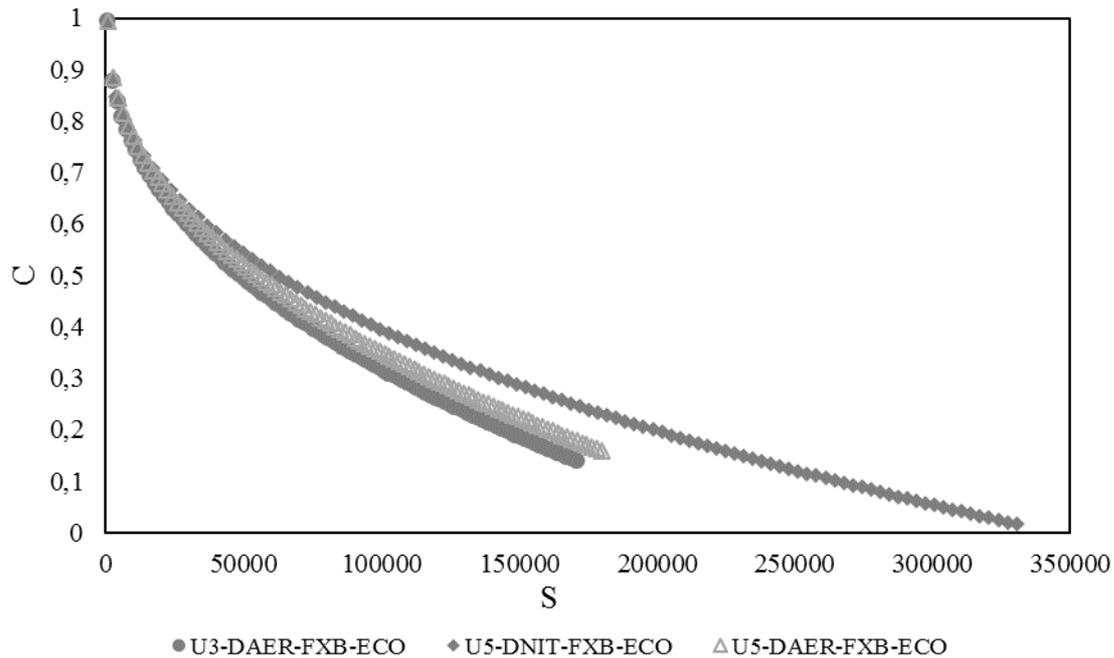


Figura 4.9 - Curvas características de dano (C vs S) para as misturas com asfalto borracha



A partir das curvas características de dano das misturas, é possível realizar algumas observações quanto a evolução do dano e da integridade, embora o desempenho à fadiga seja melhor analisado em conjunto com as envoltórias de ruptura e com as simulações sob condições reais de pavimentos.

Percebe-se de acordo com a Figura 4.6, onde estão plotadas todas as curvas C vs S obtidas, que as misturas com ligante convencional em tons de azul, e as misturas com ligante modificado por polímero em tons de vermelho, apresentam curvas que via de regra se intercalam e possuem comportamento próximos. Usualmente estas misturas rompem para um nível de perda de integridade semelhante, na maior parte dos casos dentro do intervalo de C entre 0,4 e 0,2, exceto para as misturas com ligante modificado U6-DNIT-FXC-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85, entretanto ambas misturas apresentam a peculiaridade de serem as únicas duas desta pesquisa que a modificação do ligante foi feita na própria usina de produção da mistura, com introdução in-loco do polímero SBS.

De forma a demonstrar como o comportamento das misturas com ligante convencional e modificado por polímero é parecido, é possível visualizar na Figura 4.6 que ambos os tipos de ligante exibem um intervalo de dano que compreende valores similares. Misturas com ligante convencional demonstram intervalos de 130000 a 250000 no eixo da variável S (U14-DNIT-FXC-50/70 e U2-DAER-FXB-50/70 respectivamente); e misturas com ligante modificado também exibem intervalos de 130000 a 250000 no eixo da variável S (U14-DNIT-

FXC-60/85 e U2-DNIT-FXC-60/85 respectivamente). Desta forma visto que todas outras misturas se encaixam dentro deste intervalo (exceto U6-DNIT-FXC-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85), é presumível afirmar que o comportamento das curvas C vs S é similar para misturas com variação de ligante convencional e modificado, dado o fato que exibem intervalos de ruptura com valores próximos tanto de integridade quanto de dano induzido.

A mistura U2-DNIT-FXC-65/90 apresentou ruptura em nível de integridade semelhante as misturas com ligante modificado, mas demonstrou maior tolerância a danificação, rompendo em um nível de dano acima das demais.

As misturas com asfalto borracha U3-DAER-FXB-ECO, U5-DAER-FXB-ECO e U5-DNIT-FXB-ECO apresentam comportamento visivelmente diferentes as demais. De forma geral, as curvas com este ligante são as que apresentam maior perda de integridade quando se analisa o mesmo nível de dano induzido para as misturas. Verifica-se uma perda de integridade muito elevada nos ciclos iniciais do ensaio, tendência que se mantém por boa parte dos ciclos, quando uma sutil queda na taxa de evolução da integridade passa a ser percebida. É possível observar aqui que as misturas com ligante convencional (50/70) na maioria dos casos não apresentam essa concavidade na curva de dano, ou uma concavidade muito sutil; apresentando uma tendência de taxa constante de evolução da integridade pelo dano induzido. Ao contrário, misturas com ligante modificado por polímero (60/85) e (65/90) demonstram uma pequena queda na taxa de perda de integridade, não tão acentuada quanto as misturas com asfalto borracha, mas mais visíveis do que as misturas com ligante convencional. Esse fato pode indicar que estas misturas, ao perder integridade e rigidez, passam a apresentar uma maior tolerância ao dano. Verifica-se que as misturas com asfalto borracha são também as que apresentam ruptura com o menor nível de integridade do material; U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO rompendo com níveis menores que 0,2 de integridade, e U5-DNIT-FXB-ECO com nível de integridade muito próximo a zero. O mesmo fato ocorre para as misturas U6-DNIT-FXC-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85, que apresentam a ruptura com integridade muito próxima a zero.

A mistura U9-DNIT-FXC-TLAF apresentou um comportamento a parte das demais curvas características de dano. Conforme a Figura 4.6, pode-se notar que a mistura progride a indução de dano respondendo com a menor perda de integridade dentre todas as misturas, entretanto apresenta ruptura com o nível de integridade muito alto, em torno de $C = 0,85$. Visto esta peculiaridade, diversas amostras foram ensaiadas, com todas apresentando este tipo de comportamento. Como estas amostras rompiam para um número reduzido de ciclos, muitas delas foram descartadas visto a perturbação nos dados, e curvas C vs S não se sobrepondo umas

às outras. Este comportamento exclusivo da mistura parece estar ligado com a alta rigidez das amostras, que necessitavam de grandes deslocamentos do atuador da prensa para atingir os níveis de deformação impostos (entre 150 e 300 μ s), ocasionando uma ruptura de caráter frágil nos corpos de prova. Além disso, nesta mistura, após a ruptura dos corpos de prova, verificou-se um grande número de agregados fraturados (Figura 4.10), sendo estes de origem granítica. Isso levanta a hipótese que a rigidez como um todo da mistura levou a uma solicitação maior de tensões na amostra e também nos agregados, que acabaram por sofrer um maior nível de fraturamento em relação as demais.

Figura 4.10 - Amostra rompida da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF com elevado número de agregados fraturados



Entretanto, conforme observado por Faccin (2018) e apresentado na Tabela 3.3, os resultados de abrasão da pedra P10, que correspondem aos agregados das misturas da usina U9, são satisfatórios, não diferindo significativamente dos demais agregados avaliados pelo autor. A mistura U9-DNIT-FXC-60/85 da mesma usina e com mesmo agregado não apresentou tais condições de fraturamento, embora esta apresente rigidez menor.

Verificou-se um nível não satisfatório no parâmetro DMR da mistura com ligante TLA Flex, com valores da ordem 1,2; acima do valor do intervalo de 0,9 a 1,1 admitido, de maneira que a rigidez apresentada no ensaio de módulo complexo é menor do que as das amostras ensaiadas a fadiga. Este fato deve-se provavelmente a moldagem das amostras ter sido realizada por dois operadores diferentes, embora com o mesmo processo metodológico. Torna-se assim pertinentes maiores investigações quanto ao ensaio de fadiga a tração-compressão em misturas com ligante TLA Flex.

Quando se observa apenas as curvas C vs S de misturas com ligante convencional (Figura 4.7), nota-se a proximidade dos valores de integridade no momento da ruptura, com as curvas muito próximas umas às outras, exceto para a mistura U14-DNIT-FXC-50/70 que apresenta uma progressão maior de perda de rigidez para mesmos níveis de dano. No lado oposto estão as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U8-DNIT-FXB-50/70 que apresentam a maior tolerância ao dano entre as misturas com ligante convencional.

O mesmo é possível observar para as curvas C vs S com ligante modificado (Figura 4.8), que se apresentam agrupadas, com distinção nos níveis de dano no momento da ruptura. As curvas para misturas de asfalto borracha também apresentam tal característica (Figura 4.9).

Quando se verifica a influência da rigidez no comportamento das curvas C vs S, é possível observar de maneira clara que quanto maior a rigidez da mistura menor a perda de integridade para o mesmo nível de dano. Conforme a Figura 4.9, as misturas de asfalto borracha (em cinza) que exibem as menores rigidezes, são as que apresentam a maior perda de integridade, ao passo que as misturas com os maiores módulos vão apresentando curvas gradativamente mais altas, exibindo menor perda de rigidez. De modo a exemplificar a questão, toma-se a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Módulo Dinâmico das misturas separadas por tipo de ligante

<i>Mistura</i>	<i> E* @21° 10Hz (MPa)</i>	<i>Mistura</i>	<i> E* @21° 10Hz (MPa)</i>
U1-DAER-FXA-50/70	11972	U2-DNIT-FXC-60/85	12370
U2-DAER-FXB-50/70	12958	U2-DNIT-FXC-65/90	11353
U4-DNIT-FXC-50/70	11480	U5-DNIT-FXB-60/85	10995
U4-DNIT-FXB-50/70	11835	U6-DNIT-FXC-60/85	10869
U8-DNIT-FXB-50/70	15838	U9-DNIT-FXC-60/85	10208
U8-DNIT-FXC-50/70	12045	U12-DAER-FXB-60/85	8226
U10-DNIT-FXC-50/70	13240	U12-DAER-FXC-60/85	8852
U11-DAER-FXA-50/70	10424	U14-DNIT-FXC-60/85	10634
U13-DNIT-FXB-50/70	10510	U3-DAER-FXB-ECO	6019
U14-DNIT-FXC-50/70	9157	U5-DNIT-FXB-ECO	7658
U14-DNIT-FXB-50/70	11641	U5-DAER-FXB-ECO	6951

Para os ligantes convencionais (em azul) a mistura de maior módulo U8-DNIT-FXB-50/70 é a que apresenta a menor perda de integridade por dano, ao passo que a mistura U14-DNIT-FXC-50/70 de módulo mais baixo, a que perde integridade mais rápido. O mesmo decorre para as misturas de ligante modificado por polímero e as misturas com asfalto borracha (em vermelho e cinza respectivamente). Entretanto, quando comparadas conjuntamente as curvas e as rigidezes das misturas com ligante convencional e modificado, não é possível fazer

essa inferência, visto que as misturas de ligante modificado, mesmo com módulos mais baixos se intercalam entre as curvas das misturas com ligante convencional de maiores rigidezes.

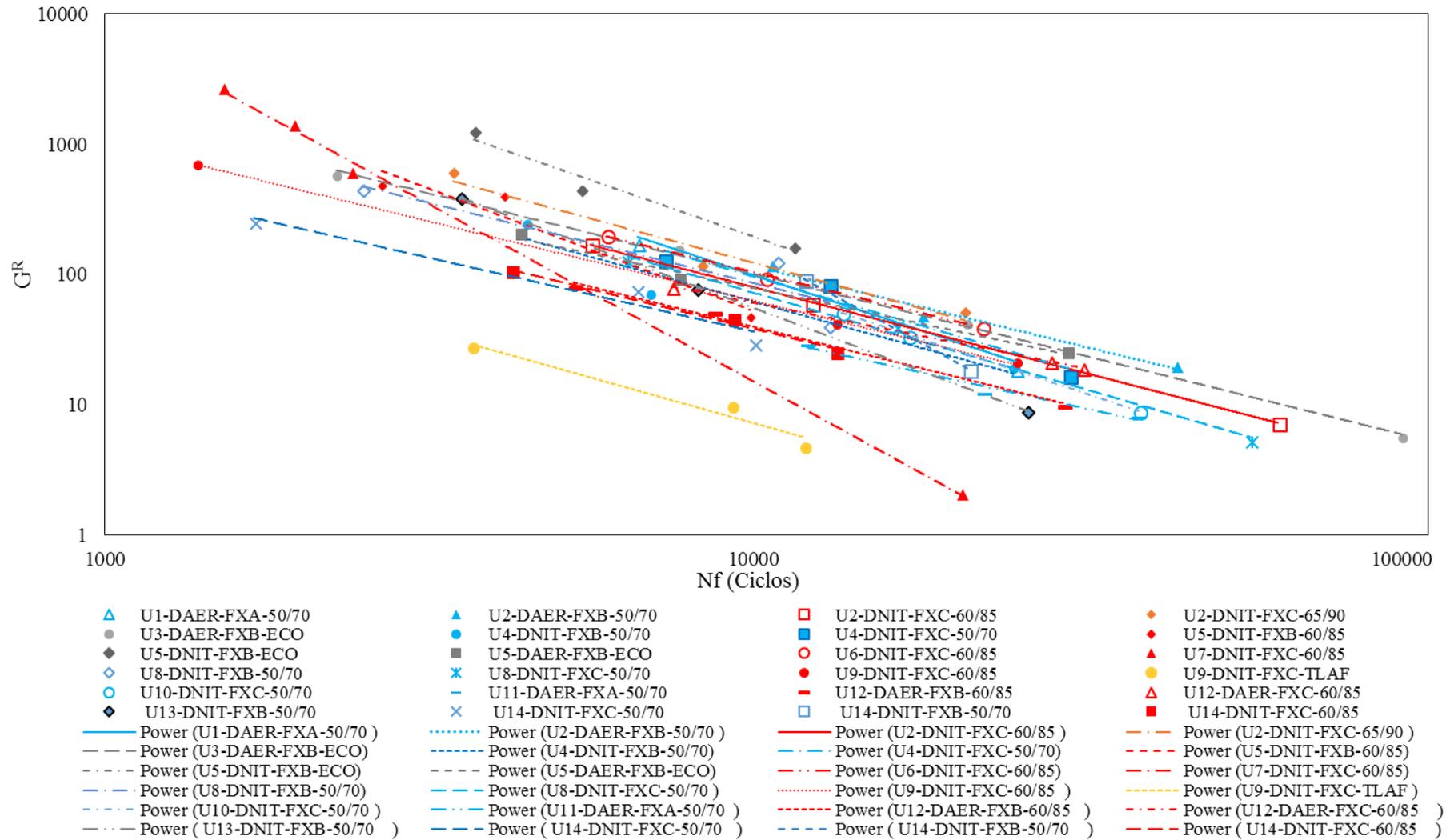
Quanto a influência da granulometria nas curvas C vs S não foi possível estabelecer correlações satisfatórias. Tanto quando se analisa superficialmente pela faixa granulométrica utilizada, quando se busca correlações em variáveis que expliquem melhor a granulometria, como os parâmetros da metodologia Bailey; porcentagens passante nas malhas 3/8", #4 e #200; composição nas frações 3/4", 3/8" e pó de pedra. Para a mistura U14-DNIT-FXC-50/70 que fica visivelmente afastada do grupo das demais curvas de dano para ligante convencional, foi possível verificar que esta é a mistura com o maior valor do parâmetro AG da metodologia Bailey ($AG = 1,40$), enquanto a média dos AGs apresentou valor de 0,81; o que indica que há uma presença maior de agregados graúdos no esqueleto pétreo desta mistura, em relação as outras.

Em contrapartida, a curva que mais se aproxima da mistura U14-DNIT-FXC-50/70 é a da mistura U11-DAER-FXA-50/70, uma mistura de composição mais fina, com AG igual a 0,91; porcentagem passante na malha 3/8" de 94,6%; e porcentagem passante na malha #200 de 11,46%. Este fato acaba por colaborar com a verificação de que a significância da granulometria nas curvas características de dano não é possível quando analisada de modo simplista, de tal forma que uma análise estatística de mais rigor deva ser testada. Este assunto, e uma análise de todos os parâmetros das misturas nas respostas de dano serão novamente abordados em seção subsequente.

Na Figura 4.11 estão plotadas as curvas G^R vs Nf. As curvas discretizadas uma a uma, com o R^2 de cada mistura se encontram no Apêndice V deste trabalho.

Visto que as envoltórias de ruptura G^R vs Nf são relatadas por Sabouri et al. (2014) como uma propriedade fundamental do material em termos de tolerância ao dano, que independe da temperatura e modo de carregamento, cabe a análise destas para inferência a resistência a fadiga. Contudo, cabe ressaltar novamente que para a comparação de resistência a fadiga em diferentes misturas, deve ser considerado uma estrutura específica de pavimento para que se capture o efeito da rigidez das mesmas.

Figura 4.11 - Envoltórias de ruptura G^R vs N_f



Conforme a Figura 4.11, pode-se perceber assim como nas curvas C vs S , um agrupamento de envoltórias de ruptura mesmo para misturas com diferentes tipos de ligante. Este comportamento indica que a grande parte das misturas apresenta uma taxa de dissipação de energia de pseudo deformação próxima.

Dentre as vinte e quatro misturas, algumas despontam com comportamento distintos das demais. Misturas com melhor desempenho à fadiga tendem a apresentar envoltórias localizadas mais acima e à direita além de inclinações menores, o que significa que, para um mesmo valor de G^R , estas misturas apresentam um N_f superior (SABOURI et al., 2015).

Verifica-se desta forma o pior comportamento para a mistura U9-DNIT-FXC-TLAF, que quando analisada as curvas C vs S , era a que perdia integridade com a menor taxa por ciclo, entretanto rompia para um nível de dano muito pequeno. Novamente vale ressaltar a alta rigidez da mistura, comportamento que não foi verificado no ensaio de módulo complexo, mas que está presente em outros ensaios, como a penetração do ligante, os índices de flexibilidade e tenacidade, o módulo de resiliência e o módulo dinâmico obtido no *fingerprint* do ensaio de fadiga.

Em oposição ao comportamento da mistura com ligante TLA Flex, estão as misturas mais flexíveis e de menor rigidez, com asfalto borracha, que habitam a zona superior do diagrama, esse fato pode indicar um melhor comportamento a fadiga destas misturas. Pode-se observar também pelas curvas C vs S que estas misturas são as que perdem integridade mais rápido, entretanto rompem para níveis de dano maiores e com integridades quase nulas.

Nota-se também um desempenho distinto para a mistura U7-DNIT-FXC-60/85, que demonstra uma inclinação da curva muito superior as demais, ao mesmo tempo de se encontra em uma posição mais próxima ao canto inferior esquerdo, indicando maiores taxas de dissipação em forma de dano, baixos N_f e, portanto, um pior desempenho frente à fadiga.

Quando se busca uma comparação com o fator de área de fadiga (FAF) obtido por meio das curvas de Wöhler, encontra-se correlações próximas, entre misturas com indícios de bom ou ruim comportamento como as citadas acima. As misturas com asfalto borracha U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO; a mistura U2-DNIT-FXC-65/90 e a mistura U2-DAER-FXB-50/70, todas entre as 5 melhores classificadas pelo parâmetro FAF se encontram nas posições mais elevadas e a direita do diagrama das envoltórias de ruptura. Ao mesmo tempo, misturas como U9-DNIT-FXC-TLAF e U7-DNIT-FXC-60/85 com indícios de mau desempenho à fadiga pelas curvas G^R vs N_f , também são piores classificadas pelo critério FAF. Como exceção, a mistura U5-DNIT-FXB-ECO, superior as demais nas envoltórias de ruptura, mas com uma classificação intermediária (14°) pelo parâmetro FAF.

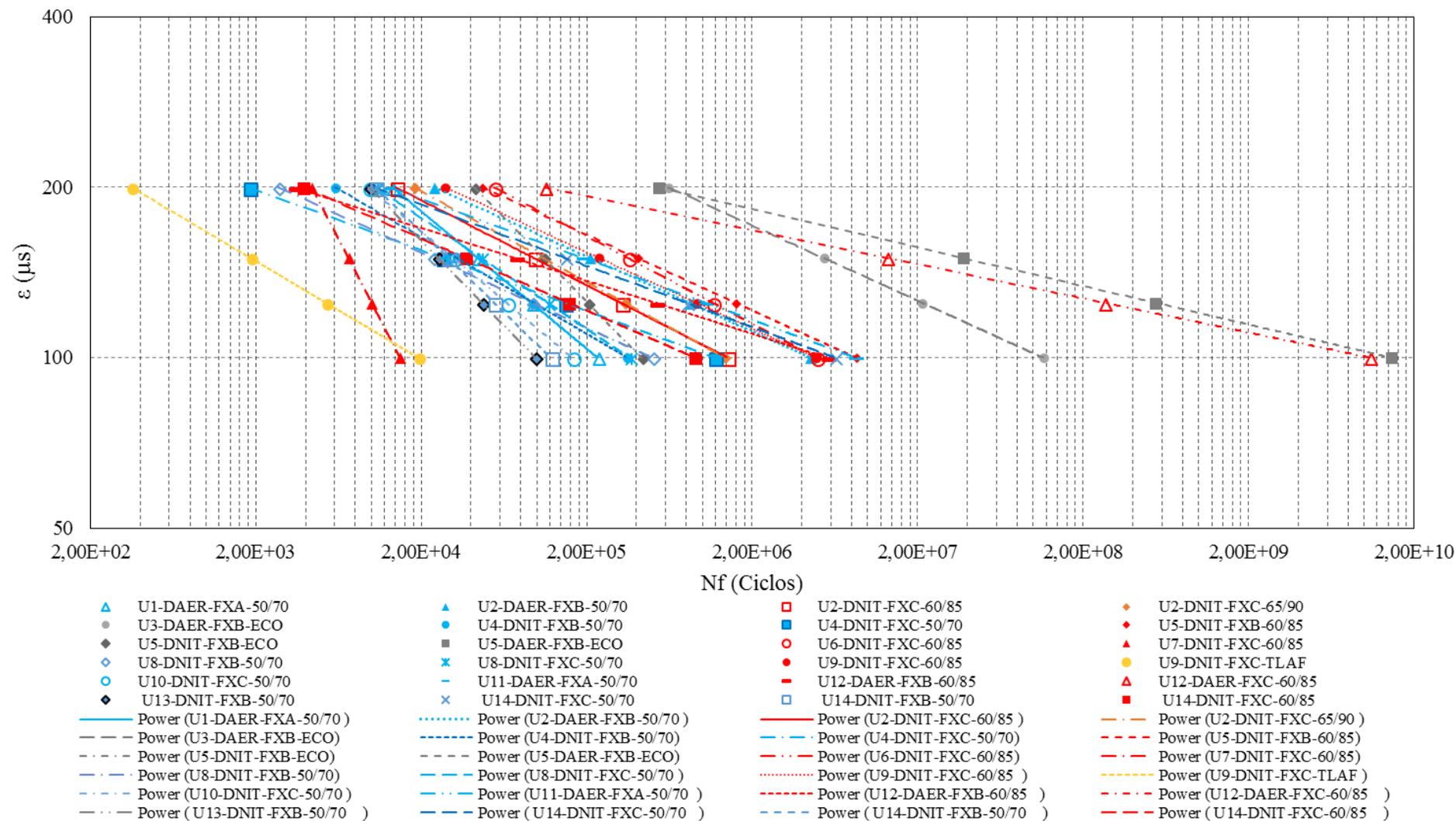
Constata-se que apenas as misturas com comportamentos específicos conseguem ser analisadas deste modo superficial, ao passo que a maioria das misturas apresentam comportamentos próximos e de análise indicativa de desempenho duvidosa apenas pelas curvas G^R vs N_f .

Para uma análise precisa da resistência à fadiga das misturas se faz necessário a avaliação conjunta das curvas C vs S e das envoltórias de ruptura com as características de rigidez do material, aplicadas então em uma estrutura de pavimento, simulando situações próximas as reais de clima e tráfego. Posteriormente, com os danos simulados por esta análise, serão novamente avaliados pontos importantes nas curvas C vs S e nas envoltórias G^R vs N_f .

4.2.1 Simulação do comportamento a fadiga pelo critério de falha G^R e coeficientes do modelo S-VECD

Outra análise realizada com os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão foi a utilização da proposta de simulação de ciclos de ruptura desenvolvida por Nascimento (2016). A equação proposta por Nascimento (2016) abrange os parâmetros das curvas C vs S , as envoltórias de ruptura G^R e os dados da caracterização viscoelástica obtidos nos resultados dos ensaios, dessa forma, o N_f encontrado é considerado mais próximo da realidade de ensaio. O processo metodológico e as equações para o cálculo das curvas $\epsilon \times N_f$ estão descritos no trabalho de Paniz (2018). Os dados de N_f obtidos para cada deformação e o modelo de potência de cada mistura gerados pelo equacionamento se encontram no Apêndice VI. Na Figura 4.12 encontram-se os resultados graficados para as todas misturas.

Figura 4.12 - Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura GR, 19°C e 10HZ.



Considerando na Figura 4.12 o comportamento de vida de fadiga a 19°C, as misturas com asfalto borracha U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO e a mistura U12-DAER-FXC-60/85, são as que apresentam os melhores desempenhos. Percebe-se um segundo grupo de misturas composto por misturas modificadas por polímero (60/85 e 65/90) e por misturas com ligante convencional 50/70. Quando se analisa este grupo, verifica-se que mesmo com comportamentos parecidos, as misturas com ligante modificado exibem melhores desempenhos, principalmente em níveis menores de deformação (100 μ s), com uma tendência de perda de padrão deste comportamento à medida que se analisa deformações mais altas (200 μ s), quando as misturas de ligante convencional e modificado começam a apresentar uma semelhança maior. Novamente as misturas U7-DNIT-FXC-60/85 e U9-DNIT-FXC-TLAF apresentaram o pior desempenho.

O fator de área de fadiga FAF foi novamente aplicado para as misturas seguindo a nova abordagem com o critério de ruptura G^R (Tabela 4.4). Mostra-se também na tabela o FAF calculado para as curvas de Wohler, para fins de comparação.

Tabela 4.4 - Classificação e comparação dos FAF para o modelo com o uso do S-VECD e pelas curvas de Wöhler para os dados brutos de ensaio

Mistura	FAF Simulação Gr	Mistura	FAF Wohler Exp
U5-DAER-FXB-ECO	1°	U5-DAER-FXB-ECO	1°
U12-DAER-FXC-60/85	2°	U3-DAER-FXB-ECO	2°
U3-DAER-FXB-ECO	3°	U12-DAER-FXC-60/85	3°
U5-DNIT-FXB-60/85	4°	U2-DNIT-FXC-65/90	4°
U11-DAER-FXA-50/70	5°	U2-DAER-FXB-50/70	5°
U14-DNIT-FXC-50/70	6°	U9-DNIT-FXC-60/85	6°
U12-DAER-FXB-60/85	7°	U6-DNIT-FXC-60/85	7°
U6-DNIT-FXC-60/85	8°	U8-DNIT-FXC-50/70	8°
U9-DNIT-FXC-60/85	9°	U10-DNIT-FXC-50/70	9°
U2-DAER-FXB-50/70	10°	U11-DAER-FXA-50/70	10°
U2-DNIT-FXC-60/85	11°	U4-DNIT-FXC-50/70	11°
U2-DNIT-FXC-65/90	12°	U12-DAER-FXB-60/85	12°
U4-DNIT-FXC-50/70	13°	U1-DAER-FXA-50/70	13°
U14-DNIT-FXC-60/85	14°	U5-DNIT-FXB-ECO	14°
U8-DNIT-FXB-50/70	15°	U13-DNIT-FXB-50/70	15°
U5-DNIT-FXB-ECO	16°	U4-DNIT-FXB-50/70	16°
U8-DNIT-FXC-50/70	17°	U14-DNIT-FXB-50/70	17°
U4-DNIT-FXB-50/70	18°	U9-DNIT-FXC-TLAF	18°
U1-DAER-FXA-50/70	19°	U2-DNIT-FXC-60/85	19°
U10-DNIT-FXC-50/70	20°	U14-DNIT-FXC-60/85	20°
U14-DNIT-FXB-50/70	21°	U8-DNIT-FXB-50/70	21°
U13-DNIT-FXB-50/70	22°	U5-DNIT-FXB-60/85	22°
U9-DNIT-FXC-TLAF	23°	U7-DNIT-FXC-60/85	23°
U7-DNIT-FXC-60/85	24°	U14-DNIT-FXC-50/70	24°

O intervalo de deformação utilizado foi de 100 a 200 μs , diferente do aplicado para as curvas de Wöhler, visto que agora conceitos mais robustos já foram utilizados para o tratamento dos dados e construção das curvas de fadiga.

Quando se analisa o ranqueamento pela simulação, distingue-se claramente que as misturas com ligantes modificados por polímero e as misturas de asfalto borracha tomam a parte superior da classificação, indicando um melhor desempenho destas frente ao fenômeno da fadiga. Algumas misturas com ligante convencional CAP 50/70 se intercalam a estas e também apresentam indicativos de melhor desempenho, entretanto a maioria das misturas com CAP 50/70 permanece nas posições inferiores, indicando que o tipo de ligante é significativo no desempenho a fadiga. Dentre as misturas que exibem as piores classificações estão a mistura com ligante TLA Flex e a mistura U7-DNIT-FXC-60/85 com modificação em obra. A mistura U5-DNIT-FXC-ECO, a mais rígida entre as três com asfalto borracha, foi a que apresentou pior comportamento em relação as outras de mesmo ligante.

Analisando a Tabela 4.4, é possível perceber que as três misturas com melhor indicativo de desempenho a fadiga se mantêm como primeiras colocadas para ambas as classificações, apenas com inversão de posição das misturas U3-DAER-FXB-ECO e U12-DAER-FXC-60/85. Entretanto misturas como U2-DNIT-FXC-60/85, U5-DNIT-FXB-60/85 e U14-DNIT-FXC-50/70 que apresentam indícios de bom desempenho pela simulação, não demonstram o mesma classificação quando analisadas nas curvas de Wöhler experimentais.

Verifica-se o fato que as três primeiras misturas são as que apresentam maiores N_f de ruptura durante os ensaios, de modo que quando se analisa conjuntamente as propriedades de rigidez, estas não alteram a classificação final, Ou seja, os valores experimentais de ruptura apresentam um peso muito grande na análise, que muitas vezes não é afetado quando analisados conjuntamente as rigidezes das misturas.

4.3 AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO EM ESTRUTURA NO SOFTWARE FLEXPAVE 1.0

Foi utilizado o software FlexPAVE 1.0 para avaliar as vinte e quatro misturas asfálticas frente ao dano acumulado por fadiga. Empregou-se para tal, uma estrutura típica de pavimento, variando apenas as características da camada de revestimento, de forma a isolar apenas o efeito desta na análise, e assim comparar as misturas entre si.

O software emprega análises viscoelásticas lineares com dano, baseando-se nos resultados do modelo S-VECD, para simular a resposta do pavimento sob ação das condições climáticas e das cargas dinâmicas impostas pelo tráfego.

Assim, em todo o tempo de simulação, tanto a pseudo rigidez (C) quanto a relação N/N_f são calculadas em pontos diferentes dentro da camada de asfalto. A relação N/N_f é obtida a partir do critério de falha G^R usando a hipótese de Miner, cujos valores variam de 0 a 1, sem danos e totalmente danificado, respectivamente. A fim de quantificar o dano à fadiga na camada asfáltica, os valores da razão N/N_f abaixo da área carregada foram calculados em média. A média é computada para uma grade de 110 pontos, conforme descrita na metodologia deste trabalho. A vantagem de usar essa abordagem para cálculo do dano é a direta consideração da distribuição de tensões e deformações ao longo de toda camada asfáltica durante a análise.

Ao aplicar o software, observa-se que, como previsto, o dano médio acumulado cai à medida que se aumenta a espessura da camada de revestimento. Além disso, quando classificadas as misturas para cada estrutura simulada, nota-se que esta classificação não muda para os diferentes cenários de espessura do revestimento, como também encontra Sabouri et al. (2015).

Desta forma, serão apresentadas as curvas de dano para cada uma das três estruturas, e a estrutura mais esbelta, que apresenta o maior intervalo de valores de dano, será utilizada para que se faça os comentários específicos a cada mistura.

Na Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 estão apresentadas as curvas de dano para cada uma das três estruturas simuladas neste trabalho: E1 com 5 cm de revestimento; E2 com 10 cm de revestimento e E3 com 15 cm de revestimento. Os valores numéricos de dano para as três estruturas, a 1, 6, 12, 24, 60 e 120 meses podem ser visualizados no Apêndice VII.

Figura 4.13 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E1

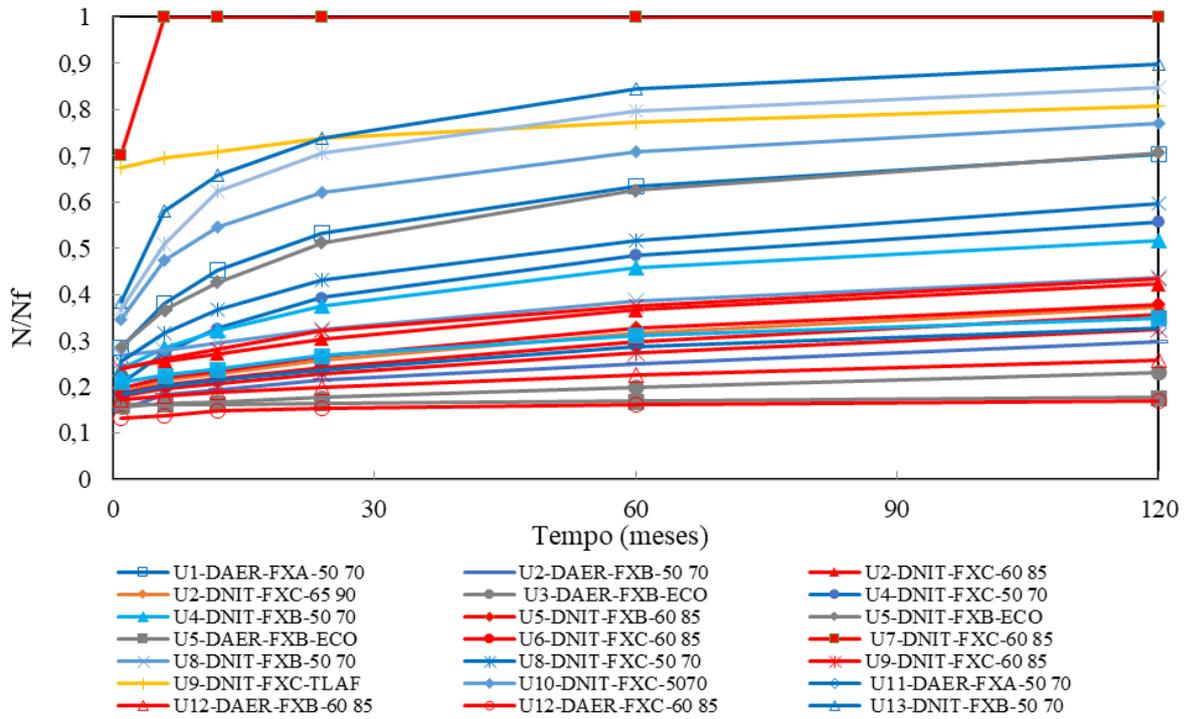


Figura 4.14 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E2

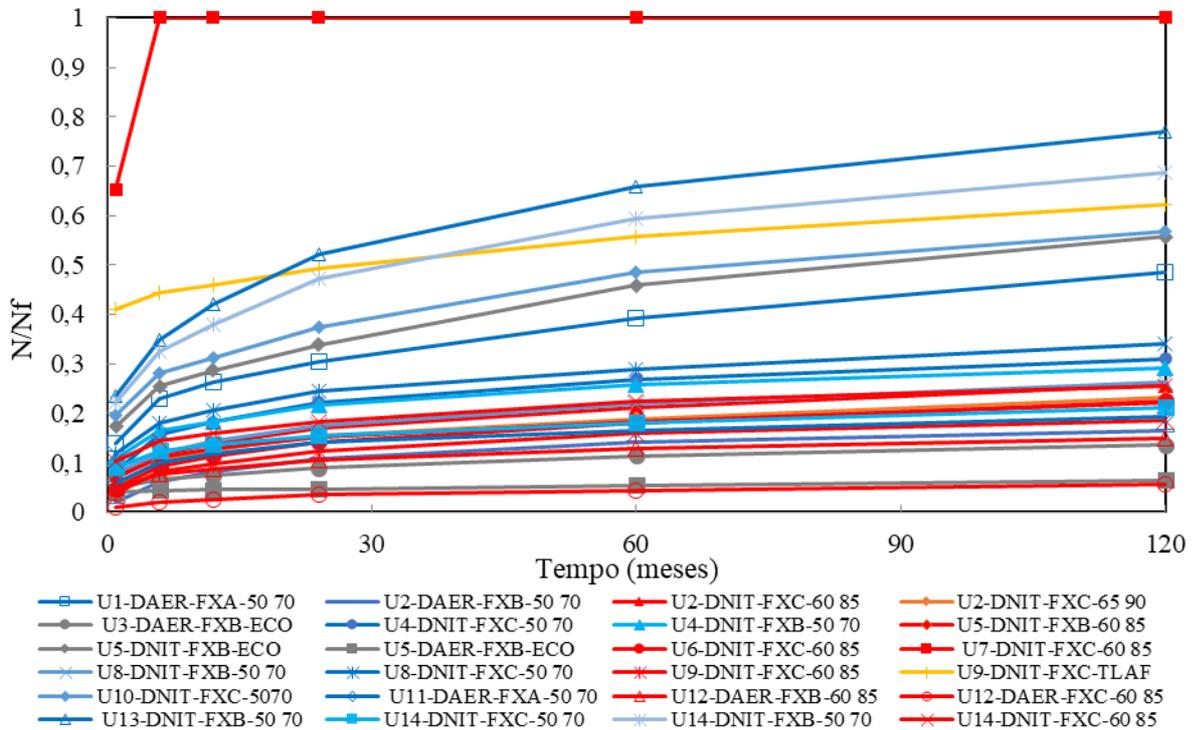
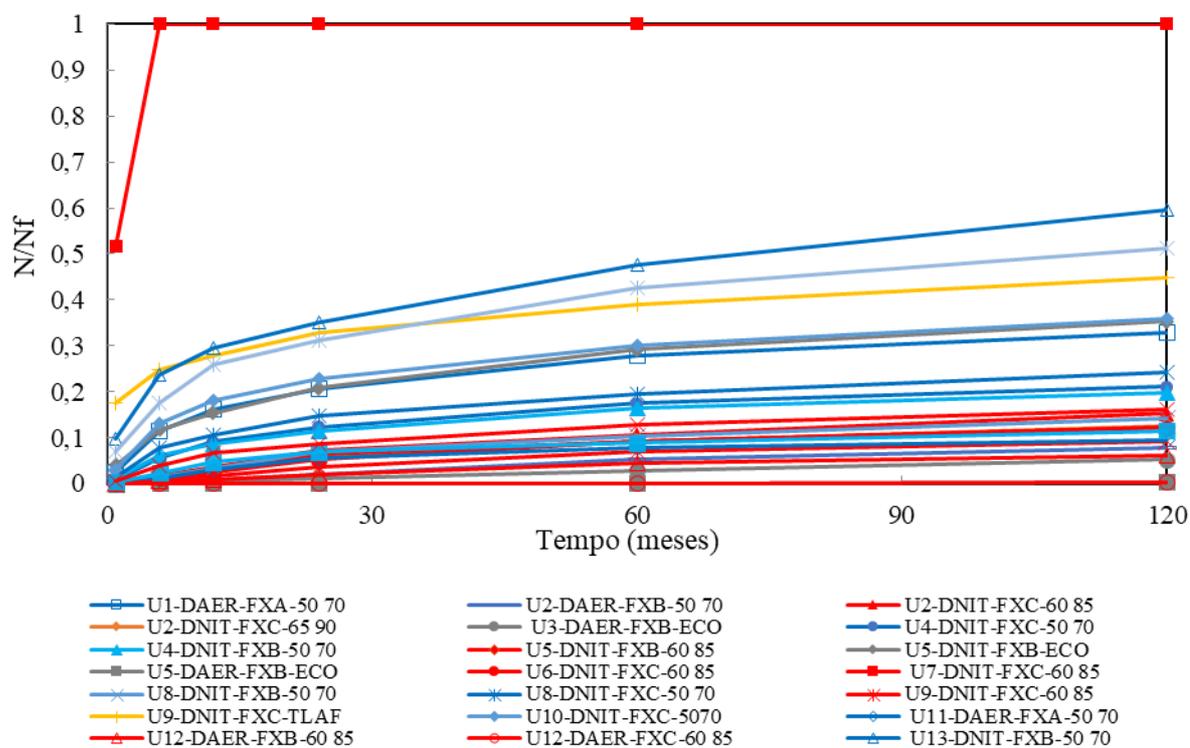


Figura 4.15 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E3

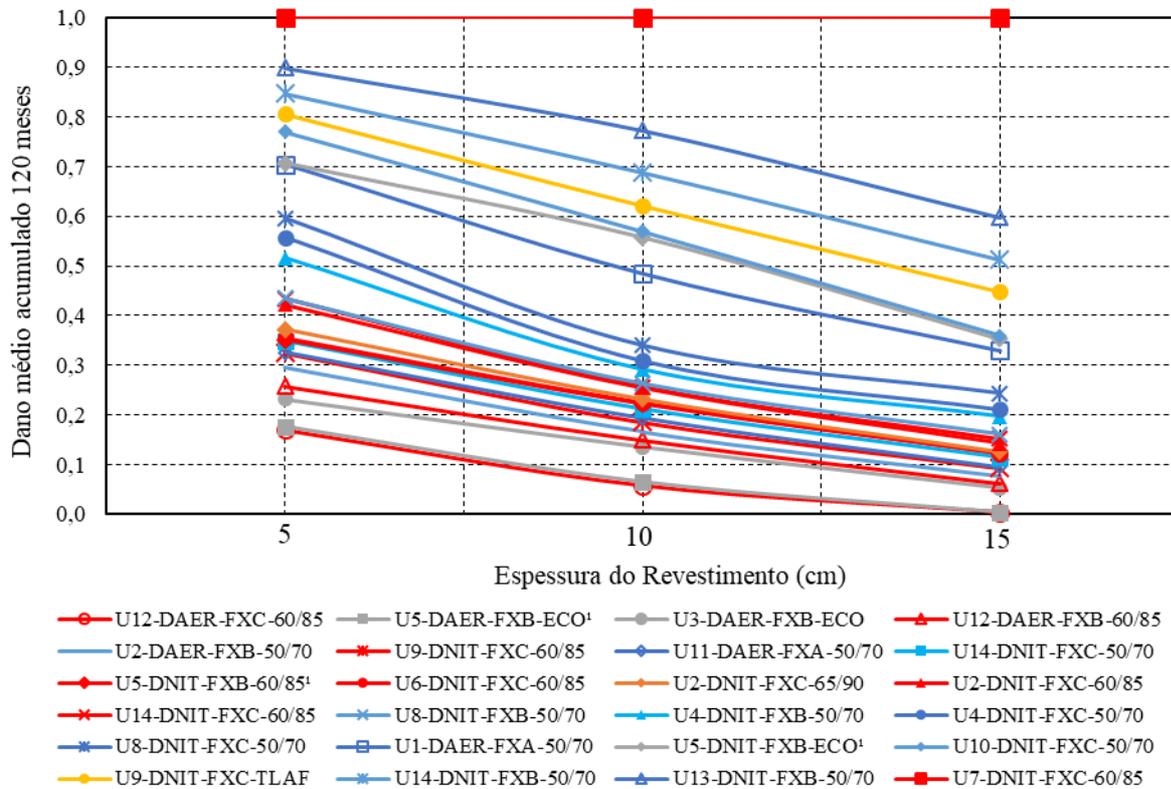


Como pode ser visualizado nas figuras apresentadas, a estrutura mais esbelta foi a que apresentou os maiores níveis de danificação, e será utilizada na seção subsequente para as análises das curvas.

Após a verificação do dano médio acumulado nas três estruturas, foi possível verificar que a classificação das misturas, pelo nível de dano em 120 meses não se alterou, como mostra a Figura 4.16.

Observa-se também que existem diferentes tendências nas curvas quando plotadas dano pela espessura. Existem misturas em que ao se aumentar a espessura do revestimento a queda no dano se dá de maneira linear, enquanto outras exibem comportamentos de polinômios de segunda ordem seja com a concavidade voltada para cima ou para baixo.

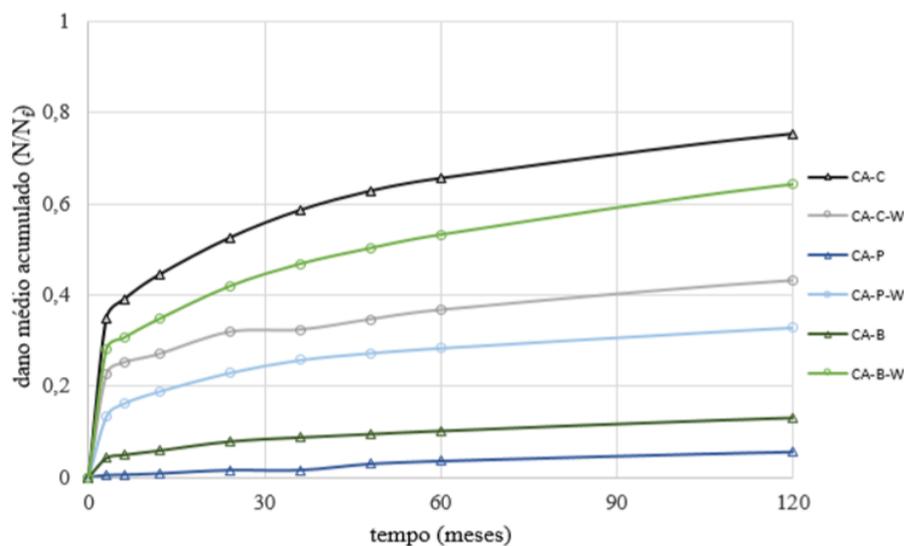
Figura 4.16 - Dano médio acumulado em 120 meses para cada espessura simulada



Pelo comportamento que as curvas mostram, conclui-se que o fato de não haver modificação na classificação das misturas é um fato atrelado as misturas e estruturas analisadas neste trabalho, não representando o comportamento geral para demais situações. O que se pode inferir é que quando se altera somente a espessura do revestimento, existem tendências fortes de que a classificação não apresentará grandes mudanças.

Mocelin (2018) encontrou danos semelhantes aos desta pesquisa (Figura 4.17). O autor utilizou os mesmos dados climáticos, tendo como base a cidade de Savannah nos Estados Unidos; uma estrutura semelhante com 12,5 cm de revestimento, base de brita graduada com 15 cm e módulo de 250 MPa, sub-base granular com 20 cm e módulo de 150 MPa e subleito com módulo de 50 MPa. Em relação ao tráfego, o autor determinou um número de passagens do eixo-padrão de 5×10^7 repetições ao longo de 10 anos de projeto, também próximo ao desta pesquisa.

Figura 4.17 - Dano médio acumulado ao longo do tempo para a malha de pontos definida, utilizando o critério de ruptura do GR por Mocelin (2018).



Fonte: Mocelin (2018)

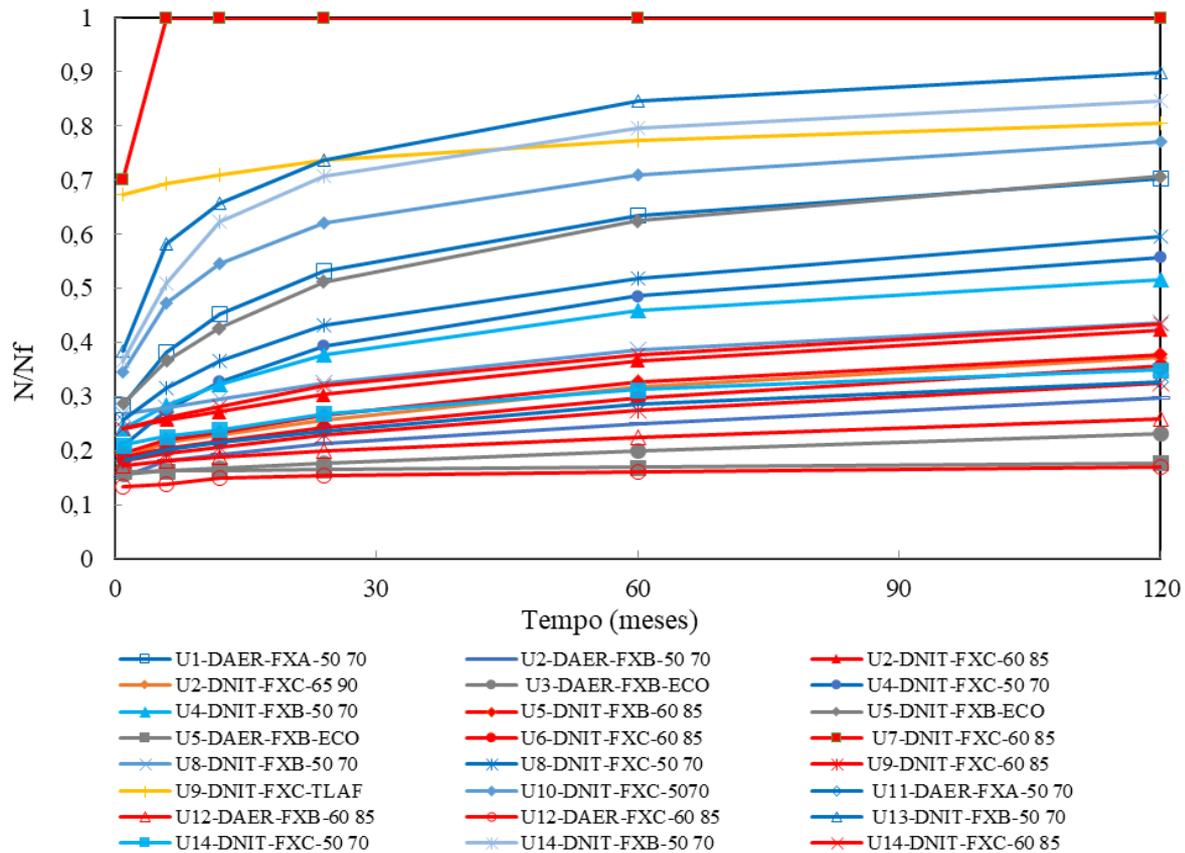
Os dados de Mocelin (2018) colaboram com os encontrados nesta pesquisa visto que apresentam magnitudes semelhantes de dano para os cenários similares testados neste trabalho.

4.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO E DOS FATORES DE INFLUÊNCIA DAS MISTURAS A PARTIR DO DANO MÉDIO ACUMULADO NA ESTRUTURA E1

Conforme pode ser visto na Figura 4.16, a ordem de classificação das misturas não foi alterada à medida que se alterou a espessura do revestimento, apenas com a magnitude do dano apresentando diferenças. Visto isso, fez-se uso do pior caso obtido, por meio da estrutura mais suscetível e que apresenta o maior intervalo de resultados de dano médio acumulado, representado pela estrutura com 5 cm de espessura de revestimento apresentada novamente nesta seção para facilitar a visualização.

Como segue, na Figura 4.18 estão plotadas as curvas de dano ao longo dos meses de análise das vinte e quatro misturas do estudo. Em tons de azul temos as misturas com ligante convencional, em vermelho as misturas com ligante modificado, em cinza as misturas de asfalto borracha, e em amarelo a mistura com ligante TLAF flex. Os resultados numéricos de dano a 1, 6, 12, 24, 60 e 120 meses podem ser visualizados no Apêndice VII.

Figura 4.18 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo estrutura E1



Fica claro através das curvas de dano médio acumulado (N/N_f) que as misturas com ligante modificado (em vermelho) apresentam melhor comportamento frente ao dano por fadiga. Para todas estas misturas, os danos resultantes ao final de 120 meses variaram em um curto intervalo, entre 0,17 para a mistura U12-DAER-FXC-60/85, e 0,433 para a mistura U14-DNIT-FXC-60/85. Também se verifica um desempenho superior para duas das três misturas com asfalto borracha em relação as misturas com ligante convencional. Estes resultados vão no mesmo caminho dos de Specht (2004) e Nascimento (2015).

Quando se analisa as misturas com ligante 50/70, verifica-se um espectro maior de valores de dano entre as misturas. Quatro misturas (U2-DAER-FXB-50/70; U11-DAER-FXA-50/70; U14-DNIT-FXC-50/70 e U8-DNIT-FXB-50/70) apresentam comportamento semelhante a misturas com ligante modificado por polímero, enquanto outras 7 misturas exibem valores de dano de maior magnitude.

Considerando a Figura 4.18, é possível observar que todas as misturas apresentam uma tendência de evolução de dano com certo padrão de crescimento. Estabelecendo uma classificação de dano por fadiga no final do primeiro ano de análise, esta classificação

praticamente não se alterará ao final dos dez anos. Observa-se também que o formato das curvas, exceto para U7-DNIT-FXC-60/85 e U9-DNIT-FXC-TLAF, também apresentam similaridades, ora praticamente lineares para danos de pequenas magnitudes, ora com formato de curvas logarítmicas para danos mais expressivos. Acredita-se que esse comportamento esteja atrelado as condições da simulação, em que exceto para as características intrínsecas da camada de revestimento, todas as outras variáveis permaneceram fixas.

Considerando as curvas de dano expostas acima, obtêm-se a classificação demonstrada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Níveis de dano acumulado em 120 meses na estrutura E1

Mistura	Dano 120 Meses	Mistura	Dano 120 Meses
U12-DAER-FXC-60/85	0,170	U14-DNIT-FXC-60/85	0,433
U5-DAER-FXB-ECO	0,176	U8-DNIT-FXB-50/70	0,435
U3-DAER-FXB-ECO	0,232	U4-DNIT-FXB-50/70	0,516
U12-DAER-FXB-60/85	0,258	U4-DNIT-FXC-50/70	0,558
U2-DAER-FXB-50/70	0,297	U8-DNIT-FXC-50/70	0,596
U9-DNIT-FXC-60/85	0,325	U1-DAER-FXA-50/70	0,704
U11-DAER-FXA-50/70	0,326	U5-DNIT-FXB-ECO	0,707
U14-DNIT-FXC-50/70	0,349	U10-DNIT-FXC-50/70	0,770
U5-DNIT-FXB-60/85	0,352	U9-DNIT-FXC-TLAF	0,806
U6-DNIT-FXC-60/85	0,356	U14-DNIT-FXB-50/70	0,847
U2-DNIT-FXC-65/90	0,372	U13-DNIT-FXB-50/70	0,898
U2-DNIT-FXC-60/85	0,423	U7-DNIT-FXC-60/85	1,000

Verifica-se pela classificação que entre as misturas com menor magnitude de dano estão os concretos asfálticos da Usina 12 com ligante AMP-60/85, duas das três misturas com asfalto borracha, misturas com ligante CAP 50/70 e demais misturas com ligante APM 60/85. De forma geral, quase todas as misturas que apresentaram maiores níveis de dano são misturas com ligante convencional CAP 50/70, embora já se perceba que este ligante também pode oferecer misturas com níveis pequenos de dano por fadiga. Além destes encontram-se entre as piores colocadas a mistura com ligante TLA Flex, uma das misturas com asfalto borracha, e a mistura da usina 7 com AMP 60/85 modificado in-loco com resultados totalmente discrepantes das demais.

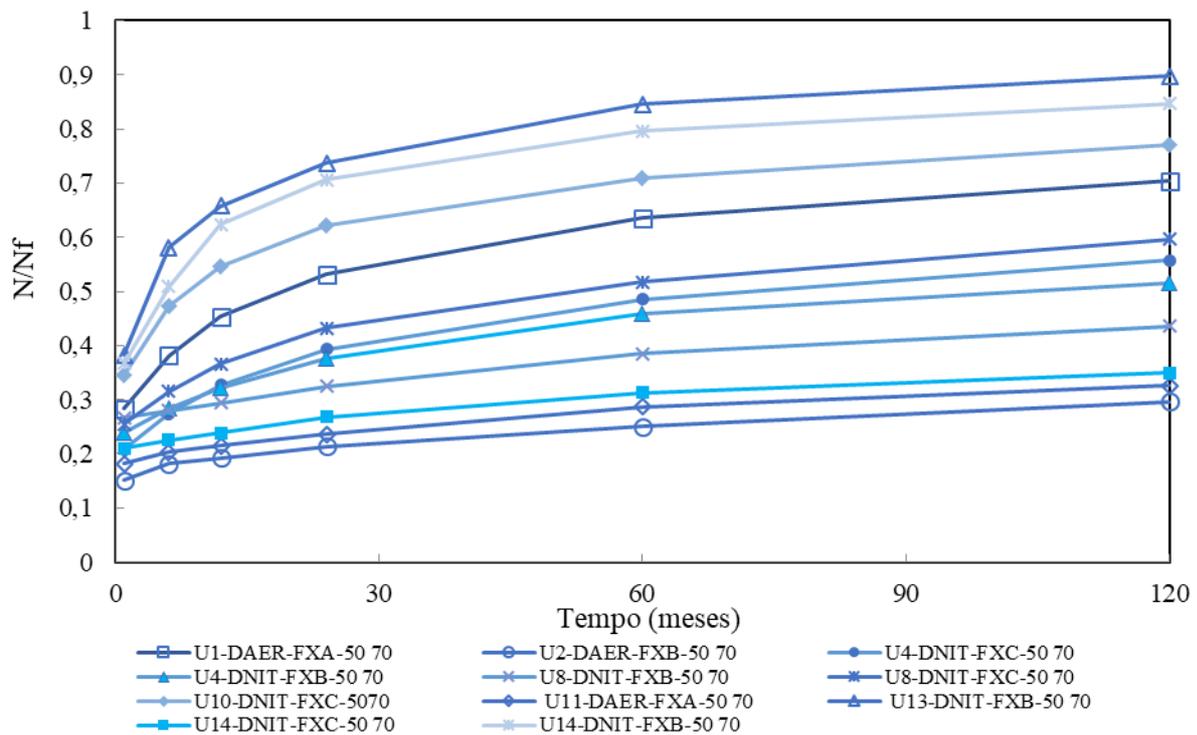
Nas próximas seções, onde serão analisadas as misturas por tipo de ligante, correlações tentarão ser estabelecidas entre as variáveis constituintes e os demais resultados de ensaios. Os resultados de ensaios e os dados que serão apresentados para estas misturas podem ser

encontradas nas planilhas resumo de cada mistura no Apêndice VIII e também na metodologia deste trabalho.

4.4.1 Misturas com ligante convencional CAP 50/70

Devido à observação dos distintos comportamentos das curvas quando verificado a magnitude do dano acumulado por fadiga, procedeu-se com análise separada das curvas para as misturas com diferentes tipos de ligante. Na Figura 4.19 abaixo se apresenta as curvas de dano médio acumulado por fadiga para as misturas com ligante CAP 50/70.

Figura 4.19 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo para as misturas com CAP 50/70



Considerando as curvas de dano para ligante convencional, tem-se a seguinte classificação (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Níveis de dano acumulado em 120 meses discretizados para misturas com CAP 50/70

Mistura	Dano 120 Meses
U2-DAER-FXB-50/70	0,297
U11-DAER-FXA-50/70	0,326
U14-DNIT-FXC-50/70	0,349
U8-DNIT-FXB-50/70	0,435
U4-DNIT-FXB-50/70	0,516
U4-DNIT-FXC-50/70	0,558
U8-DNIT-FXC-50/70	0,596
U1-DAER-FXA-50/70	0,704
U10-DNIT-FXC-50/70	0,770
U14-DNIT-FXB-50/70	0,847
U13-DNIT-FXB-50/70	0,898

Verificou-se em um primeiro momento que as quatro melhores misturas com ligante 50/70, se assemelham em comportamento com misturas de ligante modificado, dessa forma, foi buscado os principais parâmetros que as diferenciam das demais misturas com ligante convencional.

Para a mistura U2-DAER-FXC-50/70, notou-se agregados com a maior lamelaridade, maior textura (26% maior que a média) e menor esfericidade (24% menor que a média) entre as demais.

A mistura U11-DAER-FXA-50/70 é a que possui maior porcentagem passante na peneira de malha #200, com 45% de porcentagem passante a mais nesta fração do que a média das demais misturas com ligante convencional. Além disso não possui em sua composição a fração 3/4' visto que se trata de uma faixa granulometria A do DAER. Esta mistura apresenta também agregados com textura maior que a média. Verifica-se também o segundo menor teor de ligante (4,97%) entre todas as demais.

A mistura U8-DNIT-FXB-50/70 é a mais rígida entre todas deste estudo quando analisada a 10 Hz e 21°C. Este fato colocou a mistura em outro patamar quando simulada junto ao FlexPAVE, visto que quando se analisou apenas os ciclos de ruptura com o parâmetro FAF nas curvas de Wöhler, a mistura era considerada a terceira pior entre as vinte e quatro da pesquisa. Esta mistura também apresenta o menor teor de ligante (4,71%) entre as misturas de ligante 50/70, e o segundo menor teor de ligante entre todas as outras.

Para a mistura U8-DNIT-FXC-50/70 da mesma usina, mesma origem mineralógica, porcentagens passantes nas peneiras 3/8", #4 e 200# praticamente idênticas; observou-se um aumento do nível de dano de 0,435 para 0,596. Entre ambas as misturas fica evidente a queda

na rigidez da primeira para a segunda (15838 MPa para 12045 MPa) quando analisado a 21°C e 10HZ.

Para a mistura U14-DNIT-FXC-50/70 também se observou o mesmo fenômeno ocorrido na mistura U8-DNIT-FXB-50/70 de grande ganho de classificação quando simulada em condições reais. Verificou-se nesta mistura os maiores valores de lamelaridade, e de agregados passantes na malha #4, sendo uma das misturas mais finas entre as de ligante convencional.

Quando se analisa as misturas com maior nível de dano acumulado e pior comportamento frente a fadiga para ligante 50/70, foram consideradas as quatro misturas que formam o grupo com maior magnitude de dano, verificado graficamente acima de 0,7 na Figura 4.19. Nesse grupo estão as misturas U13-DNIT-FXB-50/70; U14-DNIT-FXB-50/70; U10-DNIT-FXC-50/70 e U1-DAER-FXA-50/70, ordenadas de pior a melhor comportamento. Estas quatro misturas se encontram entre as 7 de pior desempenho a fadiga do estudo.

A mistura U13-DNIT-FXB-50/70, de pior desempenho entre as 24 misturas, exceto quando levando em consideração a mistura U7-DNIT-FXC-60/85, é constituída de 32% de material da fração 3/4" (3ª maior dentre as misturas com 50/70), e 40% de pó de pedra (menor percentual dentre todas misturas avaliadas), sendo a segunda mistura com menor percentual de material passante na peneira 3/8" perdendo somente para a mistura U14-DNIT-FXB-50/70, também má classificada entre as demais.

A mistura U14-DNIT-FXB-50/70 é a única mistura com agregado de fração 1", com 6% da mistura sendo constituída desta fração, além disso a mistura conta ainda com 44% da fração 3/4" (maior percentual), 0% da fração 3/8" e 49% de pó de pedra (2º menor percentual). Os valores de material passante na malha # 3/8 são os menores encontrados, favorecendo a observação de que se trata de uma composição granulométrica mais grossa.

Para a mistura U10-DNIT-FXC-50/70 não foi possível observar extremos em qualquer uma das variáveis. Verifica-se o fato de que a mistura é a única com agregado de origem mineralógica metamórfica entre as 24 misturas.

Quando se analisa a mistura U1-DAER-FXA-50/70, verifica-se que além do mesmo ligante, esta mistura apresenta uma granulometria extremamente parecida com a da mistura U11-DAER-FXA-50/70, que apresentou um bom comportamento, exceto para a fração passante na malha #200, com a primeira mistura apresentado 6,71% de material passante (2º menor) e a segunda mistura 11,46 de material passante (maior percentual), indicando neste caso um melhor desempenho para a mistura com maior porcentagem de filler. O teor de ligante de

ambas misturas também apresenta diferenças, 5,84% e 4,97% respectivamente, obtidos por meio do Rotarex. Não foram encontradas diferenças perceptíveis entre as demais variáveis.

Quanto as misturas U4-DNIT-FXB-50/70, U4-DNIT-FXC-50/70 E U8-DNIT-FXC-50/70, que exibiram um intervalo mediano de dano, constatou-se que estas também apresentam os demais parâmetros constituintes dentro de valores médios de cada variável. Para a granulometria, não se observa padrões diferenciados, com a composição dentro de intervalos médios das misturas.

Nas imagens entre a Figura 4.20 e a Figura 4.30 se pode observar os gráficos térmicos representando o dano limitado entre 0 e 1 conforme escala de cores, no perfil transversal da camada de revestimento. O centro do perfil ($X=0$) é onde está centralizado o rodado de dois pneus com carga de 40 kN.

Figura 4.20 - Dano limitado Mistura U1-DAER-FXA-50/70: 1 mês e 120 meses

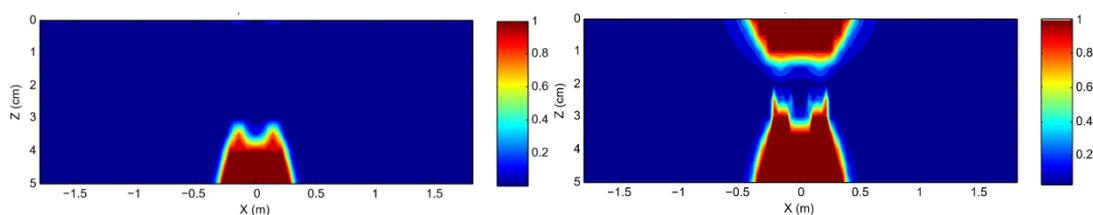


Figura 4.21 - Dano limitado Mistura U2-DAER-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses

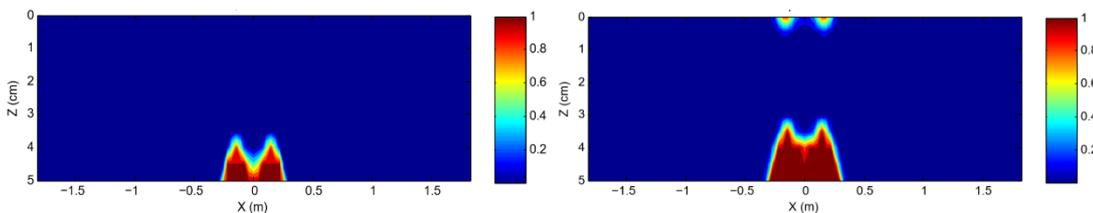


Figura 4.22 - Dano limitado Mistura U4-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses

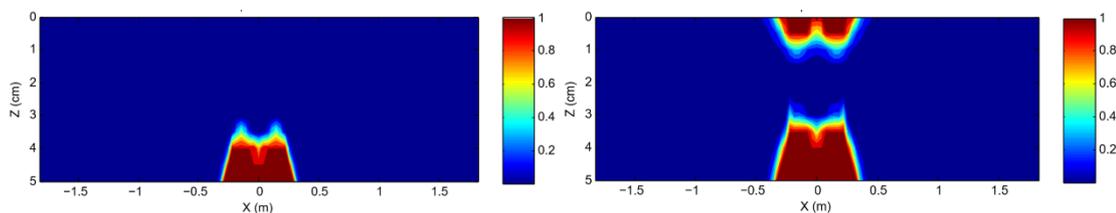


Figura 4.23 - Dano limitado Mistura U4-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses

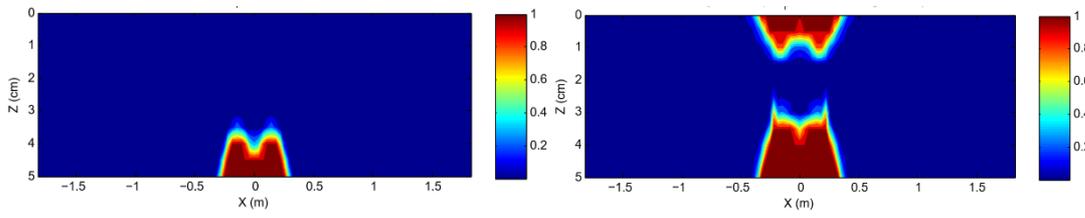


Figura 4.24 - Dano limitado Mistura U8-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses

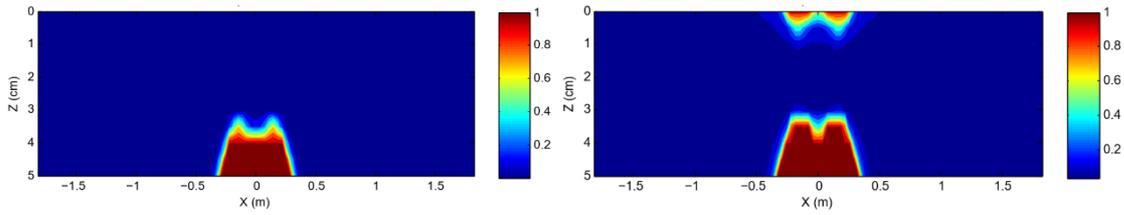


Figura 4.25 - Dano limitado Mistura U8-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses

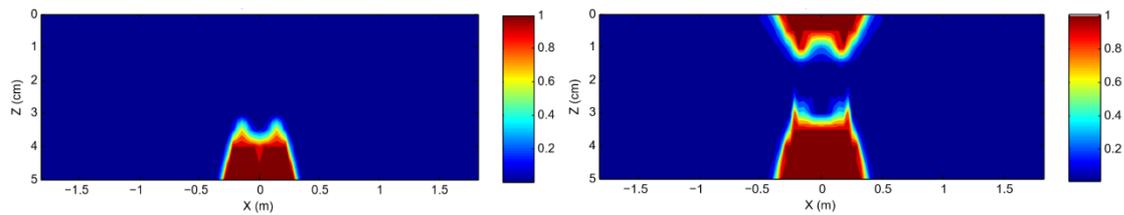


Figura 4.26 - Dano limitado Mistura U10-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses

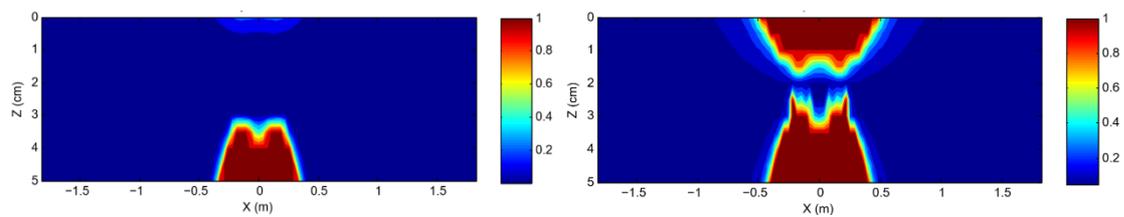


Figura 4.27 - Dano limitado Mistura U11-DAER-FXA-50/70: 1 mês e 120 meses

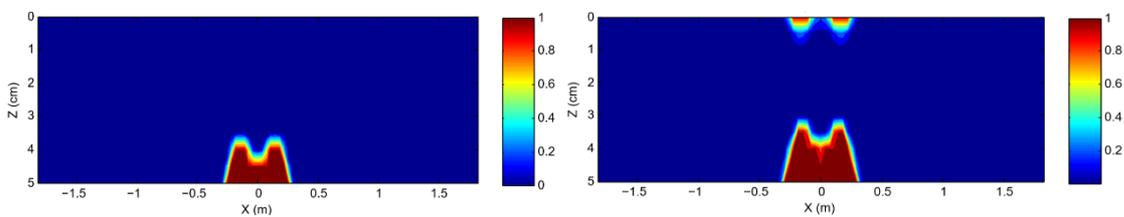


Figura 4.28 - Dano limitado Mistura U13-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses

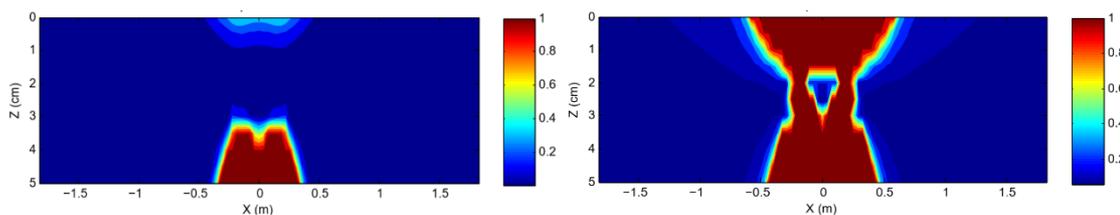


Figura 4.29 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXB-50/70: 1 mês e 120 meses

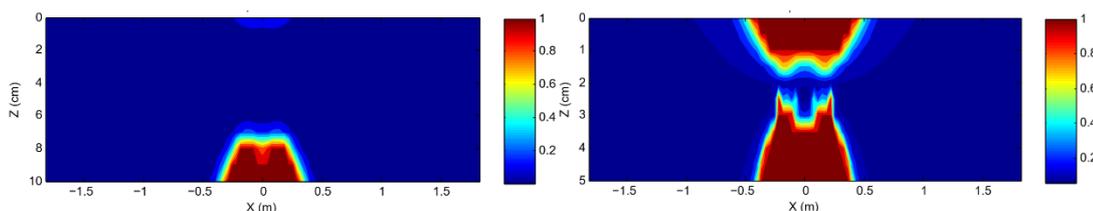
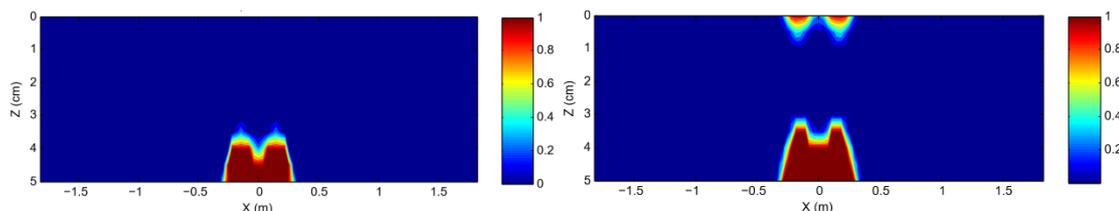


Figura 4.30 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXC-50/70: 1 mês e 120 meses



Considerando as imagens de contorno de dano, verifica-se que para todas as misturas com CAP 50/70 ao final dos 120 meses de análise se observa danificações na fibra superior do revestimento. Para as três piores misturas (*U10-DNIT-FXC-50/70*, *U13-DNIT-FXB-50/70* e *U14-DNIT-FXB-50/70*), essa danificação superior surge já no primeiro mês de observação de dano, e progride com maior velocidade, culminando também em maiores danos no fim de projeto. Esta visualização de dano na fibra superior sugere a ocorrência de trincamento *top-down* na camada de revestimento, levando a conclusão de que todas as misturas com CAP 50/70 avaliadas nesta situação apresentam fissuras desta tipologia.

De acordo com as imagens de dano, pode-se também constatar que todas apresentam dano na fibra inferior do revestimento, e em maior magnitude do que o dano superior, fato que era esperado, visto as maiores tensões de tração no fundo do revestimento. De forma clara, este dano passa a ser acumulado já no início da vida do revestimento, com todas as misturas apresentando o mesmo já no primeiro mês de observação. Indica-se desta forma a ocorrência do início da fissuração *bottom-up* nas camadas com ligante convencional já no primeiro mês de serviço, fato que vai aumentando ao longo da vida de projeto. Para a mistura *U13-DNIT-FXB-50/70*, a pior classificada junto as misturas de ligante convencional, se verifica a

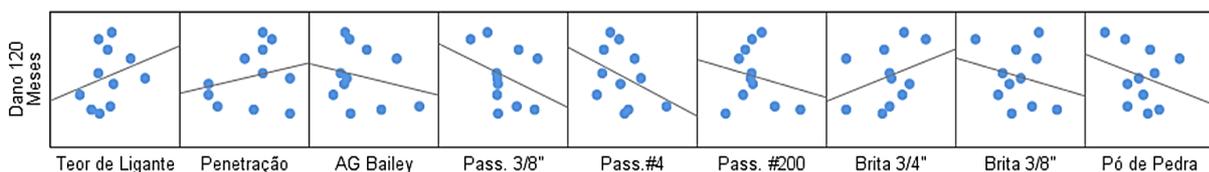
coalescência das fissuras, com a danificação superior encontrando a inferior, além do espriamento das áreas danificadas por mais de meio metro do centro do rodado. Este comportamento de espriamento ou concentração de áreas danificadas não apresenta uma correlação direta com a rigidez das misturas, visto que não é possível verificar a existência de uma tendência clara de misturas mais rígidas apresentarem maior ou menor concentração de dano.

Conforme a dificuldade de elencar quais variáveis das misturas influenciam mais na resistência à fadiga, buscou-se estatisticamente encontrar quais destas apresentam maior correlação com o dano simulado. Em um primeiro momento, foi feita a análise dos R^2 de cada parâmetro (Tabela 4.7 e Figura 4.31).

Tabela 4.7 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Teor de Ligante	0,0946
Penetração	0,0495
AG Bailey	0,0492
GAF Bailey	0,0692
FAF Bailey	0,0056
Porosidade FAD	0,0449
Brita 3/4"	0,0835
Brita 3/8"	0,0254
Pó de pedra	0,064
Passante 3/8"	0,0813
Passante #4	0,1501
Passante #200	0,0434

Figura 4.31 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes



Ao observar a relação de R^2 e a matriz de gráficos de correlação para as misturas com ligante convencional, constata-se que não é possível encontrar correlações diretas entre variáveis constituintes avaliadas e o dano acumulado por fadiga. Pode-se, entretanto, embora com R^2 muito baixos, verificar o comportamento das linhas de tendência, que apontam de

maneira geral para maiores danos em misturas com maior teor de ligante e maior quantidade de agregado graúdo.

Maiores teores de ligante propiciarem piores desempenhos a fadiga contraria os achados da literatura sobre o tema, de maneira que outras variáveis possam estar afetando o comportamento com mais significância, e a avaliação direta das linhas de tendência deva ser feita com cautela, servindo apenas como possíveis indicadores.

Abaixo, segue-se com o mesmo processo de correlação direta entre as características morfológicas dos agregados e o dano das misturas (Tabela 4.8 e Figura 4.32).

Ao comparar o dano com as características morfológicas dos agregados referentes as misturas com ligante CAP 50/70 verifica-se também correlações muito fracas, com parâmetros de mesma gênese levando a tendências opostas (lamelaridade 3/4" e 3/8" e índice de forma 3/4" e 3/8"). Apenas os dados referentes a textura parecem concordar, apontando que agregados com maior textura (mais rugosos) podem propiciar menores níveis de dano. De maneira geral as correlações com a morfologia dos agregados parecem apontar para níveis de influência muito pequenos nos resultados finais de desempenho à fadiga.

Em sequência na Tabela 4.9 e na Figura 4.33 se apresenta as correlações diretas entre o dano acumulado e os resultados de ensaios já realizados para as mesmas misturas.

Tabela 4.8 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com ligante CAP 50/70 e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Índice de forma 3/4"	0,0830
Índice de forma 3/8"	0,0013
Lamelaridade 3/4"	0,0821
Lamelaridade 3/8"	0,0805
Esfericidade 3/8"	0,0155
Angularidade do miúdo 3/8"	0,0208
Angularidade do miúdo pó	0,0897
Angularidade do graúdo 3/4"	0,1574
Angularidade do graúdo 3/8"	0,0174
Textura 3/4"	0,3709
Textura 3/8"	0,1687
Textura do pó	0,0146
Forma 2D 3/8"	0,0002
Forma 2D pó	0,0264

Figura 4.32 – Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga

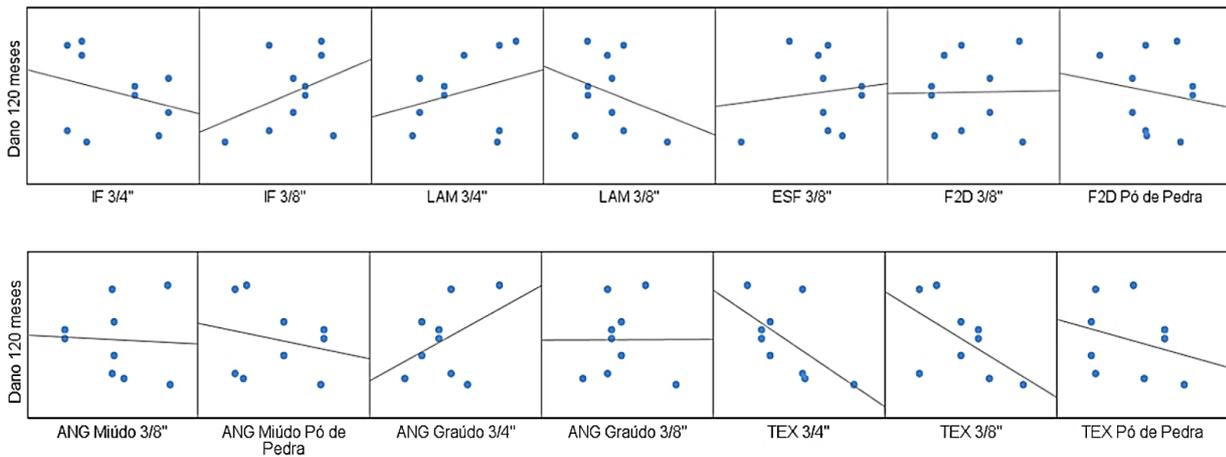
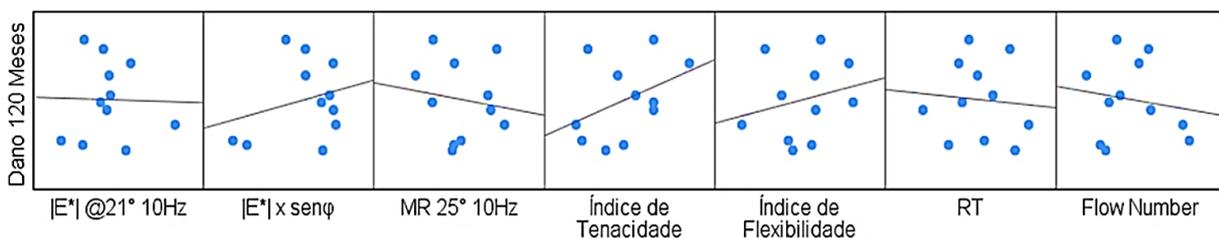


Tabela 4.9 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
$ E^* @21^\circ 10\text{Hz}$	0,0003
$ E^* \times \text{sen}\varphi @21^\circ 10\text{Hz}$	0,0742
MR $25^\circ 10\text{Hz}$	0,0434
Tenacidade	0,0036
Energia máxima de fratura	0,0536
Energia Total de fratura	0,0007
Índice de Tenacidade	0,2334
Índice de Flexibilidade	0,088
RT	0,0188
Flow Number	0,0337

Figura 4.33 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas



Verifica-se que assim como nos demais parâmetros, não é possível estabelecer qualquer correlação quando se analisa as misturas com CAP 50/70. As características de rigidez das misturas não são capazes por si só de explicar nem de exibir tendências sutis quanto ao dano acumulado por fadiga. Também se verifica que o ensaio de RT, muito difundido como indicador de resistência à fadiga não apresenta correlações viáveis. Ao confrontarmos dano por fadiga

com resistência a deformação permanente avaliada pelo parâmetro FN também se observa que a resistência a ambos os defeitos não se relacionam entre si.

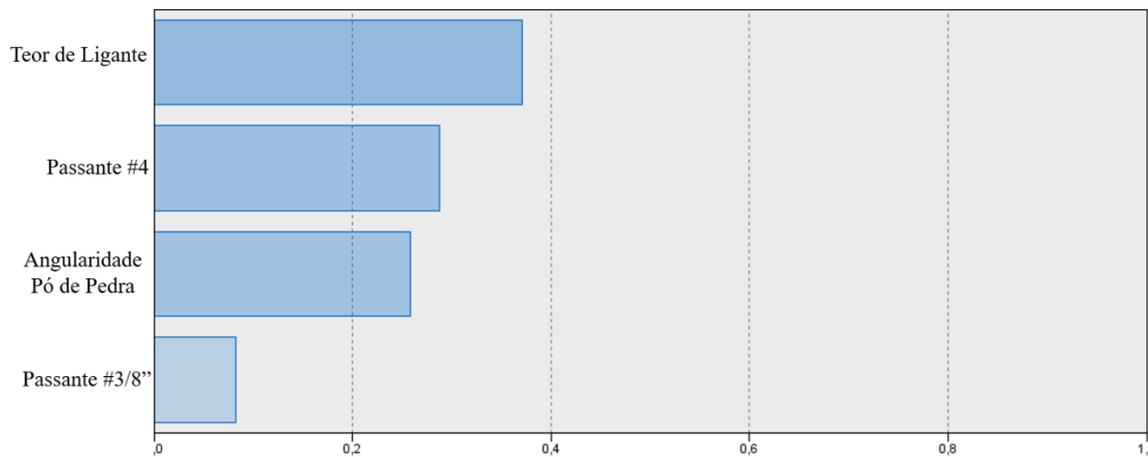
Comentários acerca da relação $|E^*| \times \text{sen}\phi$, índice de tenacidade e índice de flexibilidade serão abordados em sessões posteriores.

Desta forma, visto as fracas correlações individuais com o dano, buscou-se por meio de regressão linear múltipla obter um modelo de previsão de dano a partir das variáveis constituintes, e assim determinar quais variáveis são estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância (o mesmo que 95% de confiança) na representação do dano final obtido em 120 meses. Para o ajuste dos modelos de regressão linear múltipla, utilizou-se o software IBM SPSS, e o critérios de inserção de variáveis Stepwise, com a seleção destas feitas por Teste-F a nível de significância desejada. O mesmo processo de análise servirá de base para a verificação das misturas com ligante modificado e asfalto borracha.

Ao buscar a regressão linear múltipla, não foi possível gerar modelos com variáveis estatisticamente significativas ao nível de 5% (95% de confiança), parâmetro de confiança estatística mais utilizado para confiabilidade de dados, visto a variabilidade e baixa correlação dos parâmetros das misturas com o dano simulado. Desta forma, buscou-se por meio de modelos preditivos com variáveis a nível de 25 % de significância (75% de confiança) gerar modelo de previsão do dano médio acumulado em 120 meses e estabelecer a importância de cada componente no modelo gerado. Esta análise, visa apenas a observação dos preditores que irão compor o modelo, visto que estatística a níveis altos de significância não são boas ferramentas para a análises confiáveis do caso.

Assim, testou-se as variáveis preditoras constituintes das misturas (Tabela 4.7 e Tabela 4.8), incluindo no modelo aquelas significativas a nível de 25%, com os fatores preditores obtidos apresentados na Figura 4.34.

Figura 4.34 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para dano em 120 meses considerando as misturas com CAP 50/70



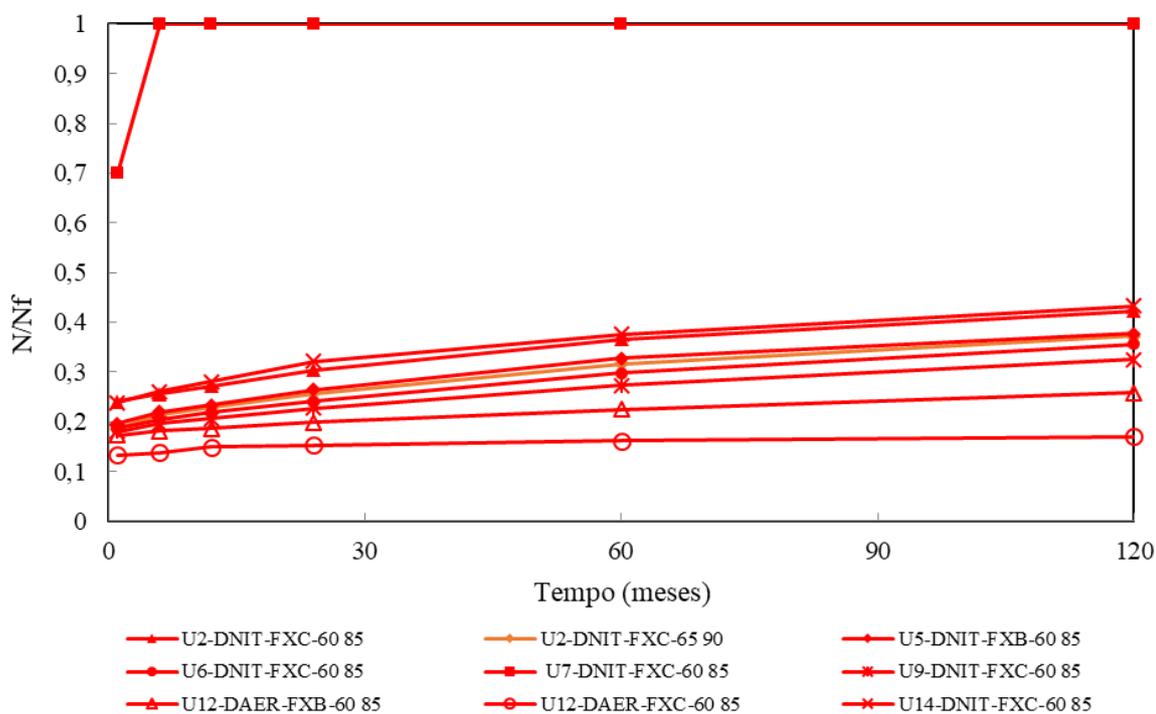
Considerando as misturas com CAP 50/70, o teor de ligante é a variável que apresenta maior importância no modelo para explicar as variações do dano médio acumulado em 120 meses. O modelo preditivo obtido com R^2 de 0,89 indica que, de maneira geral, um aumento dos valores de teor de ligante levaram a maiores danos, fato que não era esperado e que também pode ser visualizado na matriz de correlações da Figura 4.31, enquanto o aumento da porcentagem passante nas malhas #3/8" e #4 e o aumento da angularidade da fração pó de pedra levaram a níveis menores de dano, sugerindo que misturas mais finas e angulosas apresentam melhor desempenho a fadiga.

4.4.2 Misturas com ligante modificado por polímero

O processo de análise das misturas com CAP 50/70 será agora empregado da mesma forma para o estudo das misturas com ligante modificado AMP 60/85 e AMP 65/90.

Segue na Figura 4.35 as curvas de dano médio acumulado.

Figura 4.35 - Curvas de dano médio acumulado para misturas com ligante modificado por polímero



Considerando as curvas de dano, percebe-se que as misturas com ligante modificado por polímero (60/85) e (65/90) apresentam um desempenho a fadiga semelhante para o período de projeto analisado, exceto para a mistura U7-DNIT-FXC-60/85.

A mistura U7-DNIT-FXC-60/85 não será considerada para as análises visto seu comportamento extremamente distinto para os ensaios de caracterização de rigidez e de dano por fadiga. Quando se analisa o dano do grupo de misturas modificadas por polímero se obtém a classificação conforme a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Níveis de dano acumulado em 120 meses discretizados para misturas com CAP 50/70

Mistura	Dano 120 Meses
U12-DAER-FXC-60/85	0,170
U12-DAER-FXB-60/85	0,258
U9-DNIT-FXC-60/85	0,325
U5-DNIT-FXB-60/85	0,352
U6-DNIT-FXC-60/85	0,356
U2-DNIT-FXC-65/90	0,372
U2-DNIT-FXC-60/85	0,423
U14-DNIT-FXC-60/85	0,433
U7-DNIT-FXC-60/85	1,000

Por meio destes dados, é possível perceber que as duas misturas com melhor desempenho pertencem a mesma usina de produção de concreto asfáltico (U12-DAER-FXC-60/85 e U12-DAER-FXB-60/85). Como peculiaridade as demais, ambas se constituem de misturas com agregado de diabásio, assim como a mistura U11-DAER-FXA-5070, segunda melhor classificada entre as de ligante convencional. Quanto a este fato mais estudos são necessários para que se realize inferências sobre o mecanismo de adesão-coesão do ligante-agregado e seus efeitos no fenômeno de fadiga.

Ao reportarmos as diferenças granulométricas entre as duas misturas da usina U12, pode-se verificar que a mistura de Faixa C do DAER possui em todo espectro de composição uma granulometria mais grossa que a de Faixa B, conforme pode se verificar nos quadros resumo do Apêndice VII. Este fato contraria achados da literatura, como os de Soares et. al. (2000), de que misturas mais finas apresentam melhor resistência a fadiga, e de Preussler e Pinto (2010) que comentam que misturas formadas com agregados mais finos apresentam uma taxa de propagação de fissuras inferior as constituídas de agregados mais graúdos. O fato poderia ser explicado por teores de ligante diferentes entre ambas as misturas, contudo, os teores são próximos (5,44 e 5,67%) com a mistura mais grossa e com menos ligante apresentando desempenho superior.

Quando se analisa a mistura U9-DNIT-FXC-60/85, terceira colocada, verifica-se que esta apresenta a granulometria mais fina entre as demais, fato que colabora para a observação de que a granulometria, quando varia-se o teor de ligante, o tipo de agregado e as demais características destes, não exerce influência suficiente para indicar comportamentos de resistência a fadiga.

Ressalta-se também a mistura morna U5-DAER-FXB-60/85 com aditivo surfactante Evotherm, apresentou resultados de dano semelhantes a todas outras misturas com ligante modificado, indicando que embora possa haver perda de desempenho, esta não leva ao comprometimento da mistura, fato também observado por Mocelin (2018).

Abaixo (Figura 4.36 a Figura 4.43) apresenta-se as imagens de contorno de dano obtidas pelas simulações no FlexPAVE par as misturas com ligante modificado pro polímero AMP 60/85 e AMP 65/90.

Figura 4.36 - Dano limitado Mistura U2-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses

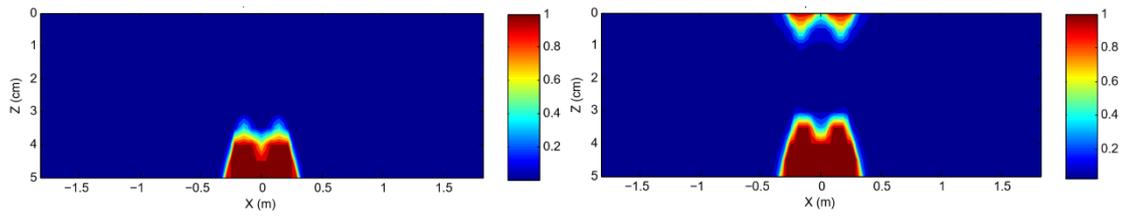


Figura 4.37 - Dano limitado Mistura U2-DNIT-FXC-65/90: 1 mês e 120 meses

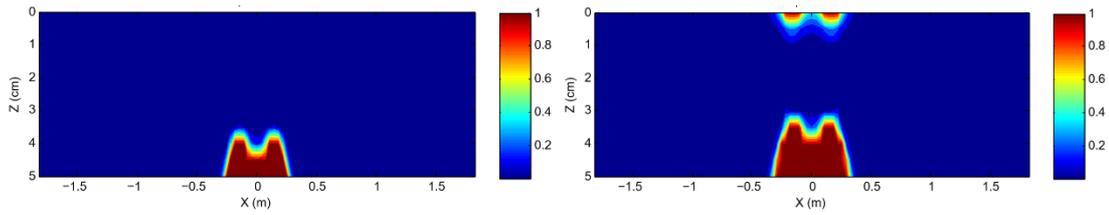


Figura 4.38 - Dano limitado Mistura U5-DNIT-FXB-60/85: 1 mês e 120 meses

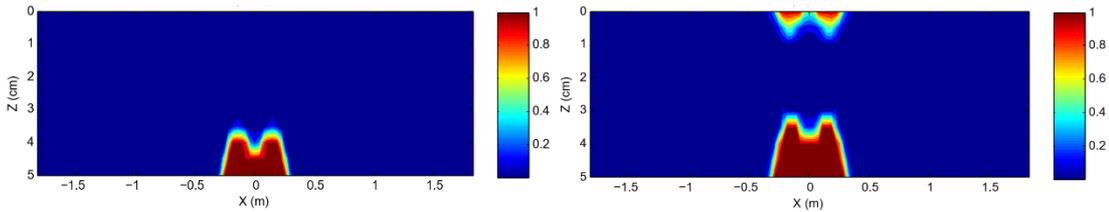


Figura 4.39 - Dano limitado Mistura U6-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses

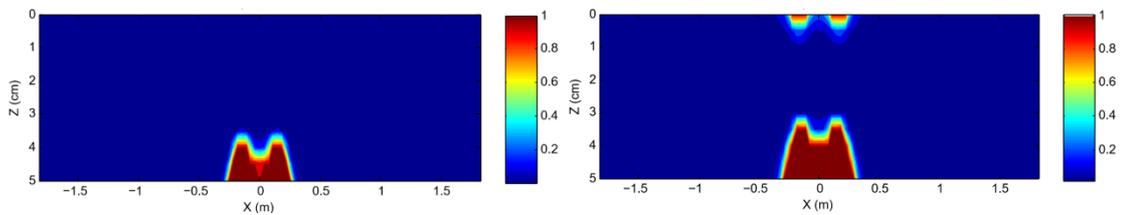


Figura 4.40 - Dano limitado Mistura U9-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses

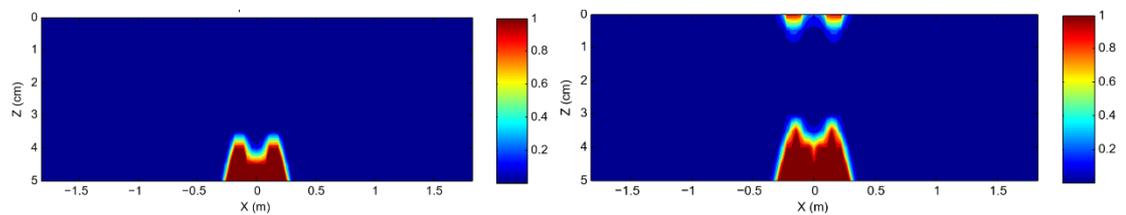


Figura 4.41 - Dano limitado Mistura U12-DAER-FXB-60/85: 1 mês e 120 meses

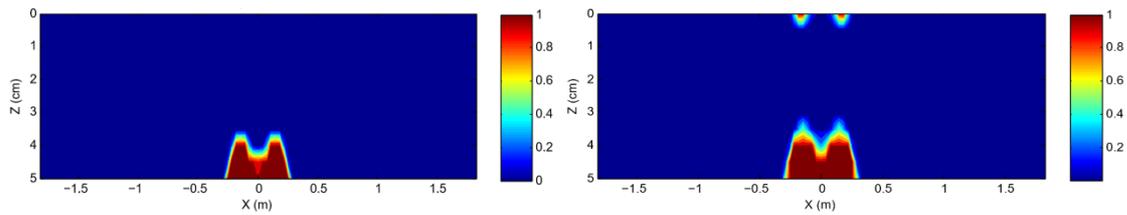


Figura 4.42 - Dano limitado Mistura U12-DAER-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses

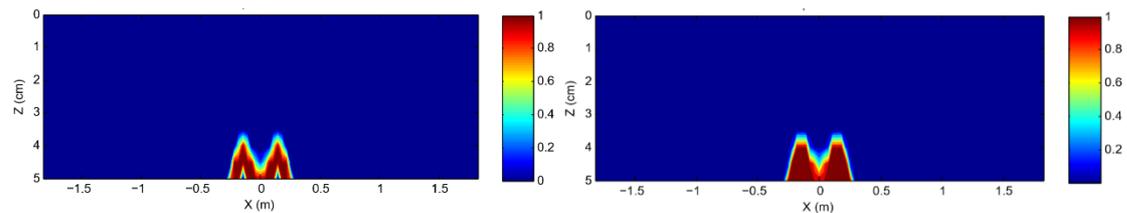
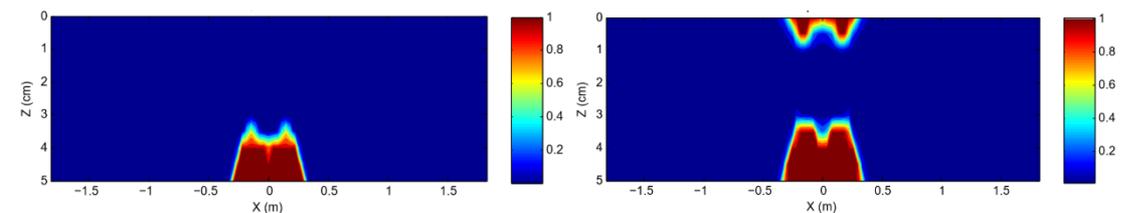


Figura 4.43 - Dano limitado Mistura U14-DNIT-FXC-60/85: 1 mês e 120 meses



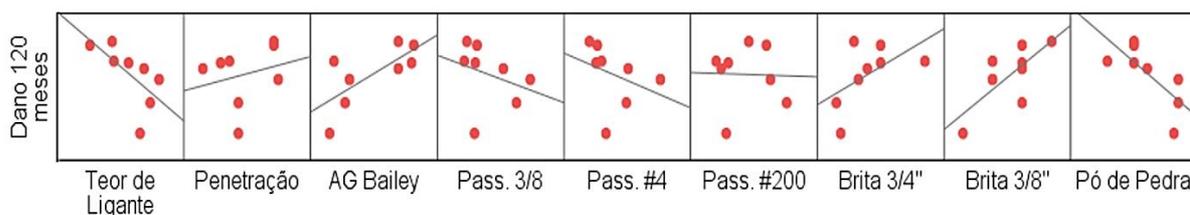
Observando as figuras de contorno de dano do perfil transversal do revestimento, observa-se que nenhuma das misturas exibe dano na fibra superior ao final do primeiro mês de análise (ao contrário de algumas misturas com CAP 50/70), além disso, esse tipo de dano transcorre lentamente, culminando com níveis muito pequenos ou nulos de material danificado na fibra superior ao final da vida de projeto. A maior parte do dano nas misturas com ligante modificado surgiram na fibra inferior do revestimento e de modo geral em menor magnitude quando comparadas com as misturas com CAP 50/70.

Ao analisar-se estatisticamente as misturas com ligante modificado buscou-se correlacionar o dano com as demais variáveis componentes das misturas (Tabela 4.11 e Tabela 4.12; Figura 4.44 e Figura 4.45) e correlações de resultados entre ensaios (Tabela 4.13 e Figura 4.46).

Tabela 4.11 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Teor de Ligante	0,4204
Penetração	0,0601
AG Bailey	0,5129
GAF Bailey	0,5514
FAF Bailey	0,5329
Porosidade FAD	0,0039
Brita 3/4"	0,3073
Brita 3/8"	0,5262
Pó de pedra	0,5426
Passante 3/8"	0,0919
Passante #4	0,1114
Passante #200	0,0009

Figura 4.44 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes



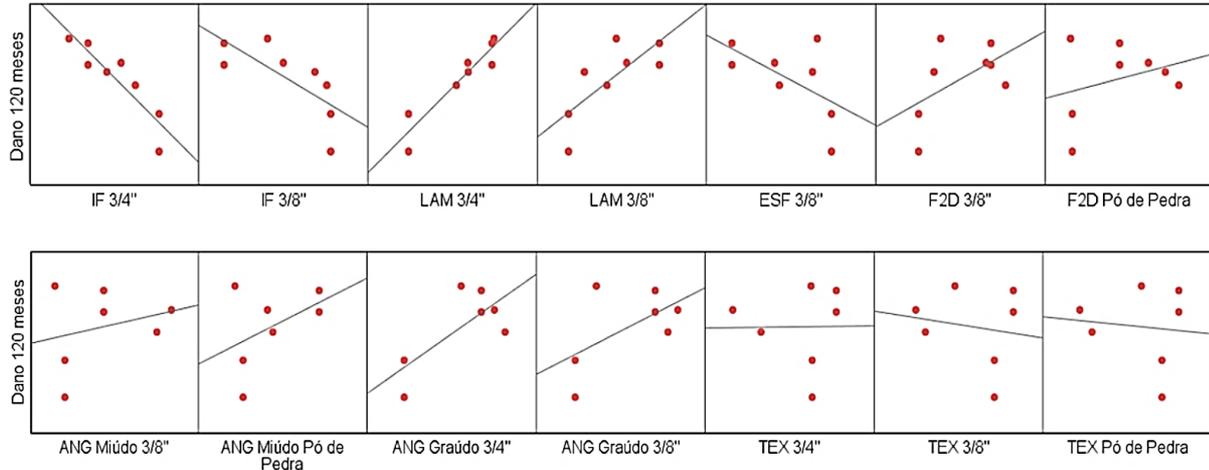
Ao observar a matriz de gráficos de correlação para as misturas com ligante modificado, observa-se que, embora os R^2 baixos encontrados, pode-se inferir sobre a influência de algumas variáveis de composição das misturas. Visualiza-se que existem tendências sutis de que: à medida que se aumenta o teor de ligante, o dano por fadiga diminui; com o aumento do AG se tem o aumento do dano; o aumento da porcentagem da fração 3/4" e 3/8" leva ao aumento do dano e de que o aumento da porcentagem da fração de pó de pedra tende a diminuir o dano.

Desta forma, para misturas com ligante 60/85 e 65/90, parece haver a branda tendência, de que maiores teores de ligante e composições granulométricas mais finas levam a um melhor desempenho a fadiga.

Tabela 4.12 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com ligante modificado por polímero e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Índice de forma 3/4"	0,8123
Índice de forma 3/8"	0,5298
Lamellaridade 3/4"	0,8829
Lamellaridade 3/8"	0,5743
Esfericidade 3/8"	0,3366
Angularidade do miúdo 3/8"	0,034
Angularidade do miúdo pó	0,2059
Angularidade do graúdo 3/4"	0,5369
Angularidade do graúdo 3/8"	0,3334
Textura 3/4"	0,0001
Textura 3/8"	0,0294
Textura do pó	0,0108
Forma 2D 3/8"	0,2939
Forma 2D pó	0,0983

Figura 4.45 - Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga



Considerando as correlações entre o dano e as características morfológicas dos agregados, percebe-se que existem fortes correlações entre a forma do agregado e a resistência a fadiga. Os parâmetros de índice de forma e de lamellaridade apresentam um bom R^2 , mostrando que agregados mais cúbicos favorecem o desempenho a fadiga. As análises de angularidade também exibiram possíveis correlações, apontando todas para melhor resistência

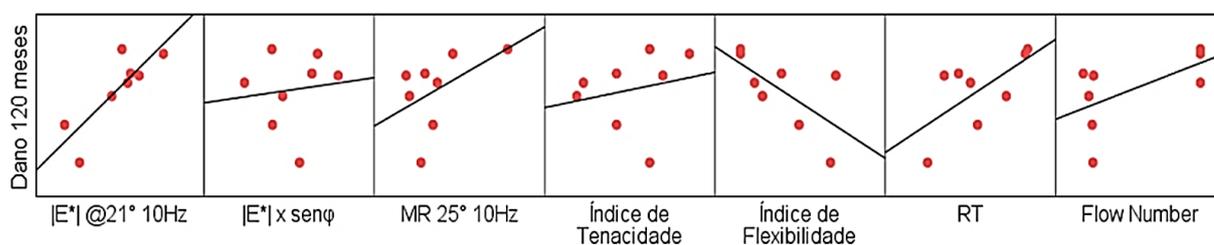
à fadiga à medida que os agregados apresentam menor angularidade. Na mesma linha, à medida que a esfericidade aumentou, o dano por fadiga diminuiu.

Abaixo, na Tabela 4.13 segue a relação entre os resultados experimentais dos demais ensaios e o dano acumulado por fadiga

Tabela 4.13 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
$ E^* $ @21° 10Hz	0,7002
$ E^* \times \text{sen}\phi$ (@21° 10Hz)	0,0139
MR 25° 10Hz	0,1671
Tenacidade	0,0004
Energia máxima de fratura	0,0762
Energia Total de fratura	0,0127
Índice de Tenacidade	0,0461
Índice de Flexibilidade	0,4328
RT	0,422
Flow Number	0,3445

Figura 4.46 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas

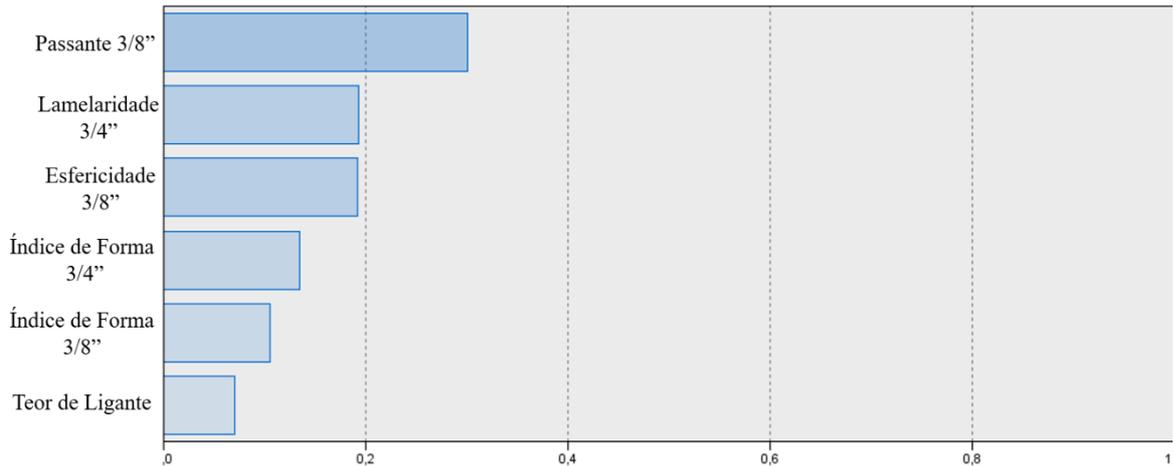


Quando se leva em consideração os resultados de ensaio mecânicos, verifica-se a boa correlação encontrada entre os valores de dano simulado e rigidez das misturas ($R^2 = 0,7002$). Para os ligantes modificados, à medida que as misturas se tornam mais rígidas, avaliadas na temperatura e frequência de ensaio de fadiga, os resultados de dano ao final do tempo de análise são maiores. Foi possível observar correlações sutis no índice de flexibilidade e nos resultados de RT. A medida que a flexibilidade aumentou, o dano apresentou tendência de queda. Para os resultados de RT, se encontrou tendências opostas ao esperado. Conforme a resistência a tração aumentou, o dano avaliado também cresceu.

Quando se busca criar modelos de regressão linear múltipla, não é possível assim como para as misturas com CAP 50/70, gerar modelos com variáveis que são estatisticamente significativas ao nível de 5% (95% de confiança), visto a variabilidade e baixa correlação dos

parâmetros das misturas com o dano simulado. Desta forma, buscou-se por meio de modelos preditivos com variáveis a nível de 25 % de significância (75% de confiança), estabelecer a importância de cada componente no dano previsto pelo modelo gerado (Figura 4.47).

Figura 4.47 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para dano em 120 meses considerando as misturas com AMP 60/85 e AMP 65/90



Para as sete misturas com ligante AMP 60/85 e a mistura AMP 65/90, foi possível obter um modelo com $R^2 = 0,98$, indicando correlação do dano com a porcentagem de material passante na malha # 3/8", com as características de forma dos agregados e com o teor de ligante.

Observou-se no modelo gerado as tendências de que maiores quantidades de material passante na malha #3/8", menor lamellaridade, maior esfericidade, e índice de forma próximos a 1 (partículas mais cúbicas) levam a danos menores. Para a quantidade de ligante, com importância mais baixa no modelo em relação as outras variáveis, quanto maior o teor, melhor o desempenho da mistura frente ao dano por fadiga, tendência que se mostra contrária a obtida para o modelo gerado para as misturas com CAP 50/70.

Como conclusão acerca da influência das variáveis no desempenho frente a fadiga das misturas com ligante modificado, verifica-se que misturas mais finas, com maior teor de ligante, menores rigidezes, e também com agregados de forma cúbica, são as que apresentam melhor comportamento frente à fadiga.

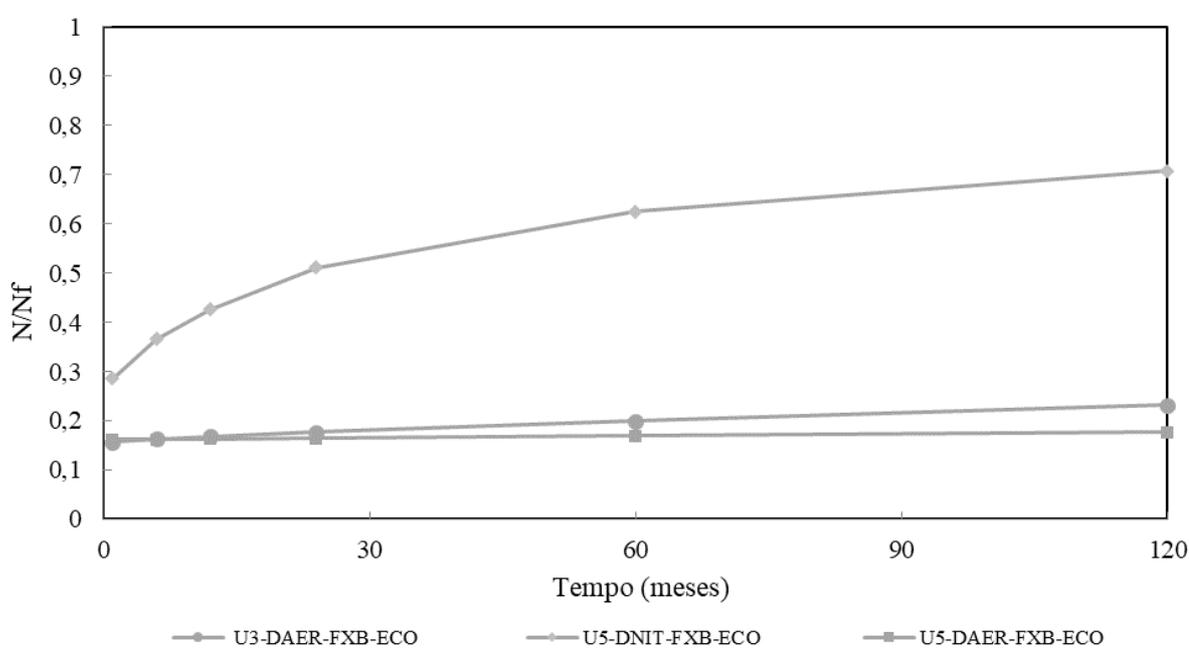
Ao contrário das misturas com CAP 50/70, as misturas com ligante modificado apresentaram tendências mais claras de comportamento. Poder observar estas tendências deve-se ao fato de que, o ligante modificado, ao levar ao melhor desempenho e a intervalos de dano menores, possibilitou que outras propriedades pudessem ser observadas, embora ainda de

maneira branda, fato que não ficou claro para as misturas com ligante convencional, que exibiram maior intervalo de nível de dano.

4.4.3 Misturas com asfalto borracha ECOFLEX AB-08

Nesta seção se analisará as misturas com asfalto borracha pelo mesmo protocolo de observações já utilizado para os demais tipos de ligante. Segue na Figura 4.48 as curvas de dano para as três misturas com asfalto borracha avaliadas neste trabalho.

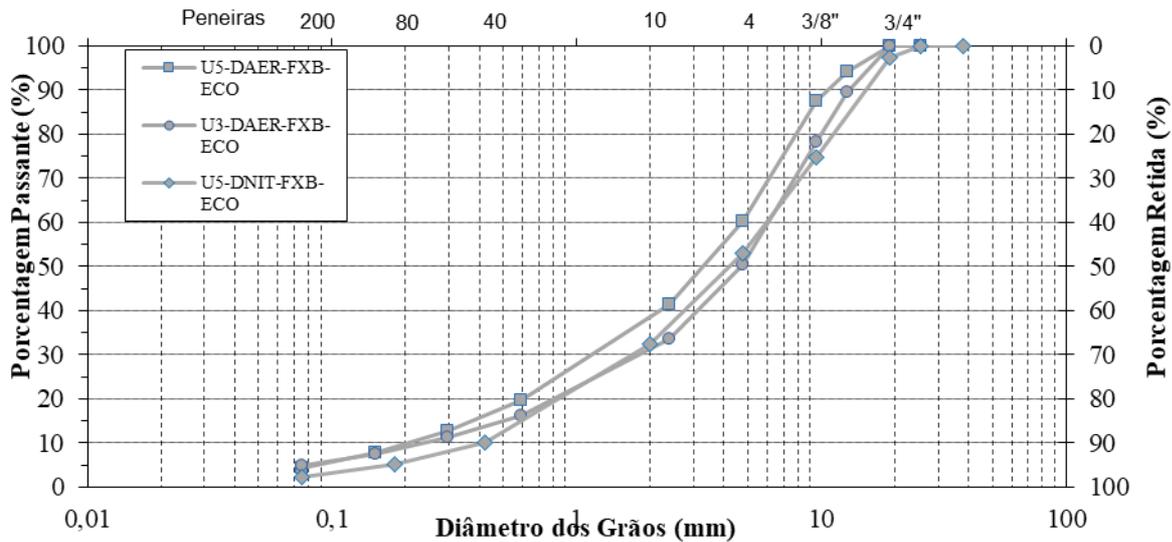
Figura 4.48 - Curvas de dano médio acumulado para misturas com asfalto borracha AB-08



Percebe-se a partir das curvas de dano médio acumulado que duas das três misturas com asfalto borracha (U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO) exibem níveis de dano muito baixos, enquanto a mistura U5-DNIT-FXB-ECO se diferencia das demais.

Para fins de comparação de composição granulométrica das misturas segue a Figura 4.49.

Figura 4.49 - Curvas granulométricas das misturas com asfalto borracha AB-08



Quando se visualiza a granulometria, verifica-se que a mistura de composição mais fina (U5-DAER-FXB-ECO) é a que apresenta a menor danificação. Com um nível de dano muito semelhante está a mistura U3-DAER-FXB-ECO, com composição mais grossa que a primeira em toda a faixa granulométrica, exceto para as malhas mais finas (#100 e #200), em que os níveis de material pétreo são os mesmos. O que se verifica entre as duas misturas é a grande diferença de teor de ligante (5,91% e 6,80% respectivamente) o que poderia estar colaborando para melhorar o desempenho da mistura da usina 3 com faixa granulométrica mais grossa. Entretanto se verifica também que a absorção do agregado da usina 3 é a maior dentre os estudados nesta pesquisa (2,8%) ao passo que a usina 5 utiliza agregados com 0,5% de absorção.

A utilização de aditivo surfactante Evotherm não impactou no desempenho de danificação por fadiga das misturas. A mistura U5-DAER-FXB-ECO, que faz uso do aditivo foi classificado como a segunda melhor mistura entre as vinte e quatro, enquanto a mistura U5-DNIT-FXB-ECO que também utilizou o aditivo, classificada em 19º, apresentou desempenho de dano por fadiga pior que a grande maioria.

Visto que a mistura U5-DAER-FXB-ECO e U3-DAER-FXB-ECO apresentam desempenhos muito similares e rochas de diferentes mineralogias (granítica e basáltica respectivamente) pode-se inferir que ambas classes de mineralogia podem apresentar desempenhos considerados satisfatórios, visto a magnitude do dano, não havendo restrições de escolha quanto ao tipo do agregado.

As propriedades morfológicas dos agregados utilizados parecem não exercer muito efeito nas respostas de dano, sendo “apagadas” por outras condições, visto que as duas misturas da usina 5 utilizam o mesmo agregado e exibem respostas de dano em níveis diferentes, muito provavelmente ocasionadas pela granulometria mais grossa da mistura U5-DNIT-FXB-ECO e pelo baixo percentual de material passante nas malhas mais finas desta mistura. Além disso, a mistura da usina 3 com agregados de morfologia diferente e também granulometria mais grossa que a mistura U5-DAER-FXB-ECO, apresenta resultados similares de dano.

Quando se examina os resultados de ensaios das misturas com asfalto borracha, constata-se que as misturas com menor rigidez nas condições de ensaio de fadiga (U5-DAER-FXB-ECO e U3-DAER-FXB-ECO) apresentaram dano mais baixo que a mistura U5-DNIT-FXB-ECO, que exibe uma rigidez superior na ordem de 700 MPa outra mistura da usina 5 e 1600MPa em relação a mistura da usina U3. O mesmo padrão não se estabeleceu para as duas misturas com melhor desempenho, visto que a rigidez da melhor mistura é maior do que a segunda classificada.

Como o caso dos ligantes modificados, parece haver uma tendência que rigidezes mais elevadas para estes tipos de ligante levam a maiores níveis de dano, fato que necessita de maiores estudos.

Abaixo nas Figura 4.50, Figura 4.51 e Figura 4.52, seguem os gráficos de contorno do dano limitado gerados pelas simulações.

Figura 4.50 - Dano limitado Mistura U3-DAER-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses

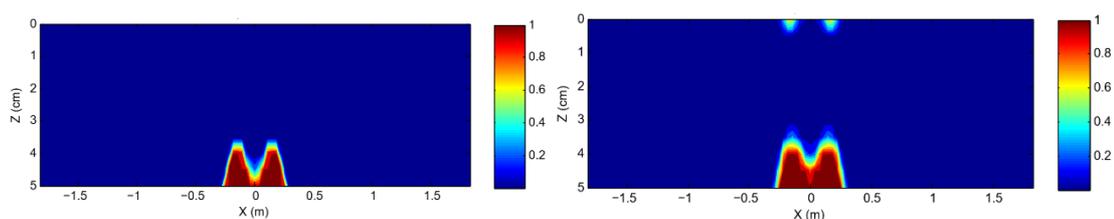


Figura 4.51 - Dano limitado Mistura U5-DAER-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses

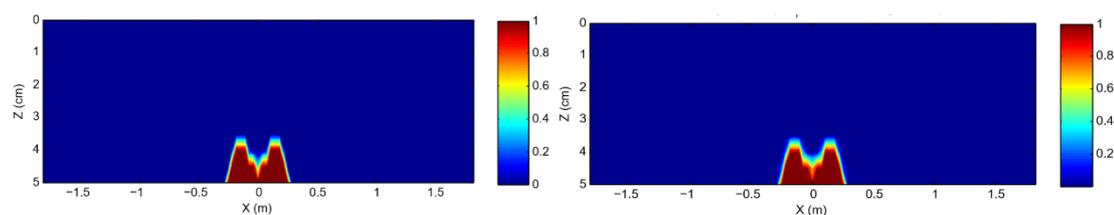
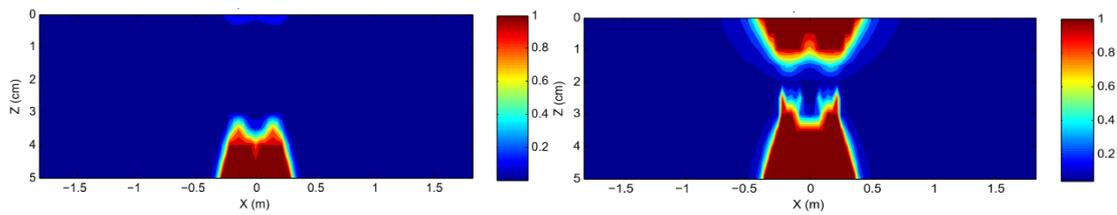


Figura 4.52 - Dano limitado Mistura U5-DNIT-FXB-ECO: 1 mês e 120 meses



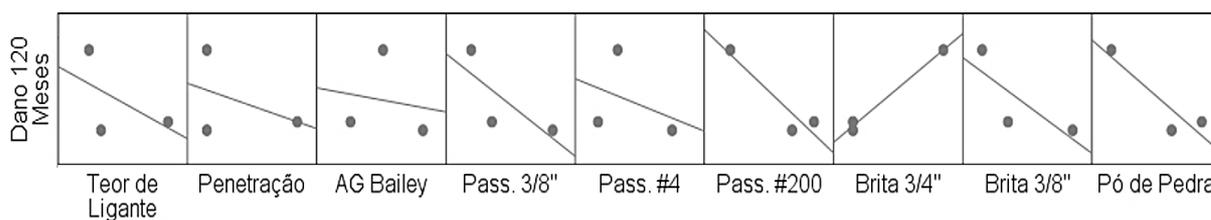
Conforme pode ser visualizado, as misturas U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO apresentam níveis pequenos de dano ao longo do período de projeto analisado. Este nível de dano, conforme visto nas curvas da Figura 4.48 parece se estabilizar antes do primeiro mês, não havendo crescimento significativo deste ao longo do período de projeto. Ambas as misturas praticamente não apresentam danificação da fibra superior do revestimento, sugerindo que a fissuração venha a ocorrer apenas na parte inferior do revestimento. Ao contrário, observa-se que a mistura U5-DNIT-FXB-ECO desenvolve um maior nível de dano, partindo já no primeiro mês de solicitação de um dano maior na fibra inferior e já apresentando início de danificação na camada superior do revestimento. Percebe-se que ao final dos 120 meses de análise a camada já se encontra bastante comprometida, com indicativo de grande fissuração e iminente coalescência das fissuras superiores e inferiores.

Abaixo na Tabela 4.14 e Figura 4.53, seguem as correlações entre o dano e as variáveis componentes.

Tabela 4.14 - Relação de R^2 para variáveis de composição das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Teor de Ligante	0,2925
Penetração	0,1724
AG Bailey	0,0239
GAF Bailey	0,949
FAF Bailey	0,827
Porosidade FAD	0,4037
Brita 3/4"	0,9909
Brita 3/8"	0,6137
Pó de Pedra	0,827
Passante 3/8"	0,5146
Passante #4	0,1245
Passante #200	0,8821

Figura 4.53 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e variáveis constituintes



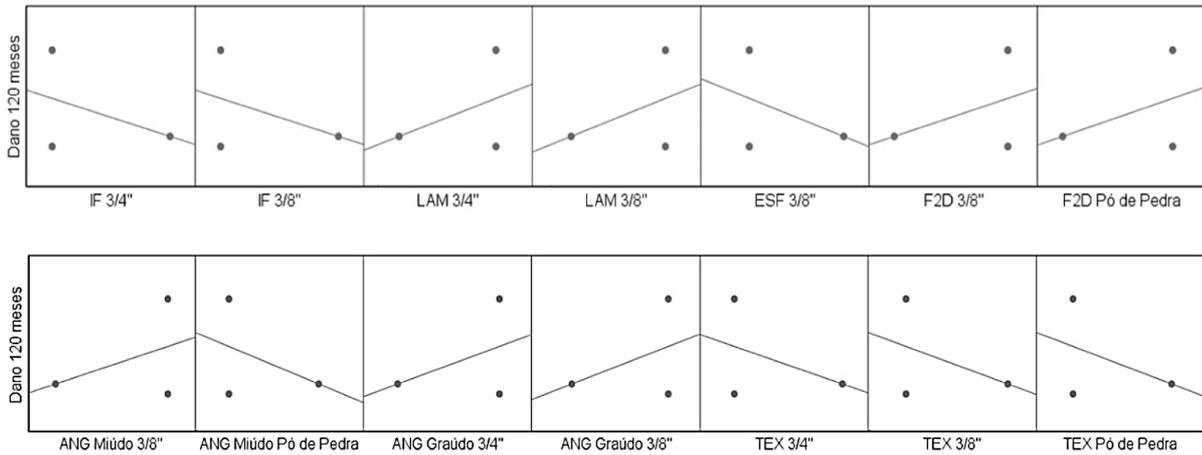
As inferências obtidas pelas correlações diretas para as misturas com asfalto borracha são feitas a partir de uma amostragem pequena, o que possibilitou R^2 maiores, entretanto com menor confiança nas deduções por meio dos dados. Com apenas 3 misturas, qualquer conclusão é precipitada, mas pode ser observada a tendência de que maiores porcentagens de material passante nas malhas #3/8", #4 e #200 levaram a melhores misturas frente a fadiga. O aumento da fração 3/4" nas misturas levou a maiores resultados de dano, favorecendo a mesma análise da granulometria. Quanto ao teor de ligante e a penetração do mesmo não há como indicar tendências de comportamento, visto que misturas com o teor muito próximo e igual penetração, ambas com o uso de aditivo surfactante apresentaram resultados de dano muito distintos.

Quanto a comparação dos dados de morfologia dos agregados com o dano por fadiga, apresenta-se a Tabela 4.15 e a Figura 4.54.

Tabela 4.15 - Relação de R^2 para resultados de morfologia dos agregados das misturas com asfalto borracha e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
Índice de forma 3/4"	0,1724
Índice de forma 3/8"	0,1724
Lamellaridade 3/4"	0,1724
Lamellaridade 3/8"	0,1724
Esfericidade 3/8"	0,1724
Angularidade do miúdo 3/8"	0,1724
Angularidade do miúdo pó	0,1724
Angularidade do graúdo 3/4"	0,1724
Angularidade do graúdo 3/8"	0,1724
Textura 3/4"	0,1724
Textura 3/8"	0,1724
Textura do pó	0,1724
Forma 2D 3/8"	0,1724
Forma 2D pó	0,1724

Figura 4.54 - Matriz de relação entre as características morfológicas dos agregados e o dano por fadiga



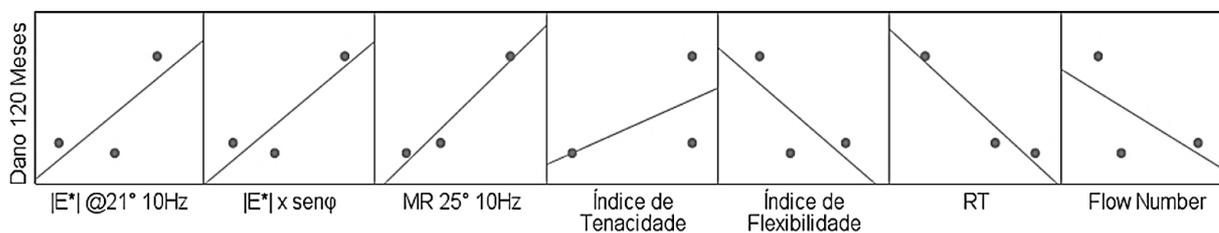
Para estas correlações não é possível estabelecer padrões, visto que duas misturas (U5-DAER-FXB-ECO e U5-DNIT-FXB-ECO) utilizam o mesmo agregado, com as mesmas características morfológicas, e que apresentam resultados de dano muito diferentes. Visto que são fixos os dados de morfologia e os danos das três misturas, a relação de R^2 é a mesma para todos os parâmetros.

Testou-se assim como com as outras misturas, as possíveis correlações entre o dano e os resultados de ensaios já executados, apresentadas na Tabela 4.16 e Figura 4.55

Tabela 4.16 - Relação de R^2 para resultados de ensaios das misturas e dano em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
$ E^* @ 21^\circ 10\text{Hz}$	0,5866
$ E^* \times \text{sen}\phi (@ 21^\circ 10\text{Hz})$	0,7927
MR $25^\circ 10\text{Hz}$	0,9466
Tenacidade	0,9974
Energia máxima de fratura	0,9891
Energia Total de fratura	0,8869
Índice de Tenacidade	0,3367
Índice de Flexibilidade	0,5035
RT	0,9279
Flow Number	0,3665

Figura 4.55 - Matriz de correlações entre dano em 120 meses e resultados de ensaios das misturas



Como relatado anteriormente, visto o número reduzido de misturas com asfalto borracha, estabelecer padrões se torna uma tarefa temerária. Parece haver uma tendência entre misturas com asfalto borracha de que maiores flexibilidades levam a uma maior tolerância ao dano, assim como as misturas com ligante modificado. Os resultados de RT também seguiram um comportamento típico, com melhores resistências a fadiga para maiores RTs.

Para as misturas com asfalto borracha, novamente, assim como para os demais tipos de ligante, composições granulométricas mais finas favorecem maiores resistências à fadiga.

4.5 ANÁLISES DOS DEMAIS RESULTADOS E CORRELAÇÕES

Nesta seção, serão apresentadas tentativas de correlações entre o dano médio acumulado. Em um primeiro momento serão confrontados os dados de dano simulado e os resultados obtidos no ensaio instrumentado de resistência a tração por compressão diametral. Estes índices correlatos ao ensaio de RT vêm sendo utilizados como indicadores de resistência à fadiga e passarão por tentativa de validação para as misturas desta pesquisa.

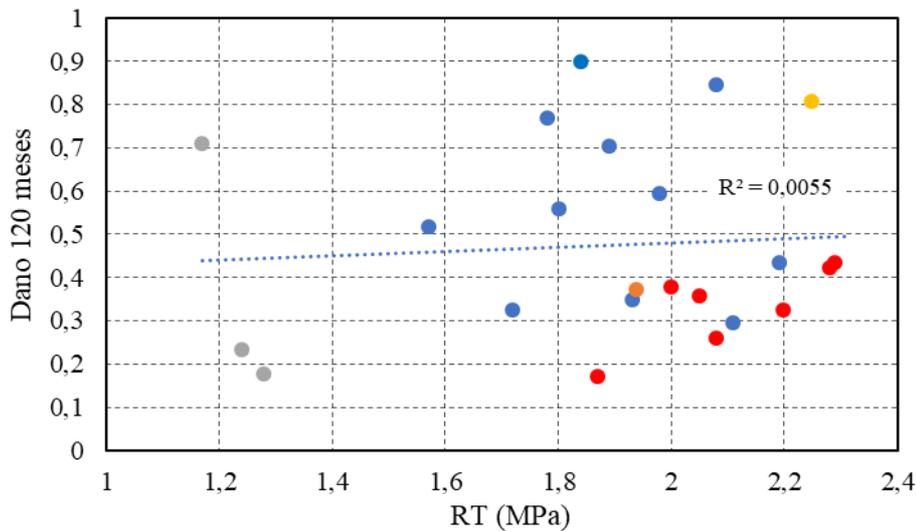
Posteriormente serão analisados os possíveis padrões de relação entre as características viscoelásticas obtidas pelo ensaio de módulo complexo com a danificação pelo fenômeno de fadiga.

4.5.1 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral e índices correlatos

Os limites estabelecidos para os resultados de RT são todos atendidos pelas misturas com CAP 50/70 e asfalto borracha, que atingiram resistência à tração acima da mínima exigida pelas especificações. As demais misturas, com ligantes modificados, apresentam RT acima do intervalo especificado na norma DNER-ES 385/99, indicada para misturas com asfalto modificado por polímero tipo SBS.

Entretanto, embora atingidas as especificações, o ensaio de resistência a tração por compressão diametral não se mostrou um parâmetro capaz de representar a fadiga nas misturas asfálticas (Figura 4.56).

Figura 4.56 - Correlação entre dano médio acumulado por fadiga 120 meses com ensaio de RT



Observa-se que os menores valores de RT se referem aos concretos asfálticos com asfalto borracha e os maiores às misturas com ligante AMP 60/85 e TLA Flex. As especificações de serviço vigentes possibilitam a utilização de misturas com RT na ordem de 1,17 MPa como a mistura U5-DNIT-FXB-ECO que utiliza asfalto borracha, assim como misturas como a U8-DNIT-FXB-50/70, com RT de 2,09 MPa e ligante convencional, sem possibilitar o entendimento de qual apresenta melhor desempenho. Fica assim evidente a necessidade de uma melhor avaliação do ensaio e dos limites normativos, assim como a análise do uso do RT como indicador de desempenho à fadiga.

Visto a fraca correlação encontrada entre a resistência à fadiga e o parâmetro RT, alguns autores vêm investigando indicadores adicionais determinados a partir do próprio ensaio de RT, buscando mensurar o desempenho de misturas asfálticas a fadiga por diferentes abordagens.

Faccin (2018) realizou o ensaio de resistência a tração por compressão diametral instrumentado com a obtenção da carga aplicada e do deslocamento do atuador para as vinte e quatro misturas utilizadas neste trabalho. Na Tabela 4.17 são apresentadas a média dos valores de RT, dos Índices de Tenacidade e Flexibilidade, da Tenacidade e das Áreas de Energia de Fratura para três corpos de prova por mistura ensaiados à compressão diametral na temperatura de 25°C, além do respectivo desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4.17 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de Tenacidade, Energias de Fratura, IT e IF.

Mistura	RT			Tenacidade			Energia máxima			Energia Total			IT			IF		
	Média	Sd (MPa)	CV (%)	Média	Sd (MPa)	CV (%)	Média	Sd (MPa)	CV (%)	Média	Sd (MPa)	CV (%)	Média	Sd (MPa)	CV (%)	Média	Sd (MPa)	CV (%)
	(Mpa)			(Mpa)			(Mpa)			(Mpa)			(Mpa)			(Mpa)		
U1-DAER-FXA-50/70	1,89	0,1	5,2	1,78	0,15	8,35	25,69	0,52	2,04	64,95	0,99	1,52	0,13	0,02	18,57	14,7	2,69	18,28
U2-DAER-FXB-50/70	2,11	0,1	4,76	1,91	0,06	2,98	29,33	1,87	6,37	70,55	3,64	5,16	0,11	0,03	27,59	12,14	0,91	7,46
U2-DNIT-FXC-60/85	2,28	0,02	0,72	2,32	0,25	10,87	31,98	4,52	14,12	88,06	6,08	6,91	0,21	0,03	16,68	-	-	-
U2-DNIT-FXC-65/90	1,94	0,08	4,13	1,94	0,06	2,85	29,54	0,39	1,32	79,39	3,16	3,98	0,17	0,02	11,97	20,99	3,12	14,86
U3-DAER-FXB-ECO	1,24	0,04	3,03	1,39	0,1	6,86	20	2,95	14,77	63,47	0,94	1,49	0,28	0,11	37,83	40,2	3,93	9,77
U4-DNIT-FXC-50/70	1,8	0,25	13,97	1,66	0,21	12,4	25,14	4,18	16,62	70,49	4,83	6,85	0,19	0,06	29,37	19,2	3,6	18,75
U4-DNIT-FXB-50/70	1,57	0,06	3,72	1,22	0,08	6,53	18,55	1,5	8,11	54,99	1,49	2,7	0,19	0,03	14,32	14,82	1,78	11,98
U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	2	0,14	6,81	1,71	0,21	12,49	27,36	4,48	16,37	67,46	10,39	15,4	0,1	0,01	13,15	11,87	0,78	6,57
U5-DNIT-FXB-ECO ¹	1,17	0,08	6,97	1,2	0,08	6,72	17,17	1,28	7,45	55,42	5,3	9,56	0,28	0,02	6,08	31,59	4,55	14,39
U5-DAER-FXB-ECO ¹	1,28	0,01	0,94	1,4	0,09	6,65	19,97	1,09	5,46	61,42	6,13	9,97	0,26	0,03	12,13	34,67	8,51	24,54
U6-DNIT-FXC-60/85	2,05	0,09	4,45	1,49	0,05	3,48	25,05	2,75	10,98	55,24	3,35	6,06	0,05	0,04	79,25	7,36	1,89	25,71
U7-DNIT-FXC-60/85	2,31	0,01	0,56	1,6	0,02	1,47	23,82	1,75	7,34	55,34	2,81	5,09	0,06	0,01	10,41	-	-	-
U8-DNIT-FXB-50/70	2,19	0,05	2,39	1,56	0,11	7,14	26,43	2,31	8,75	60,41	2,98	4,94	0,06	0,03	42,38	6,16	0,42	6,79
U8-DNIT-FXC-50/70	1,98	0,16	8,23	1,41	0,21	14,96	21,84	3,93	17,98	62,47	4,15	6,64	0,16	0,05	29,56	10,83	1,88	17,36
U9-DNIT-FXC-60/85	2,2	0	0,1	1,78	0,06	3,44	29,98	1,33	4,44	64,67	1,71	2,64	0,04	0,02	55,08	8,68	0,77	8,88
U9-DNIT-FXC-TLAF	2,25	0,02	1,07	1,83	0,1	5,65	28,13	1,88	6,7	65,22	1,65	2,54	0,07	0,04	57,35	-	-	-
U10-DNIT-FXC-50/70	1,78	0,01	0,68	1,32	0,03	2,45	19,5	0,86	4,43	65,39	5,38	8,23	0,25	0,02	9,83	18,71	3,28	17,54
U11-DAER-FXA-50/70	1,72	0,1	6,11	1,32	0,1	7,3	20,26	1,69	8,32	53,71	3,53	6,57	0,14	0,05	34,71	14,36	4,32	30,13
U12-DAER-FXB-60/85	2,08	0,07	3,45	1,86	0,07	3,63	31,93	3	9,4	68,84	6,88	10	0,1	0,02	16,81	14,82	2,03	13,72
U12-DAER-FXC-60/85	1,87	0,13	6,8	1,91	0,33	17,41	27,91	2,56	9,18	71,71	5,77	8,05	0,15	0,05	30,52	20,1	2,32	11,55
U13-DNIT-FXB-50/70	1,84	0,06	3,01	1,59	0,34	21,62	21,29	0,49	2,32	62,84	4,11	6,54	0,19	0,02	12,89	15,42	1,78	11,55
U14-DNIT-FXC-50/70	1,93	0,03	1,53	1,58	0,12	7,61	25,91	2,35	9,07	59,38	3,64	6,13	0,07	0,02	32,59	11,61	1,37	11,8
U14-DNIT-FXB-50/70	2,08	0,06	3,01	1,59	0,1	6,13	26,54	1,56	5,89	63,58	5,2	8,18	0,08	0,01	11,58	8,88	0,53	6,01
U14-DNIT-FXC-60/85	2,29	0,01	0,31	1,66	0,12	6,97	22,13	2,01	9,06	63	5,75	9,12	0,15	0,03	21,18	-	-	-

Fonte: Faccin (2018)

Uma revisão de literatura sobre estes índices pode ser encontrada em Faccin (2018) e Paniz (2018), não sendo objetivo deste trabalho.

Conforme Faccin (2018), os resultados de RT e energia total apresentam baixos coeficientes de variação, indicando um conjunto de dados homogêneos. Já a Tenacidade e a energia máxima apresentam um CV um pouco mais elevado e os Índices de Tenacidade e Flexibilidade adaptado apresentam, para a maioria das misturas, CV muito elevado, indicando elevada variação de ensaio para a mesma mistura, o que pode inviabilizar a utilização desses índices como indicador de propriedades mecânicas. Para o IF adaptado, não foi possível efetuar o cálculo do índice para algumas misturas devido às mesmas apresentarem elevada resistência à tração e, com isso, chegando próximo ao limite de carga da prensa utilizada, ocasionaram distorções nos gráficos.

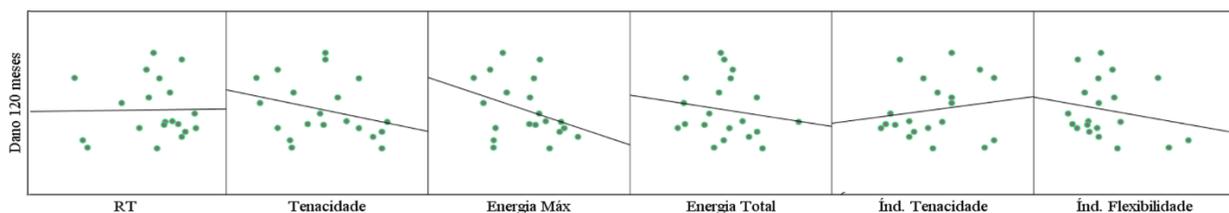
Por meio dos índices obtidos por Faccin (2018), buscou-se obter um modelo indicativo do comportamento das misturas asfálticas frente a resistência a fadiga, fazendo uso de correlação destes com o dano médio acumulado simulado.

Ao confrontar um por um dos índices com o dano médio acumulado se verifica os valores de R^2 para as correlações diretas conforme Tabela 4.18 e Figura 4.57.

Tabela 4.18 - Relação de R^2 para resultados dos índices e do dano acumulado em 120 meses

Relação de R^2	
Variável Experimental	Dano 120 Meses
RT	0,0055
Tenacidade	0,0362
Energia Máxima	0,0660
Energia Total	0,0188
Índice de Tenacidade	0,0040
Índice de Flexibilidade	0,0537

Figura 4.57 - Matriz de correlação entre dano acumulado e índices obtidos a partir do RT

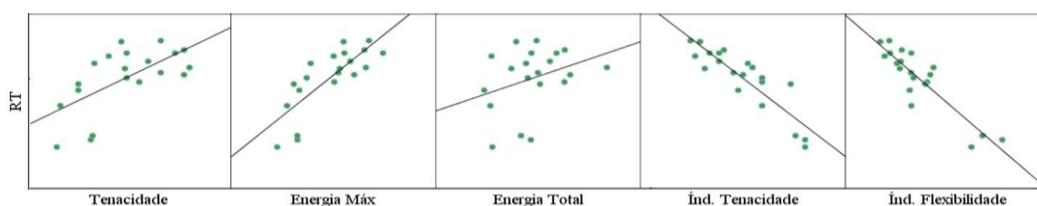


Verifica-se a partir dos valores de R^2 e da matriz de correlações que não existem ligações diretas satisfatórias em qualquer dos casos. Ao procurar tendências em análises de regressão linear múltipla, verifica-se que nenhum dos índices é estatisticamente significativo a nível de

5% de significância, de maneira que para as misturas verificadas neste estudo os índices correlatos ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral não foram conexos aos resultados de desempenho avaliados por dano simulado em condições próximas as reais, sendo inviáveis para utilização na classificação de misturas frente ao fenômeno da fadiga.

Foi possível perceber que, ao se comparar os resultados de RT com os demais índices, existem tendências mais claras conforme Figura 4.58

Figura 4.58 - Correlação entre resultados de RT e demais índices



Considerando a Figura 4.58 acima, verifica-se que existe uma boa correlação entre os resultados de resistência a tração por compressão diametral e os demais índices, apresentando tendências claras de comportamento dos resultados. Como exceção temos os índices de tenacidade e energia total, com maior dispersão dos resultados. Observa-se desta forma que esta tendência de colinearidade entre os resultados indica que os índices estão medindo uma característica próxima a própria resistência a tração da mistura, não oferecendo novas pistas sobre o comportamento à fadiga. Visto que o RT já não apresentou resultados significativos com o dano, reforça-se a idéia de que os índices não são apropriados para serem utilizados como indicadores de resistência à fadiga em concretos asfálticos.

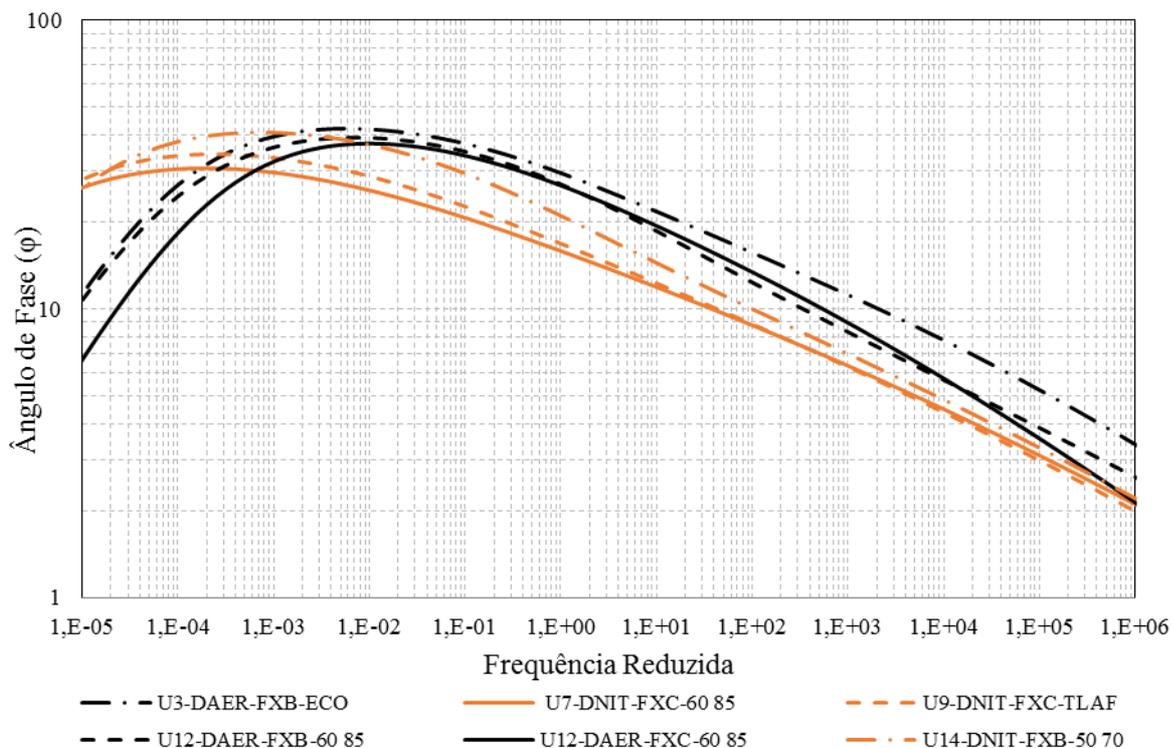
Paniz (2018), ao avaliar os índices correlatos ao RT e os resultados do ensaio de fadiga na tração-compressão para seis misturas com mesmo tipo de agregado, cinco diferentes CAP's 50/70 e um CAP 30/45, concluiu que não é possível afirmar que existe relação entre os índices com os resultados de fadiga. No entanto, a maioria das misturas avaliadas pela autora apresentam o mesmo tipo de ligante, CAP 50/70, com resultados muito próximos, o que dificulta identificar comportamentos diferentes.

4.5.2 Correlações de dano por fadiga com o comportamento linear viscoelástico

Os dados de dano por fadiga foram comparados com a caracterização do comportamento viscoelástico feita por Faccin (2018). Buscou-se correlações entre os módulos de perda e de

estocagem das curvas do plano Cole-Cole, com o pico de ângulo de fase do Diagrama Black e com as curvas mestras de módulo dinâmico; para estas comparações não foram achadas correlações visíveis com o dano por fadiga para as misturas deste trabalho. Entretanto, ao observar o comportamento das curvas mestras de ângulo de fase foi possível constatar que a análise da frequência reduzida, no momento em que o ângulo de fase atinge o máximo valor, consegue separar as misturas com comportamento extremo, seja para melhor ou pior desempenho ao dano por fadiga (Figura 4.59).

Figura 4.59 - Análise da frequência reduzida nos picos de ângulo de fase nas curvas mestras



Conforme pode ser verificado, misturas com o pior desempenho observado nas curvas de dano (em tons de laranja) são misturas que apresentam o pico do ângulo de fase em frequências reduzidas mais baixas, enquanto que misturas com melhor desempenho na análise do dano (curvas pretas) apresentam os picos mais à direita, compreendendo valores maiores de frequência reduzida.

As demais misturas apresentam picos de ângulo de fase em valores extremamente próximos, todos estes entre os picos apresentados na figura acima, de maneira que os resultados são distintos em relação a classificação das misturas pelo dano, não sendo possível estabelecer um padrão entre ambas as classificações.

A análise por meio da frequência reduzida da curva mestra de ângulo de fase indica um balizamento entre misturas com menor e maior nível de dano conforme pode ser observado na Tabela 4.19. Três das quatro piores misturas deste estudo são as que apresentam os picos de ângulo de fase mais defasados a esquerda, enquanto que três das quatro melhores misturas são as que exibem os picos de ângulo de fase mais à direita, em menores frequências reduzidas.

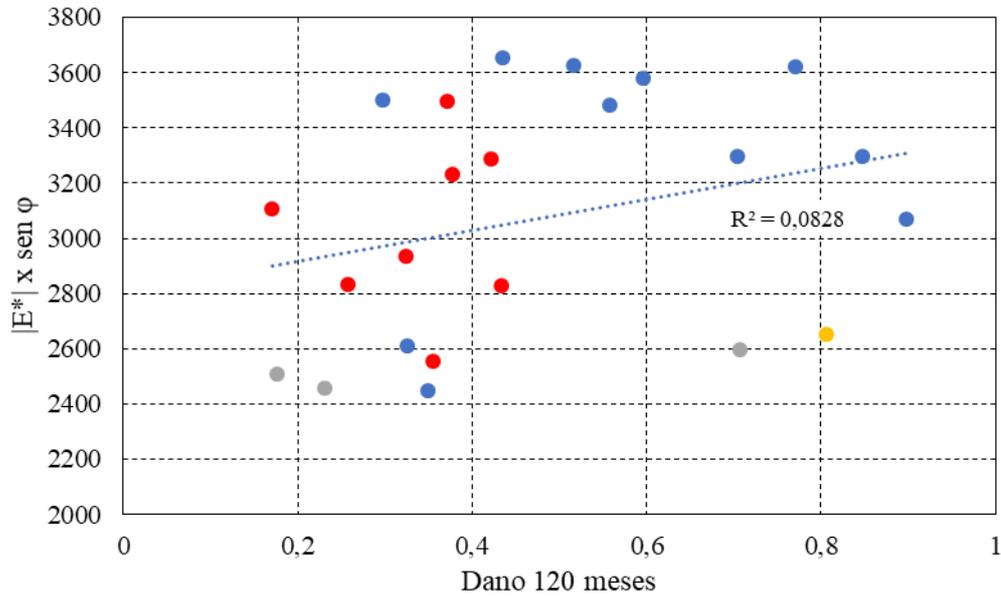
Tabela 4.19 - Valores de frequência reduzida nos picos de ângulo de fase

Mistura	Classificação Dano 120 meses	Frequência reduzida
U7-DNIT-FXC-60/85	24°	0,0002
U9-DNIT-FXC-TLAF	21°	0,0003
U14-DNIT-FXB-50/70	22°	0,0008
U3-DAER-FXB-ECO	3°	0,0063
U12-DAER-FXB-60/85	4°	0,0063
U12-DAER-FXC-60/85	1°	0,0100

Os valores extremos do intervalo de frequência reduzida que compreendem os picos de ângulo de fase deste trabalho podem servir, desde que com prudência, como base e filtro para análise indicativa de classificação a fadiga, visto que o trabalho compreende vinte e quatro misturas com as mais variadas características de composição. Para misturas usuais de concreto asfáltico, valores em que o pico do ângulo de fase ocorra abaixo de 0,0008 de frequência reduzida, provavelmente levarão a misturas com desempenho aquém do esperado em relação a fadiga, ao passo que, valores acima de 0,0063 de frequência reduzida apresentam bons indícios de que a mistura analisada possui um melhor comportamento ao fenômeno. Lembrando que estas correlações fogem da conceituação teórica da literatura, pois abrangem dois domínios de comportamento diferentes, o da viscoelasticidade linear e do dano, e que sua viabilidade deve ser melhor averiguada.

É possível utilizar também os dados do Módulo Complexo para realizar inferências empíricas através da relação $|E^*| \times \sin\phi$. O objetivo desta análise no trabalho é fazer uma correlação direta destas propriedades com o dano médio acumulado por fadiga.

A Figura 4.60 mostra, para as condições de comportamento viscoelástico linear a temperatura de 21°C, a análise da relação $|E^*| \times \sin\phi$ vs o dano médio por fadiga. Quanto menor o valor $|E^*| \times \sin\phi$ melhor seria o comportamento da mistura frente à fadiga (Bohn, 2016; Brondani, 2016; Paniz, 2018; Faccin, 2018).

Figura 4.60 - Correlação entre $|E^*| \times \text{sen}\phi$ por dano acumulado por fadiga

Essa técnica de correlação direta de dados de comportamento viscoelástico com o dano por fadiga se trata apenas de uma inferência, e não foi considerada coerente para as misturas avaliadas neste estudo, de maneira que respostas quanto ao desempenho a fadiga não podem ser obtidas por esta análise. Ao separar as misturas por tipo de ligante também não se encontrou correspondências viáveis para a análise da fadiga. Quando se verifica as correlações para os danos obtidos nas estruturas de 10cm e 15cm as correlações entre dano e $|E^*| \times \text{sen}\phi$ também não são conclusivas.

Já a inferência $|E^*|/\text{sen}\phi$, utilizada como indicativo para resistência a deformações permanente apresentou conforme Faccin (2018) boas correlações com o parâmetro Flow Number. Conforme o autor, somente a rigidez das misturas, para um universo com diferentes ligantes e tipos de agregados não consegue explicar o desempenho a deformação permanente ao se considerar o parâmetro FN, mas, de maneira geral, percebe-se uma tendência de aumento de FN a medida que o $E^*/\text{sen}\phi$ aumenta para a temperatura de 54 C° e 1 Hz.

Paniz (2018), ao avaliar a relação $|E^*| \times \text{sen}\phi$ concluiu que está não se mostrou eficiente quando comparado ao desempenho a fadiga por meio das curvas geradas na simulação com o critério de falha G^R e os dados de rigidez das misturas analisadas. Para a relação $|E^*| / \text{sen}\phi$, referente a deformação permanente, a autora não chegou a respostas conclusivas, entretanto não descartou a viabilidade da relação.

4.6 CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS FRENTE AO FENÔMENO DE FADIGA

De forma a comparar os métodos de classificação utilizados neste trabalho, faz-se um apanhado geral dos dados e posição e de cada mistura para cada um dos métodos utilizados (Tabela 4.20). Como classificação final e balizadora das demais, ranqueou-se as misturas por meio do dano médio acumulado em 120 meses na camada em revestimento, obtido por meio de simulações em condições reais no software FlexPAVE 1.0. Nesta classificação (primeira coluna de misturas da Tabela 4.20) foi utilizado o esquema de cores que parte do tom de azul mais forte para a melhor mistura até o tom de vermelho mais forte para a pior mistura. Este esquema de cores é fixado então a partir da classificação de dano em 120 meses e a média que as misturas trocam de posição em outros métodos de classificação as suas respectivas cores permanecem as mesmas para possibilitar ver de forma mais clara o quanto o ranqueamento muda.

Na segunda coluna está a classificação por meio do fator de área de fadiga para as curvas simuladas pela equação de Nascimento (2015) junto ao critério de ruptura do G^R , e na terceira classificação as curvas de Wöhler obtidas diretamente dos dados experimentais e tendo o fator de área de fadiga calculado pelos mesmos. Lembrando que a análise diretamente pelos dados experimentais é uma abordagem simplista, mas ainda necessária no ponto de vista da prática da engenharia, por esse motivo se resolveu testar sua viabilidade quanto forma de classificação.

Tabela 4.20 – Comparação das classificações propostas para a análise do dano acumulado por fadiga

Classificação	Mistura	Dano 120 meses	Mistura	FAF Simulação G^R	Mistura	FAF Wöhler
1°	U12-DAER-FXC-60/85	0,17	U5-DAER-FXB-ECO ¹	2,393	U5-DAER-FXB-ECO ¹	6,510
2°	U5-DAER-FXB-ECO ¹	0,176	U12-DAER-FXC-60/85	2,269	U3-DAER-FXB-ECO	5,390
3°	U3-DAER-FXB-ECO	0,232	U3-DAER-FXB-ECO	2,084	U12-DAER-FXC-60/85	4,630
4°	U12-DAER-FXB-60/85	0,258	U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	1,745	U2-DNIT-FXC-65/90	4,440
5°	U2-DAER-FXB-50/70	0,297	U6-DNIT-FXC-60/85	1,720	U2-DAER-FXB-50/70	4,430
6°	U9-DNIT-FXC-60/85	0,325	U9-DNIT-FXC-60/85	1,675	U6-DNIT-FXC-60/85	3,570
7°	U11-DAER-FXA-50/70	0,326	U11-DAER-FXA-50/70	1,661	U8-DNIT-FXC-50/70	3,240
8°	U14-DNIT-FXC-50/70	0,349	U2-DAER-FXB-50/70	1,660	U10-DNIT-FXC-50/70	2,830
9°	U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	0,352	U14-DNIT-FXC-50/70	1,628	U11-DAER-FXA-50/70	2,210
10°	U6-DNIT-FXC-60/85	0,356	U2-DNIT-FXC-65/90	1,564	U4-DNIT-FXC-50/70	1,900
11°	U2-DNIT-FXC-65/90	0,372	U2-DNIT-FXC-60/85	1,549	U12-DAER-FXB-60/85	1,770
12°	U2-DNIT-FXC-60/85	0,423	U12-DAER-FXB-60/85	1,548	U9-DNIT-FXC-60/85	1,640
13°	U14-DNIT-FXC-60/85	0,433	U5-DNIT-FXB-ECO ¹	1,543	U1-DAER-FXA-50/70	1,600
14°	U8-DNIT-FXB-50/70	0,435	U8-DNIT-FXC-50/70	1,443	U5-DNIT-FXB-ECO ¹	1,560
15°	U4-DNIT-FXB-50/70	0,516	U14-DNIT-FXC-60/85	1,436	U13-DNIT-FXB-50/70	1,500
16°	U4-DNIT-FXC-50/70	0,558	U1-DAER-FXA-50/70	1,429	U4-DNIT-FXB-50/70	1,480
17°	U8-DNIT-FXC-50/70	0,596	U4-DNIT-FXC-50/70	1,405	U14-DNIT-FXB-50/70	1,330
18°	U1-DAER-FXA-50/70	0,704	U4-DNIT-FXB-50/70	1,404	U9-DNIT-FXC-TLAF	1,310
19°	U5-DNIT-FXB-ECO ¹	0,707	U10-DNIT-FXC-50/70	1,384	U7-DNIT-FXC-60/85	1,130
20°	U10-DNIT-FXC-50/70	0,77	U8-DNIT-FXB-50/70	1,375	U2-DNIT-FXC-60/85	0,890
21°	U9-DNIT-FXC-TLAF	0,806	U14-DNIT-FXB-50/70	1,370	U14-DNIT-FXC-60/85	0,840
22°	U14-DNIT-FXB-50/70	0,847	U13-DNIT-FXB-50/70	1,351	U8-DNIT-FXB-50/70	0,780
23°	U13-DNIT-FXB-50/70	0,898	U7-DNIT-FXC-60/85	1,176	U5-DNIT-FXB-60/85 ¹	0,630
24°	U7-DNIT-FXC-60/85	1	U9-DNIT-FXC-TLAF	1,028	U14-DNIT-FXC-50/70	0,590

Conforme se pode visualizar, o raqueamento por simulação em condições reais pelo dano acumulado correlaciona muito bem com o ranking obtido por meio da simulação de ruptura usando a equação de Nascimento (2016) que leva em conta a rigidez e o critério de ruptura G^R . De forma geral, observa-se pequenas alterações na classificação, entretanto misturas de melhor desempenho continuam habitando a zona superior do ranking, enquanto misturas com piores desempenho continuam se classificando como misturas mais frágeis ao fenômeno de fadiga. Desta forma, conclui-se que a classificação por meio da equação possui forte correlação com o dano por fadiga justificando seu uso como forma de ranquear misturas quanto ao desempenho por fadiga.

Quando se compara o dano simulado no FlexPAVE com a classificação por meio dos dados experimentais brutos, plotados nas curvas de Wöhler, pode-se observar que as classificações não apresentam muitas similaridades. Misturas de melhor desempenho nas simulações próximas as reais em campo, por vezes não apresentam boa classificação quando analisadas somente pelas curvas de Wöhler, o mesmo acontece ao contrário com as misturas mais suscetíveis a fadiga.

Exceto para as três melhores misturas classificadas, o ranking por curvas de Wöhler não apresentou boas correlações. O fato das três primeiras colocadas permanecerem em suas posições nesta classificação se deve ao fato de que foram as misturas com os maiores números de ciclos até a ruptura nas deformações ensaiadas. Este comportamento levou as misturas ao topo nas três classificações, não tendo sido modificado quando se uniu o comportamento de rigidez e da estrutura do pavimento na análise.

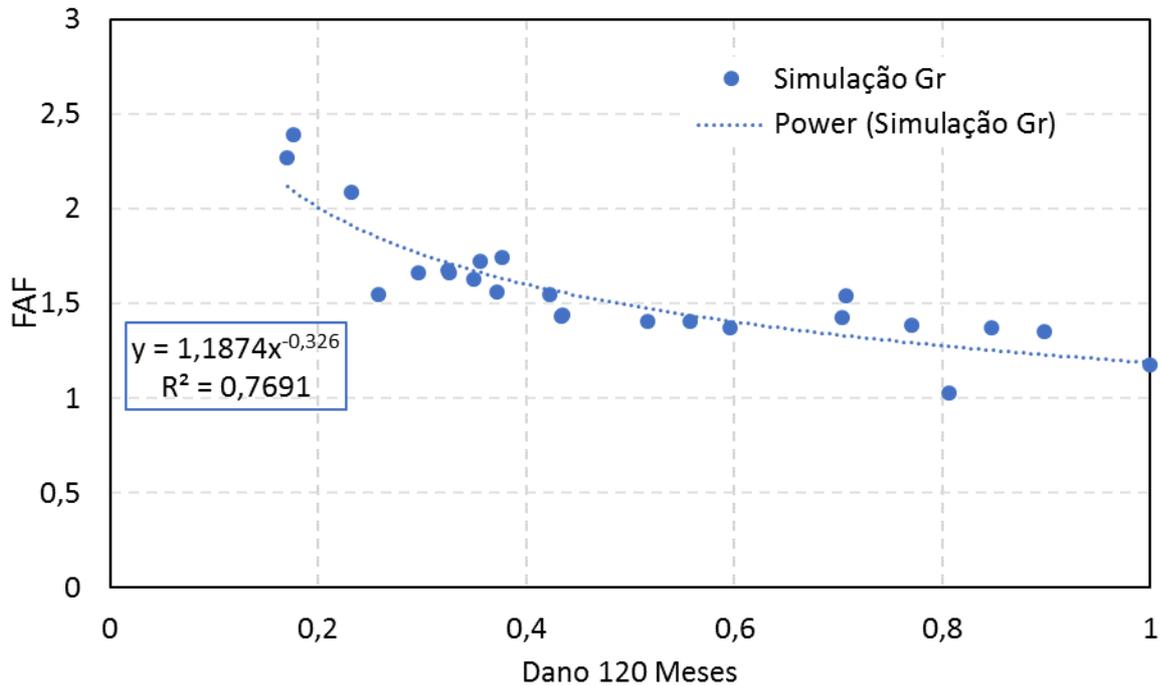
Fica claro desta forma que a abordagem tradicional de classificação por curvas de Wöhler pode servir como um sutil indicativo de classificação, embora seu uso deva ser feito com ressalvas. Para uma caracterização com verdadeira significância, o uso da mecânica do dano contínuo unida ao comportamento viscoelástico, com posterior simulação em estrutura são imprescindíveis.

Vale ressaltar que os valores de FAF obtidos para as classificações pelo critério G^R e diretamente dos dados experimentais pelas curvas de Wöhler, são valores atrelados a ensaios a 19°C de temperatura, 10 Hz de aplicação de carga e com controle de deslocamento do atuador. Estes valores de FAF, ao contrário do dano médio acumulado, são valores sensíveis as condições de ensaio e se alteram a medida que as condições de ensaio mudarem.

Conforme foi verificado na Tabela 4.20, as diferentes classificações apresentam ora boa correlação, para o caso do dano em 120 meses e do parâmetro FAF gerado pela simulação do G^R com a equação de Nascimento (2016), ora com baixa correspondência, para o caso da correlação do dano em 120 meses com o FAF gerado diretamente com as curvas de Wöhler dos dados experimentais dos ensaios.

Estas correlações também podem ser verificadas na Figura 4.61, onde se visualiza o FAF, com área calculada abaixo das envoltórias simuladas, e geradas diretamente pelos dados experimentais.

Figura 4.61 - Correlação entre o parâmetro FAF e o dano simulado em 120 meses



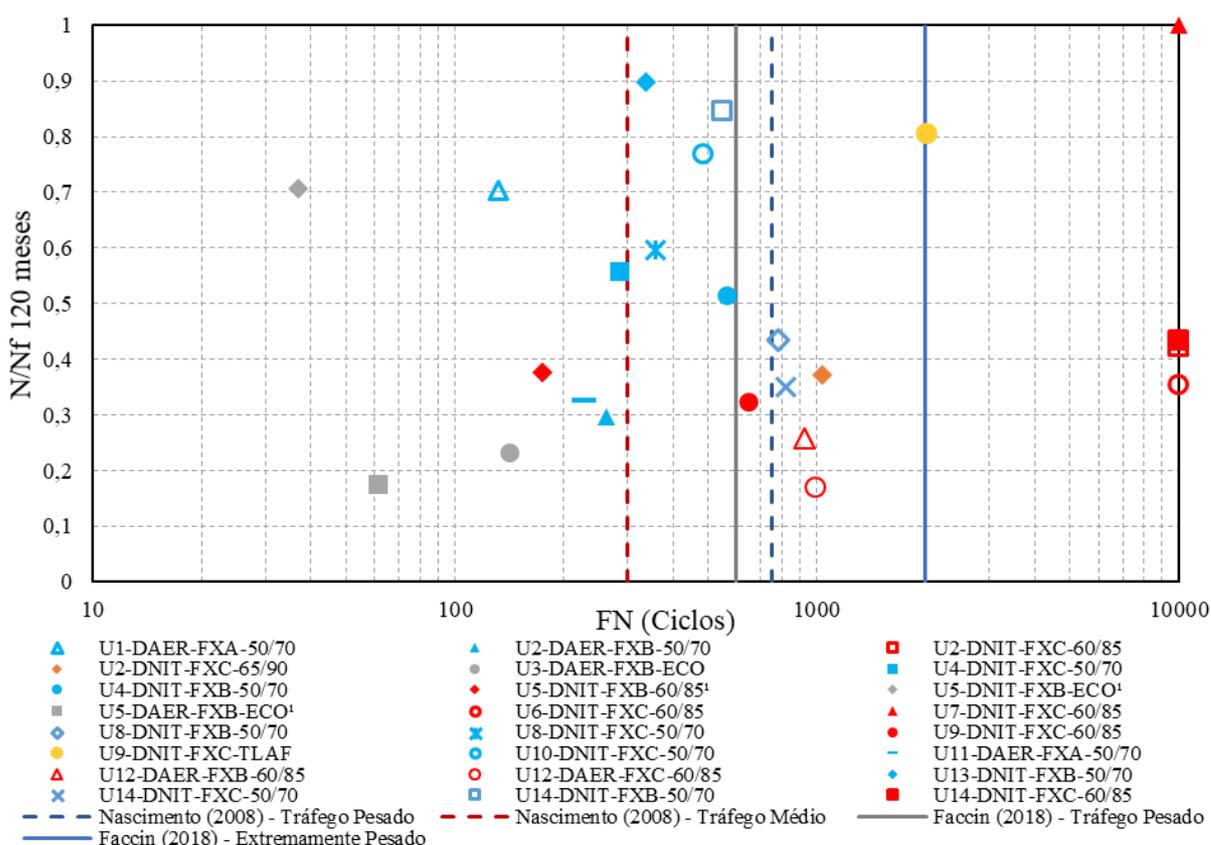
Como exibe a Figura 4.61, a correlação entre o FAF e o dano 120 meses para os dados obtidos junto a simulação do G^R apresenta boa correspondência, apresentando R^2 de 0,7691 para o modelo de potência atribuído. Esta análise colabora com as observações da Tabela 4.20, demonstrando que a equação de Nascimento (2016), que simula um ensaio perfeito, a partir dos dados de rigidez e dos dados advindos do S-VECD, é satisfatória na classificação de misturas quanto a resistência a fadiga, quando comparada ao dano simulado no FlexPAVE em condições próximas as reais.

4.7 CLASSIFICAÇÃO GLOBAL DAS MISTURAS

Nos últimos anos, significativas pesquisas têm sido conduzidas para investigar os fenômenos de fadiga e de deformação permanente, que são os dois principais problemas encontrados nos revestimentos asfálticos. Analisar estes defeitos não é uma tarefa simples, visto que ambos são afetados pelas propriedades dos materiais, condições ambientais e pela estrutura do pavimento. Este trabalho, por fim, buscou verificar de forma abrangente o comportamento frente a ambos os defeitos para as misturas desta pesquisa, de tal modo a obter um panorama geral da situação das misturas utilizadas em campo no Rio Grande do Sul. Para tal avaliação, utiliza-se os resultados de Flow Number e os resultados de dano por fadiga em 120 meses para o cenário testado de espessura de revestimento com 5 cm.

Para se verificar de forma integral o desempenho da amostragem de misturas asfálticas a quente utilizadas no Estado do Rio Grande do Sul frente aos dois principais tipos de defeitos encontrados nos revestimentos asfáltico brasileiros, procedeu-se com a visualização da relação de dano (N/Nf 120 meses) vs FN conforme Figura 4.62 abaixo.

Figura 4.62 - Quadro de classificação global de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente



De maneira geral, as melhores misturas são aquelas que apresentam maior FN, referente a maiores resistências a deformação permanente, e menores níveis de dano médio acumulado em 120 meses, referente a melhores desempenhos frente a fadiga. Isso faz com que misturas posicionadas ao canto inferior direito sejam as consideradas com melhor desempenho.

Ao analisar-se a Figura 4.62, diferentes critérios de escolha das misturas podem ser utilizados. De forma geral, pode-se escolher as misturas olhando primeiro os valores de FN e fixando este como critério eliminatório de misturas frente a condição de tráfego ao qual o pavimento estará sujeito; pode-se escolher as misturas pensando primeiro no dano por fadiga; e também é possível escolher misturas que apresentem resultados bons ou intermediários frente aos dois defeitos; todas estas escolhas balizadas também pelos custos e classes de cada projeto

específico. De forma geral, parece interessante estabelecer o FN como um critério de seleção primeiro e eliminatório, visto que a deformação permanente está ligada fortemente a mistura asfáltica utilizada, de tal forma que, resultados baixos de FN para o tipo de tráfego que será imposto, já levem a exclusão da mistura do processo de seleção. A partir deste momento verifica-se o dano por fadiga, procurando nas misturas que passaram pelo critério do FN por danos baixos por fadiga. Como o dano por fadiga, além das questões intrínsecas as misturas, está diretamente ligado à estrutura do pavimento e a espessura da camada de revestimento, pode-se ainda simular diferentes condições de estruturas de pavimento de maneira a obter limites de danos que se encaixem nas necessidades de projeto.

Ainda não existem limites claros de valores de dano para a avaliação da utilização da mistura em campo. Nascimento (2015), ao desenvolver a função de transferência entre dano simulado e área trincada em pista verifica que o início de trincamento em campo se correlaciona fortemente com o mesmo tempo em que a mistura atinge 0,35 de dano simulado. Verificando as misturas balizado por este critério, é possível perceber que algumas não atingem o dano de 0,35. Para estas misturas, conforme Nascimento (2015) o trincamento provavelmente estabilizara em 10% ou menos de área trincada. Assumindo esta afirmação, conclui-se que as misturas U12-DAER-FXC-60/85, U5-DAER-FXB-ECO, U3-DAER-FXB-ECO, U12-DAER-FXB-60/85 e U2-DAER-FXB-50/70 não chegariam a passar dos 10% de área trincada em campo durante o tempo de projeto, sugerindo bom desempenho frente a fadiga. Entretanto, destas cinco misturas apenas U12-DAER-FXC-60/85 e U12-DAER-FXB-60/85 estão acima dos limites recomendados de Flow Number para tráfego pesado de Nascimento (2008) e Faccin (2018), e nenhuma delas acima do limite para tráfego extremamente pesado indicado por Faccin (2018).

As duas misturas com asfalto borracha embora com bom desempenho frente ao dano por fadiga para os cenários avaliados, não se encontram bem classificadas quando analisadas de maneira global, visto que os resultados de FN e de FN confinado exibiram resultados muito baixos. Entretanto, conforme avaliado por Faccin (2018), o desempenho em campo destas misturas frente ao problema da deformação permanente é satisfatório em condições de tráfego pesado. Além disso, o FN é um parâmetro de resistência a deformação permanente, e não uma propriedade, podendo em certos casos não ser satisfatório para uma análise realmente precisa. Desta forma, as misturas U3-DAER-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO embora não se encontrem em uma boa zona de classificação global, podem ser consideradas também como misturas de bom desempenho em geral.

A grande maioria das misturas com CAP 50/70 não apresentou bom comportamento a deformação permanente. Segundo os limites propostos por Nascimento (2008) apenas duas misturas dentre as 11 analisadas com CAP 50/70 seriam recomendadas para utilização em rodovias com tráfego pesado. Estas mesmas duas misturas (U14-DNIT-FXC-50/70 e U8-DNIT-FXB-50/70) também apresentam níveis de dano por fadiga menos expressivos, entorno de 0,4 de dano médio acumulado em 120 meses, indicando menores níveis de área trincada. Desta forma fica estabelecido através do FN e do dano por fadiga simulado que ambas as misturas, são as que apresentam melhores classificações entre as misturas com ligante convencional CAP 50/70, apresentando bom desempenho frente aos dois principais defeitos nos revestimentos asfálticos. As demais misturas com CAP 50/70 exibiram resultados ou insatisfatórios ou dentro dos limites de tráfego médio para FN. Além disso é possível verificar um nível de maior magnitude dano para a grande maioria destas misturas, colaborando com a observação que a utilização do ligante convencional deve ser condizente com a classe de projeto que se queira atender.

A mistura da usina 9 com ligante TLA Flex apresentou bom desempenho a deformação permanente, exibindo Flow Number de aproximadamente 2000 ciclos, dentro dos limites de tráfego extremamente pesado de Faccin (2018). Entretanto apresentou níveis de dano altos em relação as outras misturas, indicando menores resistências a fadiga. Como se observou neste trabalho e também por Faccin (2018), após o rompimento das amostras seja para ensaio de fadiga ou deformação permanente, o nível de agregados fraturados era muito elevado, embora os resultados de abrasão destes estejam dentro dos limites estabelecidos. Quanto ao ligante TLA Flex julga-se necessário mais ensaios de fadiga a tração-compressão em diferentes misturas para mais esclarecimentos.

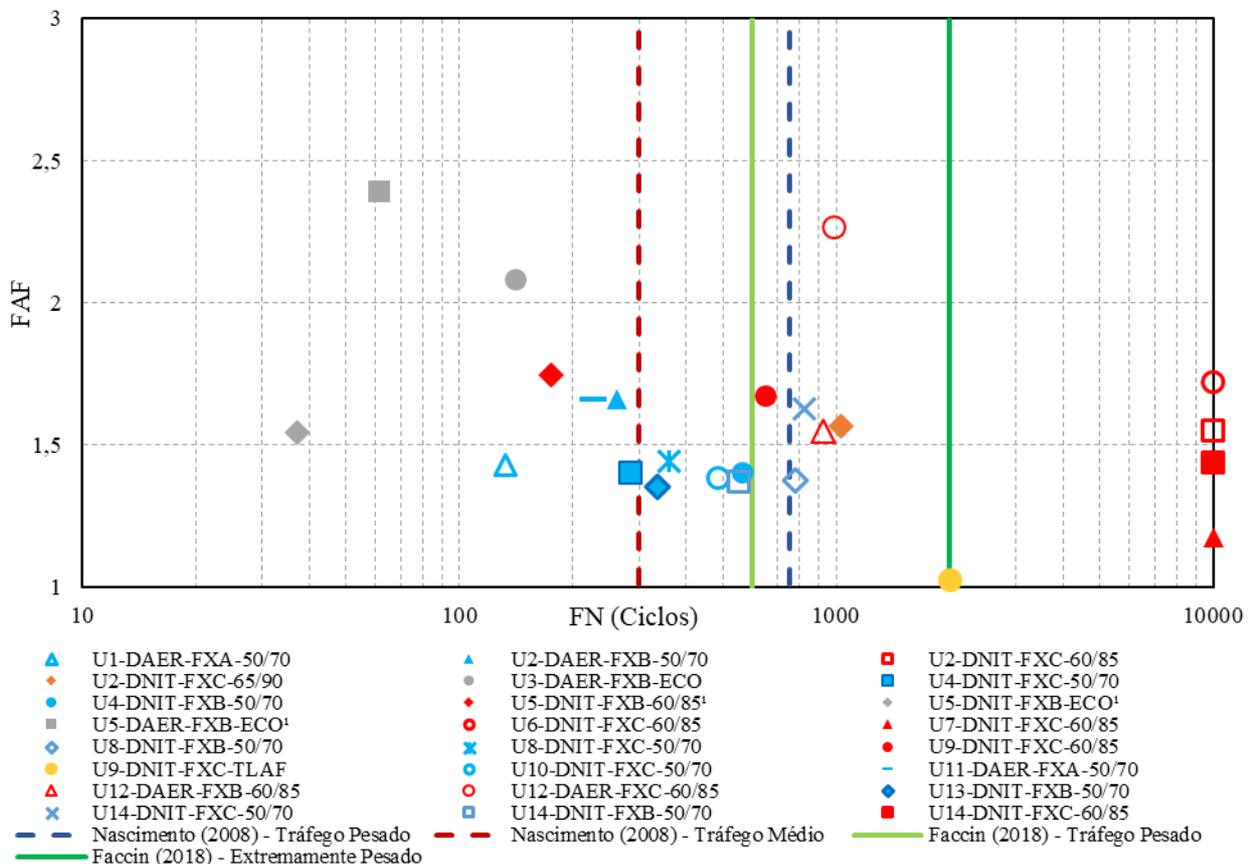
No geral, as misturas com asfalto modificado apresentam maiores valores de FN e menores níveis de dano por fadiga, o que indica que exibirão melhores desempenhos em campo.

Das 9 misturas com ligante modificado, sete se enquadram acima do limite de tráfego pesado de Nascimento (2008) e oito para o de Faccin (2018). Apenas a mistura com AMP 60/85 da usina 5 não apresentou desempenho satisfatório. Quanto ao dano por fadiga todas as misturas com ligante modificado apresentaram danos baixos, entorno de 0,4 para baixo de acúmulo em 120 meses, sugerindo melhor desempenho que as demais misturas. Como exceção, a mistura U7-DNIT-FCX-60/85 que exibiu o pior comportamento entre as vinte e quatro, seja com dados de módulo complexo discrepantes dos demais, seja com Nf de ruptura dos ensaios de fadiga à tração-compressão. Conclui-se assim que as misturas com ligante modificado, desde que com bons projetos de dosagem e estruturas compatíveis com as solicitações, apresentam de modo

geral bom desempenho frente aos problemas de fadiga e deformação permanente nos revestimentos de concreto asfáltico.

Visto que o parâmetro FAF gerado pela simulação do G^R se mostrou como um bom indicador na classificação quanto à fadiga, e que este, não necessita da análise computacional pelo software FlexPAVE para a construção da classificação entre misturas, demonstra-se na Figura 4.63 o quadro de classificação geral quanto à resistência aos dois principais defeitos nos revestimentos asfálticos, comparando os resultados dos parâmetros FAF e FN.

Figura 4.63 - Quadro de classificação global considerando o parâmetro FAF obtido pela simulação G^R e os resultados de FN para deformação permanente



De maneira geral, as melhores misturas são aquelas que apresentam maior FN, referente a maiores resistências à deformação permanente, e maiores níveis FAF, referente a melhores desempenhos frente à fadiga. Isso faz com que misturas posicionadas ao canto superior direito sejam as consideradas com melhor desempenho, ao contrário do apresentado na Figura 4.62, onde se plotou dano 120 meses por *Flow Number*.

Observa-se na Figura 4.63 que as misturas com ligante convencional 50/70 (em azul) apresentam menores valores de FAF, indicando pior desempenho à fadiga, enquanto que

misturas com ligante modificado (em vermelho) e com asfalto borracha (em cinza) exibem valores maiores, sugerindo melhor comportamento. A mistura com ligante TLA (em amarelo) e a mistura U7-DNIT-FXC-60/85, como ja evidenciado, apresentam também nessa classificação o pior comportamento.

De maneira geral, visto que o dano 120 meses se correlaciona muito bem com o FAF calculado nas envoltórias geradas pela equação de Nascimento (2016) também chamada de simulação G^R , os quadros de classificação basicamente se alteram em função de quanto maior o dano, pior o desempenho à fadiga, e quanto maior o FAF melhor o desempenho à fadiga, valendo assim as mesmas considerações já apresentadas na Figura 4.62.

4.8 CONSIDERAÇÕES RESUMIDAS SOBRE OS RESULTADOS

Por meio da avaliação direta dos dados de ensaio, iniciou-se a avaliação da fadiga com a construção das curvas de Wöhler. Aplicou-se como método de classificação o cálculo da área sob a curva gerada pelos dados de deformação e correspondente ciclo de ruptura conhecida por fator de área de fadiga (FAF). O cálculo da área leva a maiores níveis de FAF para misturas posicionadas ao canto superior direito, com retas de menor inclinação, indicando que maiores FAF levam a melhores classificações quanto a resistência a fadiga. Visualizou-se a partir disto um ranqueamento que leva em conta apenas a quantidade de ciclos que a amostra suportou até a ruptura, para um nível de deformação imposto, sem levar em conta as características de rigidez do material. Este ranking classificou as misturas sem a visualização de padrões quanto as características das misturas, e conseguiu estimar as mesmas três melhores misturas frente a fadiga que as análises mais robustas que levam e conta a rigidez e simulações próximas as reais em campo. Entretanto, fora estas misturas, o sistema de classificação direta, pelas curvas de Wöhler apresentou uma alternância muito grande as demais classificações, com misturas de pior desempenho ascendendo no ranking frente a melhores misturas para uma classificação mais precisa. Este fato leva a conclusão que as análises baseadas neste critério devem ser feitas com cautela, não representando bem o real comportamento das misturas frente a fadiga.

Em momento posterior, com os dados do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão e a caracterização LVE, aplicou-se o modelo S-VECD, foco principal do trabalho, para a caracterização ao dano por fadiga das misturas. Desta forma foram geradas as curvas C vs S e as envoltórias de ruptura $G^R \times N_f$.

Em relação as curvas C vs S observou-se comportamentos distintos entre as misturas com asfalto borracha e as demais misturas. As curvas para misturas com ligante CAP 50-70 e

com ligante modificado por polímero apresentam grande similaridade entre si, seja nos intervalos que compreendem a ruptura na perda de integridade e também no dano induzido. Como exceção a este comportamento encontram-se as misturas da Usina 6 e Usina 7 modificadas com adição de polímero in loco, e a mistura com ligante AMP 65/90, que apresentaram ruptura suportando maior perda de integridade. As misturas com asfalto borracha exibem a maior taxa de perda de integridade ao longo dos ciclos, enquanto a mistura com ligante TLA Flex demonstra a menor perda de integridade por ciclo, entretanto rompendo para o menor nível de dano induzido entre todas as misturas. Por meio das curvas C vs S é possível observar um indicativo de que misturas menos rígidas perdem integridade de maneira mais elevada ao longo dos ciclos de carregamento.

Foram apresentadas as envoltórias de ruptura do critério G^R e a partir destas e dos dados do modelo S-VECD, utilizou-se a equação proposta por Nascimento (2016) para a simulação de ciclos de ruptura mais apropriados a realidade de ensaio. Com as curvas de $\epsilon \times N_f$, obtidas junto a simulação, utilizou-se novamente o parâmetro FAF para a classificação das misturas. Obteve-se uma classificação muito semelhante a gerada pelo software FlexPAVE, embora distinta da obtida pelas curvas de Wöhler experimentais. Nesta classificação já foi possível perceber que o tipo de ligante asfáltico é agente principal no desempenho frente ao dano por fadiga.

De posse dos dados do modelo S-VECD, utilizou-se o software computacional FlexPAVE 1.0 para o cálculo do dano médio acumulado por fadiga ao longo do tempo em três estruturas distintas. Nestas estruturas variou-se apenas a espessura do revestimento, mantendo fixas todas as outras condições estruturais, clima e tráfego. Como esperado, à medida que a espessura do revestimento aumentou, os níveis de dano por fadiga diminuíram. Além disso, ao se avaliar a classificação final nas três estruturas simuladas verificou-se que a classificação final de desempenho a fadiga não se alterou. Conforme foi verificado, esta condição diz respeito as misturas estudadas nesta pesquisa, porém, parece haver indícios de que, com as camadas inferiores fixadas, para profundidades usuais de concreto asfáltico, ao variar-se apenas a espessura da camada asfáltica, a classificação entre misturas não se alterará.

Com base nas análises das curvas de dano médio acumulado, pode-se inferir que, de modo geral, a principal característica a influenciar a resistência ao dano por fadiga é o tipo de ligante asfáltico utilizado. Para as composições granulométricas, observou-se que de modo geral, misturas mais finas, com mais porcentagem passante nas malhas #3/8", #4 e #200 apresentam melhores desempenho frente à fadiga.

Dentre as características dos agregados, há indícios para as misturas com ligante convencional CAP 50/70, que o aumento da textura do agregado e da angularidade do pó de pedra leva a melhores desempenhos à fadiga. Para as misturas com ligante modificado o principal parâmetro de influência observado é a forma do agregado, com misturas compostas por agregados mais cúbicos favorecendo a resistência à fadiga.

Quando se analisa as misturas como um todo, e também separadas por tipo de ligante, observa-se indícios de que o teor de ligante não impactou com a importância que era esperado na resistência ao dano por fadiga, talvez pelo fato de que os projetos de dosagem fixassem todos um volume de vazios muito próximo, levando a intervalos de teor de ligante que não favoreçam a observação de uma diferenciação nos valores de dano por fadiga. Para as misturas com ligante CAP 50/70 foram observadas tendências de maiores níveis de dano em misturas com maior teor de ligante. Já para as misturas com ligante modificado AMP 60/85 e AMP 65/90 observou-se a tendência de melhor resistência a fadiga a medida que se aumentou o teor de ligante. Essa importância também foi observada ao se gerar um modelo de regressão múltipla que apresentou o teor de ligante com sutil importância para as misturas com ligante modificado. Para as misturas com asfalto borracha e ligante TLA Flex não foram possíveis observar tendências visto o número reduzido de misturas.

Ao observar as misturas com aditivo surfactante, percebe-se o indicativo de que seu uso não foi significativo na resposta à fadiga das misturas. As misturas U5-DNIT-FXB-60/85 e U5-DAER-FXB-ECO apresentaram níveis baixos de dano, estando a mistura com asfalto borracha na segunda colocação de desempenho a fadiga dentre todas as misturas. Para a mistura U5-DNIT-FXB-ECO, que também fez uso do aditivo surfactante na mesma proporção, o desempenho foi considerado pior, estando a mistura classificada na 19ª colocação. Mocelin (2018) que utilizou o mesmo processo de cálculo do dano médio acumulado verificou que as misturas com ligante convencional apresentam desempenho superior a fadiga com a adição do aditivo, ao passo que as com ligante modificado o resultado encontrado era o oposto.

As correlações testadas entre o dano por fadiga e demais resultados de ensaios não apresentaram resultados satisfatórios, em sua maioria, para inferências à fadiga. O ensaio de RT, muito utilizado como balizador de fadiga na prática de engenharia, não exibiu coerência com dano por fadiga. Os índices correlatos não foram bons preditores do fenômeno de fadiga, e parecem assemelhar-se muito ao próprio ensaio de RT, não indicando comportamentos específicos antes não visualizados. Quando se tenta obter indicativo de fadiga a partir da caracterização viscoelástica, poucas correlações são possíveis. Testou-se possíveis relações entre o dano por fadiga e os planos Cole-Cole e Diagrama Black, onde não houveram relações

visíveis. Quando se analisou a curva mestra de ângulo de fase obteve-se bons indícios de comportamento a fadiga, com os picos defasados para frequências reduzidas mais baixas exibindo piores desempenhos a fadiga, ao passo que os mais deslocados para a direita apresentaram melhor comportamento. Nesta análise, a grande maioria dos picos de ângulo de fase ficaram dentro do intervalo dos picos considerados ruins e dos picos taxados como bons frente a fadiga, desta forma esta análise não foi pertinente para classificar as misturas, mas sim como balizadora de fadiga pela verificação dos extremos apresentados pelos picos no eixo das frequências reduzidas.

Para a verificação de comportamento das misturas frente a fenômeno de fadiga, buscou-se a construção de um cenário típico de simulação para todas as misturas. Este cenário foi construído de forma a representar as condições usuais as quais os revestimento de concreto asfáltico estão inseridos no estado do Rio Grande do Sul. Para isso foi utilizado uma estrutura de pavimento com os materiais mais empregados na região e respectivos módulos de resiliência padrão para estes; um clima representativo a região; e um tráfego próximo as condições das rodovias as quais as misturas estão empregadas.

De maneira geral, para uma grande parcela das misturas se obteve valores médios e baixos de dano, indicando que a amostragem de concretos asfálticos utilizados no Rio Grande do Sul favorece desempenhos satisfatórios frente ao fenômeno de fadiga para as situações usuais aos quais estão expostos, desde que inseridos em adequados projetos estruturais e devido controle executivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O entendimento do fenômeno de fadiga passa por diferentes métodos de abordagem, sendo influenciado pelas características de constituição das misturas, pela gênese da fissuração, pelos fenômenos físicos que influenciam as propriedades de rigidez e resposta viscoelástica durante a aplicação cíclica de carga, pelos critérios de falha, e pela análise do desempenho final que o concreto asfáltico oferece.

Através dos dados obtidos no ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão e também das propriedades de rigidez advindas dos ensaios de módulo complexo, foi possível, através do uso do software computacional FlexPAVE classificar os concretos asfálticos utilizados em campo no estado do Rio Grande do Sul boa precisão. Esta análise de desempenho está diretamente ligada as condições de rigidez e respostas viscoelásticas, aferidas através dos ensaios de módulo; e ao comportamento ligado a danificação do material, este induzido principalmente pela ação do tráfego e pelas questões climatológicas.

A análise de desempenho das misturas asfálticas é tema de extrema importância no cenário da pavimentação, visto que entender o comportamento das misturas frente as condições em que estas estarão expostas é fundamental para o bom desempenho dos pavimentos, tendo como objetivo final propiciar o maior tempo de vida útil possível, aliado a economia de recursos.

As pesquisas para avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas no estado do Rio Grande do Sul, normalmente se restringem a pesquisas laboratoriais. A presente pesquisa propôs um enfoque diferente, por meio da avaliação de diferentes misturas asfálticas efetivamente utilizadas nas rodovias gaúchas, formando um banco de dados com características e propriedades mecânicas e realizando uma análise do estado da prática e do comportamento frente ao dano por fadiga.

A seguir apresentam-se as conclusões referentes aos objetivos esperados no presente trabalho e sugestões para futuras pesquisas. Ressalta-se que as conclusões obtidas se limitam ao universo dos materiais estudados e aos resultados do programa experimental executado e suas respectivas análises.

5.1 CONCLUSÕES

Para avaliar 24 misturas asfálticas em utilização no estado do Rio Grande do Sul frente ao dano por fadiga, foram necessárias diversas etapas metodológicas e de análise dos resultados

para se estabelecer uma classificação criteriosa e de boa precisão. As conclusões quanto a este processo serão apresentadas pontualmente, divididas entre conclusões acerca do processo metodológico e da análise dos resultados.

Quanto ao processo metodológico:

- O aparato desenvolvido por Boeira (2018) para ensaios de tração-compressão foi considerado adequado, uma vez que os sinais de deformação medidos apresentam concordância, sem sinal de perturbações que poderiam ocorrer devido a falhas no projeto;
- O sistema de colagem dos corpos de prova às placas top e down do aparato de tração-compressão com utilização do adesivo estrutural *TecBond Quartzolit* foi satisfatório. As amostras ensaiadas romperam sem que a ancoragem do CP fosse desfeita;
- Os corpos de prova, em sua maioria, apresentaram ruptura dentro da área de abrangência dos LVDT's, satisfazendo a condição para que os ensaios fossem considerados adequados. Algumas das amostras com rompimento fora da zona média das amostras puderam ser validadas por meio da medida de ângulo de fase do atuador da prensa, sendo posteriormente verificado a homogeneidade das curvas c vs s e do critério G^R destes corpos de prova;
- O sistema de controle de deformação inicial por meio do deslocamento do atuador funcionou adequadamente, permitindo maior precisão nos ensaios de deformação, visto que após o processamento dos dados de deformação se verificou que as deformações medidas concordavam com as deformações pré-determinadas para o ensaio. Este processo foi realizado a partir da aplicação de pequenos deslocamentos e monitoramento da deformação na amostra, posteriormente através de iterações era conhecido o deslocamento necessário para a deformação pretendida;
- Os valores de DMR obtidos pela comparação entre as amostras utilizadas para o ensaio de modulo complexo, e as amostras do ensaio de fadiga foram satisfatórios, ficando dentro do intervalo de 10% de diferença máxima de rigidez. Apenas o DMR das amostras com ligante TLA apresentaram diferenças significativas, da ordem de 20 a 25%.

Quanto aos resultados e suas análises:

- A classificação pelo cálculo do FAF nas curvas de Wöhler utilizando diretamente os dados experimentais de deformação aplicada e N_f observado pelo pico do ângulo

de fase não apresentou boas correlações com o dano por fadiga, classificando as misturas de modo diferente do verdadeiro ranqueamento observado pelo dano médio acumulado. Confirma-se assim que análises do desempenho à fadiga de misturas asfálticas apenas por meio das curvas de Wöhler são um tanto quanto limitadas, podendo levar a conclusões equivocadas, sendo extremamente importante levar em conta as características de rigidez das misturas e o uso de simulações em condições reais de tráfego e clima;

- A equação desenvolvida por Nascimento (2015) e o cálculo de FAF utilizando as envoltórias com base no critério de ruptura G^R , embora de abordagem mais simples, apresenta correlações muito boas com a classificação por meio do dano simulado em condições reais, de forma que apresentou viabilidade nos dados deste estudo para ser usada como classificação comparativa entre misturas;
- O fitting das curvas características de dano C vs S através do modelo de potência difundido pela literatura do tema e também utilizado nesta dissertação apresenta ajuste muito preciso para as misturas com ligante convencional, entretanto para misturas com ligante modificado e asfalto borracha, o ajuste por esse modelo nem sempre apresenta elevada precisão, com o final da curva de fitting (danos elevados) apresentado por vezes erro considerável aos dados experimentais calculados;
- As curvas características de dano das misturas com ligante convencional e ligante modificado são bastante similares, com intervalo de ruptura próximos quando se analisa o dano acumulado e a perda de integridade;
- As misturas com asfalto borracha perdem mais integridade para um mesmo valor de dano quando comparadas as outras misturas. Essa perda é ainda mais acentuada para os ciclos iniciais de ensaio;
- As envoltórias de ruptura G^R vs N_f apresentaram um bom coeficiente de determinação (R^2), revelando uma boa uniformidade entre as amostras. Isto também pode ser observado visualmente nas curvas características de dano de cada uma das amostras apresentadas no Apêndice III;
- Ao observar o dano médio acumulado, conclui-se que as misturas com ligante modificado por polímero e as misturas com asfalto borracha apresentam melhor desempenho frente a fadiga do que as misturas com ligante convencional CAP 50/70;

- De maneira geral, exceto para uma mistura, as misturas com asfalto borracha apresentaram comportamento com melhor desempenho do que a maioria das misturas com ligante modificado;
- Quando se mantêm fixas as camadas inferiores do pavimento asfáltico e as condições climáticas e de tráfego, a classificação frente a fadiga atribuída para uma espessura de revestimento provavelmente refletirá de maneira confiável qualquer classificação para demais espessuras dentro dos intervalos de espessura de revestimento e rigidez das misturas testados neste trabalho;
- Quando se analisa as misturas como um todo, e também separadas por tipo de ligante, observa-se indícios de que o teor de ligante impactou levemente na resistência a fadiga, por vezes até ao contrário do que se esperava, com maiores teores levando a piores desempenhos para o caso das misturas com CAP 50/70. Desta forma, o teor de ligante, para as misturas deste estudo, não apresentou a importância que era esperado na resistência ao dano por fadiga;
- Existe uma tendência clara para misturas com ligante modificado e asfalto borracha de que menores rigidezes levam a um melhor desempenho frente ao fenômeno da fadiga. Para ligante convencional CAP 50/70 não se estabeleceu um padrão de comportamento entre dano e rigidez;
- Há indícios de que o uso de aditivo surfactante (0,4% Evotherm para massa do ligante) não impactou nos níveis de dano por fadiga das misturas analisadas nesta pesquisa; com misturas apresentando melhores e piores resultados. O aditivo surfactante foi mais influente nos resultados de FN para avaliação da resistência a deformação permanente;
- Mesmo o tipo de ligante sendo o principal responsável pela resistência a fadiga, o esqueleto mineral também apresenta parcela de importância nesta. Essa característica granulométrica não parece atuar com peso nos resultados de dano. Entretanto, existe um indicativo através dos modelos de regressão múltipla de que misturas mais finas apresentam maior tolerância a fadiga, levando a menores níveis de dano;
- As características de forma, textura e angularidade também foram preditoras importantes nos modelos de regressão múltipla. Observou-se que misturas com AMP 60/85 e 65/90 com agregados menos lamelares e de forma mais cúbica apresentam melhores desempenhos, para estas misturas a esfericidade também foi

preditor importante. Já nas misturas com CAP 50/70 a angularidade do pó de pedra apareceu como variável significativa;

- Não existem fortes indicativos de variação de desempenho para diferentes mineralogias, com os agregados basálticos, graníticos, metamórficos e de diabásio. A ressalva fica por conta das misturas das Usinas 11 e 12 que fazem uso do agregado de diabásio e que apresentaram os melhores desempenhos deste estudo sem que demais características as diferenciasses das demais;
- As simulações com o software FlexPAVE e as imagens de contorno de dano para todas as estruturas sugeriram que o revestimento asfáltico sofre trincamento bidirecional (bottom-up e top-down). Este dano em ambas as fibras, superior e inferior, ocorre em magnitudes diferentes, com o fundo do revestimento sendo atingido em menores tempos e em maiores níveis;
- O ensaio de RT, muito utilizado no cenário da pavimentação brasileira como um indicador de resistência a fadiga não apresentou correlação alguma com os resultados de dano acumulado por fadiga na camada de revestimento, sendo necessária uma revisão mais profunda sobre a viabilidade da continuidade do ensaio como indicador de dano;
- A partir da instrumentação do ensaio de RT e observação de índices correlatos ao ensaio, verifica-se que não existe correlação direta entre estes índices e o dano por fadiga, embora a literatura sobre o tema indique a possibilidade de uso dos mesmos como inferência ao fenômeno de fadiga. Mais estudos são necessários para a avaliação da viabilidade dos mesmos;
- As correlações entre o comportamento viscoelástico e o dano por fadiga não foram satisfatórias em geral. Como exceção, a análise da frequência reduzida no momento do pico de ângulo de fase nas curvas mestras de ângulo de fase exibiu resultados interessantes que podem tornar-se parâmetros de exclusão ou viabilidade de misturas frente ao fenômeno de fadiga;
- O comportamento de fadiga observado neste trabalho exhibe elevadas variações, explicadas pela grande quantidade de variáveis envolvidas: diferentes tipos de ligantes, agregados, faixas granulométricas, dentre outras, explanadas no decorrer da dissertação. Fica claro a partir disto que para o melhor entendimento do fenômeno, trabalhar com misturas com controle de variáveis é uma forma

interessante de cercar as observações e poder inferir com mais precisão as causas que cada alteração leva aos resultados finais de dano;

- O modelo S-VECD junto ao software FlexPAVE permite uma classificação completa do desempenho a fadiga, fundamentada em uma teoria envolvente, e aliada a um protocolo metodológico que necessita de poucas amostras e reduzido tempo de ensaio, demandando por fim menos tempo e tornando a caracterização por fadiga muito precisa;
- Pode-se concluir que o protocolo metodológico de ensaios e análises do modelo S-VECD está validado com êxito na UFSM, após as pesquisas de Boeira (2018), Paniz (2018) e este trabalho.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Já se encontra em andamento no GEPPASV a continuidade dessa pesquisa, com o prosseguimento da monitoração dos trechos, e o estudo do efeito deletério da água, além da caracterização mineralógica dos agregados e reologia dos ligantes. Diante das análises realizadas ao longo da presente pesquisa e das que se encontram em andamento, sugere-se:

- Implementar o protocolo de healing em misturas asfálticas no GEPPASV para avaliar nas mesmas misturas ainda disponíveis para moldagem o potencial de recuperação de integridade em testes parciais de fadiga;
- Monitorar ao longo do tempo o trincamento em campo das misturas aqui caracterizadas a fadiga, para, com a coleta dos dados de tráfego e retroanálise da estrutura, utilizar novamente o software FlexPAVE para a caracterização de dano por fadiga no verdadeiro cenário em que as mesmas estão inseridas, aplicando funções de transferência entre dano simulado e verificando a correspondência com a área trincada;
- Caracterizar e avaliar a reologia e o dano por fadiga nos ligantes asfálticos das misturas para a verificação das correlações entre o desempenho do ligante e o desempenho da mistura;
- Implementação do ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão com amostras reduzidas (38mm x 110mm) e verificação da viabilidade do mesmo, para tornar possível a extração de placas em pista e posterior extração dos corpos de prova para ensaio, verificando a perda de integridade ao longo do tempo em campo, e possíveis

verificações nas macros propriedades visualizadas nos ensaios acerca do envelhecimento da mistura;

- Realizar conforme a disponibilidade dos materiais, ensaios de fadiga a compressão diametral, alimentando modelos para o novo método de dimensionamento (MeDiNa) em implantação no Brasil;
- Aumentar a quantidade de trechos monitorados e o banco de dados acerca das propriedades obtidas nos ensaios, aumentando conseqüentemente a confiabilidade dos dados e o conhecimento sobre os materiais empregados nos concretos asfálticos.

REFERÊNCIAS

AIREY, G. D., RAHIMZADEH, B., & COLLOP, A. C. **Viscoelastic limits for bituminous materials**. *Materials and Structures*, 36, 643-647. DOI: 10.1007/BF0247949, 2003.

ALBERT W. A. J., **Über Treibseile am Harz**. *Archiv für Mineralogie, Geognosie. Bergbau und Hiittenkunde* 10, 215-234 (1837).

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 342-11. **Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures**. Washington, D. C., 2011.

_____. AASHTO TP 107-14 (R2016). **Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1823-13. **Standard Terminology Relating to fatigue and Fracture Testing**, American Society for Testing and Materials, USA, 2013

BAAJ, H. **Comportement des matériaux granulaires traits aux liants hydrocarbonés**, Tese de doutorado, ENTPE-INSA Lyon, 2002.

BAAJ, H., DI BENEDETTO, H., & CHAVEROT, P. **Fatigue of mixes: an intrinsic damage approach**. In 6th International RILEM Symposium (pp. 394-400). Zurich: RILEM. 2003.

BABADOPULOS, L. F. A. **Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará. 2013.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. M.Sc. Thesis, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2014.

BABADOPULOS L., **Phenomena occurring during cyclic loading and fatigue tests on bituminous materials: Identification and quantification**. Tese Mechanics of materials. Université de Lyon, 2017.

BALBO, T. J. **Pavimentação Asfáltica. Materiais, projeto e restauração**. 1º Ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2008.

BODIN, D., **Modèle d'endommagement cyclique: Application à la fatigue des enrobes bitumineux**. Tese de Doutorado. École Central de Nantes et L'Université de Nantes. 2002

BODIN, D., F. BELZUNG, C. DE LA ROCHE, AND A. CHABOT, "Thermomechanical Modelling for Fatigue Damage of Bituminous Materials." 5th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. (2004).

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BRAITHWAITE F., **On the fatigue and consequent fracture of metals.** Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings, Vol. XIII, pp. 463-474, London (1854).

BRENNAN M.J., LOHAN G., GOLDEN J.M., **A laboratory study of the effect of bitumen content, bitumen grade, nominal aggregate grading and temperature on the fatigue performance of dense bitumen macadam.** Proceedings of the IVth International Rilem Symposium, Chapman & Hall, Budapest, p. 358-366, 1990

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

CHEHAB, G., **"Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a Viscoelastoplastic Model."** Ph.D. dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC. (2002).

CHEHAB, G. R., Y. R. KIM, R. A. SCHAPERLY, M. W. WITCZAK, e R. BONAQUIST, **"Time Temperature Superposition Principle for Asphalt Concrete Mixtures with Growing Damage in Tension State."** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 71, pp. 559-593, 2002.

CHEHAB, G. R., Y. R. KIM, R. A. SCHAPERLY, M. WITCZACK, e R. BONAQUIST. **"Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension Using a Viscoelastoplastic Model"**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 72, pp. 315-355, 2003.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity.** Dover Publications, Inc, 1nd Ed. New York, USA, 364 pgs, 1982.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias.** Disponível em <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial> (acessado em 17/11/2017).

DANIEL, J. S. **"Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model and Its Implementation to WesTrack Mixtures."** Ph.D. dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2001.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – PRO 013/94 –** Coleta de amostra de misturas betuminosas para pavimentação. Rio de Janeiro, 1994.

DI BENEDETTO, H. **Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique.** In 4^o Int. RILEM symposium, pg 387 - 401, Budapest. Hungriam outubro 1990.

DI BENEDETTO, H., ASHAYER SOLTANI, M. A., & CHAVEROT, P. **Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 65, 142-158, 1996.

DI BENEDETTO H.; DE LA ROCHE, C.; FRANCKEN, L. **Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Interlaboratory Tests.** Proceedings of the Fifth RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Rotterdam, Netherlands, 1997.

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.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers.** Tome 2. 2005. 283p.

DI BENEDETTO, H., NGUYEN, Q. T., & SAUZÉAT, C. **Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures.** Road Materials and Pavement Design, 12(1), 129–158. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9690356>, 2011.

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

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. **Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes.** Road Materials and Pavements Design. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 2004. 41p.

EPPS J. A., MONISMITH C.L., **Influence of mixture variables on the flexural fatigue properties of asphalt concrete.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), vol. 38, p. 423-458, 1969.

ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. **Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis.** In: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, pp. 497-506, 2012.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2018

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

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.

GOODRICH, J. L., **Asphalt binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 60, 80–120. (1991).

HARVEY, J. J., DEACON, J. A., TSAI, B. W., MONISMITH, C. L., **Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California.** Report prepared for California Department Transportation, University of California, Berkeley, 1995.

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

HOU, T., B. S. UNDERWOOD, KIM, Y. R. **Fatigue Performance prediction of North Carolina mixtures using the simplified viscoelastic continuum damage model.** In: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 79, pp. 35-80, 2010.

HOU, T., **“Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model.”** Ms.C. thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.

HUANG, Y.H., **“Pavement Analysis and Design.”** 2nd edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 2004.

HUET, C. **Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés.** Tese de doutorado. Faculté des Sciences de l'université de Paris, Paris. 1963.

HVEEM, F.N., **“Pavement Deflections and Fatigue Failures”**, *Highway Research Board*, Washington, D.C., bul. 114, pp. 43-87, 1955.

ISAIA. G. C (2007) - **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência dos Materiais”.** Volume 1. Editora: IBRACON, 2007.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N. **One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete.** In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772, 1990.

KIM, R. Y.; KIM, N.; KHOSA, N. P.; **Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete.** American Society for testing materials. Philadelphia. 1992

KIM, Y.R.; LEE, H.J. e LITTLE D.N. **Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, vol. 66, p. 520-574, 1997.

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

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

KIM, Y. R. et al. **Development of a multiaxial VEPCD-FEP++.** Publication FHWA-HRT-08-073. FHWA, U.S. Department of Transportation. (2008)

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

KUTAY, M. E., GIBSON, N., YOUTCHEFF, J. **Conventional and viscoelastic continuum damage (VECD)-based fatigue analysis of polymer modified asphalt pavements.** In: *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 77, pp.395-434, 2008.

LEE, H. J. (1996). “**Uniaxial Constitutive Modeling of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory.**” Ph.D. dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC.

LEE, H. J., KIM, Y. R. A. **Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading.** In: *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 1, pp. 32-40, 1998.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.

MANGIAFICO, S., SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H., POUGET, S., OLARD, F., & PLANQUE, L. **Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: non-linearity, selfheating and thixotropy.** *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup2), 73–99. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077000>, 2015.

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

MOLENAAR, A. A. A. **Prediction of Fatigue Cracking in Asphalt Pavements: Do We Follow the Right Approach?** *Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting–TRB*, Washington, EUA, 2007.

MONISMITH, C.L., DEACON, J.A. **Fatigue of Asphalt Paving Mixture.** *Proceedings American Society of Civil Engineers*. Nova York, Estados Unidos. p. 317-346. 1969.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 1998.

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.** Submetido ao 21º Encontro de Asfalto do IBP. 2014.

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

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga.** Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.

NBR 15897- **Misturas asfálticas a quente – Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave.** Rio de Janeiro 2010.

NOROUZI, A., SABOURI, M., KIM Y. R. **Fatigue life and endurance limit prediction of asphalt mixtures using energy-based failure criterion.** International Journal of Pavement Engineering, DOI: 10.1080/10298436.2016.1141352, 2016.

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

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

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC. 2004.

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

PANIZ, E. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2018.

PARK, S. W., KIM Y. R., SCHAPERLY, R. A. **“A Viscoelastic Continuum Damage Model and Its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete.”** Mechanics of Materials, Vol 24 (4), pp. 241-255. 1996.

PARK, S. W.; SCHAPERLY, R. A. **A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage.** International Journal of Solids and Structures. Vol. 34, nº 8, 931-947. 1997.

PARK, H. J., **Investigation of primary causes of loadrelated cracking in asphalt concrete pavement in North Carolina.** Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2013.

PARK, H. J., KIM, Y. R., **Primary causes of cracking of asphalt pavement in North Carolina: field study.** International Journal of Pavement Engineering. Volume 16 No. 8, 684–698, 2014.

PELL, P.S. **Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes.** Proceedings, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI, pp. 310-323, 1962.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** Tese (doutorado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1991.

PREUSSLER, E.S., PINTO, S., MEDINA, J., **“Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos”**, In: *Anais da 16ª Reunião Anual de Pavimentação da ABPv*, Recife, PE, 1981.

PRONK, A.C., HOPMAN, P.C. (1990) **Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue.** In Highway Research: Sharing the Benefits: Proceedings of a Conference of the United States Strategic Highway Research Program, London, p. 255-267, 1991.

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

RIVIÈRE, N. **Comportement en fatigue des enrobés bitumineux.** Tese (Doutorado). Université de Bordeaux I. Bordeaux. 1996.

SABOURI, M. A., KIM, Y. R. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2447, 117–125. <https://doi.org/10.3141/2447-13>, 2014.

SABOURI, M.; BENNERT, T.; DANIEL, J.; KIM, Y. R. **Evaluating Laboratory-Produced Asphalt Mixtures with RAP in Terms of Rutting, Fatigue, Predictive Capabilities, and High RAP Content Potential.** Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board. Washington, DC. 2015.

SAÏD S.F., **Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures.** Research Report, n 413 00503-8, Vgoch Trafikinstitutet, Sulde, 1988.

SAYEGH, G. **Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux.** Ph.D. Dissertation. Faculté des Sciences de l’université de Paris, Paris. 1965.

SCHAPERLY, R. A. **Irreversible thermodynamics and variational principles with applications to viscoelasticity.** Ph.D. Dissertation. California Institute of Technology, Pasadena, Califórnia. 1962.

SCHAPERLY, R.A. **“A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media, Part I: Theoretical Development, Part II: Approximate methods of analysis, Part III: Analysis of continuous growth.”** International Journal of Fracture, pp. 141-159, 369388, 549-562. 1975.

SCHAPERY, R. A. **"On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws."** Advances in Aerospace Structures and Materials, Aerospace Structures and Materials, 01, S. S. Wang and W. J. Renton, eds., 5-20. 1981.

SCHAPERY, R. A. **Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media.** International Journal of Fracture, Vol.25, No.3, pp. 195-223, 1984.

SCHAPERY, R. A. **A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure.** J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, pp. 215-253, 1990.

SCHWARTZ, C. W., N. GIBSON, AND R. A. SCHAPERY. **Time-Temperature Superposition for Asphalt Concrete at Large Compressive Strains.** In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1789, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 101-112, 2002.

SHAN, L., TAN, Y., UNDERWOOD, S., & KIM, Y. **Application of Thixotropy to Analyze Fatigue and Healing Characteristics of Asphalt Binder.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2179, 85-92. <https://doi.org/10.3141/217910>, 2010.

SHAN, L., TAN, Y., UNDERWOOD, B., & KIM, Y. **Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2207, 89-98. <https://doi.org/10.3141/2207-12>, 2011.

SMITH, B. J., & HESP, S. A. M. **Crack pinning in asphalt mastic and concrete: effect of rest periods and polymer modifiers on the fatigue life.** In Proceedings of the 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Volume 2 (pp. 539-546). Breukelen: Foundation Eurasphalt, 2000.

SOARES, J.B.; SOUZA, F.V. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade.** XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Quito, 2003.

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

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TANGELLA, S. C. S. R. CRAUS, J. DEACOM, J. A. MONISMITH, C. L. **Summary report n fatigue response of asphalt mixtures.** SHRP. TM-UCB-A-003A-89-3. Berkeley, 1990.

TAPSOBA, N. **Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite** Tese de doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-en-Velin, 2011.

TAYEBALI, A.A.; DEACON J.A.; COPLANTZ J.S. e MONISMITH C.L. **Modeling Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures.** Proceedings Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, v. 62, p. 285-421, 1993.

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

TIOUAJNI, S., DI BENEDETTO, H., SAUZÉAT, C., & POUGET, S. **Approximation of Linear Viscoelastic Model in the 3 Dimensional Case with Mechanical Analogues of Finite Size: Application to Bituminous Materials**. Road Materials and Pavement Design, 12(4), 897–930. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9713899>, 2011.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI, M. N. **Characterization and performance prediction of ALF mixtures using a viscoelastoplastic continuum damage model**. In: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 577-636, 2006.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete**. In: 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI N. M., **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model**. International Journal of Pavement Engineering, 11:6, 459-476, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430903398088> 2010.

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

UNDERWOOD, B., 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, 2296, 36–45. <https://doi.org/10.3141/229604>, 2012.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. **Nonlinear viscoelastic behavior of asphalt concrete and its implication for fatigue modeling**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2373, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 100-108, 2013.

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

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

WITCZAK, M. W.; **Development of a e* master curve database for lime modified asphaltic mixtures**, Arizona State University Research Project, Department of Civil and Environmental Engineering ASU, 2004.

WÖHLER, A. **Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl**. Zeitschrift für Bauwesen, 20, 73-106. 1870.

WOLDEKIDAN, M. F. **Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar.** Dissertação (Mestrado). Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands. 260 pgs. 2011.

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

ZHAO, Y. AND KIM, Y.R., **Time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832 (1), 161– 172. 2003.

ZHANG, J. (2012). **Development of Failure Criteria for Asphalt Concrete Mixtures under Fatigue Loading.** Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.

ZHANG, J., SABOURI, M., KIM, Y. R., GUDDATI, M. N. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading.** In: Road Materials and Pavement Design, Vol. 14, Supplement 2, pp.1-15, 2013.

APÊNDICES

Apêndice I - Quadros resumo das características de cada mistura

Figura 0.1 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U1-DAER-FXA-50/70

MISTURA U1-DAER-FXA-50/70														
Trecho	RS 344		1. Ligante											
Mun. Usi.	Santa Rosa		Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua contrafluxo - 80 ton/h		Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado	Basáltico		5,03	5,84	*	50/70		55	50		>236	1,003		
2. Composição Granulométrica														
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)										
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno								
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1/2'	12,7	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/8'	9,5	80,00	100,00	97,40	95,73	*								
4	4,8	55,00	75,00	65,10	63,03	*								
8	2,38	35,00	50,00	43,30	42,73	*								
30	0,59	18,00	29,00	22,10	24,30	*								
50	0,297	13,00	23,00	16,60	18,98	*								
100	0,15	8,00	16,00	12,20	12,32	*								
200	0,075	4,00	10,00	8,40	6,71	*								
3. Características dos Agregados						4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 9,5 mm							
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD				
			27	73			AG	GAF	FAF	(%)				
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,4 a 0,55)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	45,40%			
1,0%	23,1%	61,4%	3,0%	*	*	*	1,146	0,569	0,507					
5. Características Mecânicas da Mistura						6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência		Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,64	Estabilid.	1145,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,70%	DMT	*	Fluência	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,00%	Gmb	2,535		3,30
6675	318	4,77	132	5,6	4,2	1,89	0,1	5,2	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT					
Parâmetros do Modelo 2S2PID						WLF		Tenacid.	Energia Máxima	Índ. Flexibilidade				
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	1,78 MPa	CV=8,35%	25,69 MPa	CV=2,04%	14,7 Mpa	CV=18,28%
75	34600	0,21	0,55	2,6	0,1300	10000	21,85	161,96	Índice de Tenacid.	Energia Total			1	
									0,13 Mpa	CV=18,57%	64,95 Mpa	CV=1,52%		

Figura 0.2 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U2-DAER-FXB-50/70

MISTURA U2-DAER-FXB-50/70														
Trecho	RS 509				1. Ligante									
Mun. Us	Santo Ângelo				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.
Usina	Contínua contrafluxo - 80-120 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)	
Agregado	Basáltico				5,10	5,15	*	50/70		60	49,4		>236	
2. Composição Granulométrica														
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)										
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno								
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1/2'	12,7	80,00	100,00	88,62	90,34	*								
3/8'	9,5	70,00	90,00	83,18	80,41	*								
4	4,8	50,00	70,00	63,69	60,26	*								
8	2,38	35,00	50,00	41,72	39,41	*								
30	0,59	18,00	29,00	20,33	19,47	*								
50	0,297	13,00	23,00	14,34	13,47	*								
100	0,15	8,00	16,00	9,21	10,63	*								
200	0,075	4,00	10,00	6,04	5,68	*								
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados							
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm							
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD			
		20	16	59		5		AG	GAF	FAF	(%)			
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 a 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	39,10%			
1,4%	16,0%	56,9%	3,2%	*	*	*	1,029	0,432	0,517					
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos							
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,678	Estabilid.	1385,00Kg
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	17,20%	DMT	*	Fluência	3,11 1/100"(mm)
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,10%	Gmb	2,568		
8210	401	4,88	262	18,9	7,2	2,11	0,1	4,76	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT					
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.		Energia Máxima		Índ. Flexibilidade	
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	1,91 Mpa	CV=2,98%	29,33 Mpa	CV=6,37%	12,14 Mpa	CV=7,46%
95	35200	0,215	0,61	2,7	0,2200	10000	19,54	152,17	Índice de Tenacid.		Energia Total		2	
									0,11 Mpa	CV=27,59%	70,55 Mpa	CV=5,16%		

Figura 0.3 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U2-DNIT-FXC-60/85

MISTURA U2-DNIT-FXC-60/85														
Trecho	RS 344				1. Ligante									
Loc. Usi.	Santo Ângelo - RS				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.
Usina	Contínua contrafluxo - 80-120 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	AMP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)	
Agregado	Basáltico				5,15	4,31	*	60-85		56	68	86	>236	
2. Composição Granulométrica														
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)										
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno								
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1/2'	12,7	80,00	100,00	82,90	87,98	*								
3/8'	9,5	70,00	90,00	74,80	74,68	*								
4	4,8	44,00	72,00	51,10	49,89	*								
10	2	22,00	50,00	28,60	27,98	*								
40	0,42	8,00	26,00	11,90	13,09	*								
80	0,18	4,00	16,00	8,90	9,56	*								
200	0,075	2,00	10,00	5,90	6,56	*								
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados							
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm							
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD				
*	*	30	20	50	*	*	AG	GAF	FAF	(%)				
Absorção	Abrasão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 a 0,75)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	36,20%			
1,4%	16,0%	56,9%	3,2%	*	*	*	0,979	0,406	0,559					
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos							
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,669	Estabilid.	1630,00Kg
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,00%	DMT	*	Fluência	3,56 1/100" (mm)
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,00%	Gmb	2,590		
9222	566	6,13	10000 ¹	-	-	2,28	0,02	0,72	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT					
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	Energia Máxima	Índ. Flexibilidade			
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	2,32 Mpa	CV=10,87%	31,98 Mpa	CV=14,12%	*	CV=%
100	33800	0,21	0,56	2,7	0,1500	2000	19,66	151,17	Índice de Tenacid.	Energia Total	3			
									0,21 Mpa	CV=16,68%	88,06 Mpa	CV=6,91%		

Figura 0.4 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U2-DNIT-FXC-65/90

MISTURA U2-DNIT-FXC-65/90																	
Trecho	RS 344				1. Ligante												
Mun. Us	Santo Ângelo				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Contínua contrafluxo - 80-120 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	AMP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregado	Basáltico				5,15	5,18	*	65-90		50	87,5	91	>236		1,006		
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1 1/2'	38,1	100	100	100,00	100,00	*											
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100	100	100,00	100,00	*											
1/2'	12,7	80	100	82,90	87,12	*											
3/8'	9,5	70	90	74,80	74,30	*											
4	4,8	44	72	51,10	49,46	*											
10	2	22	50	28,60	26,53	*											
40	0,42	8	26	11,90	10,39	*											
80	0,18	4	16	8,90	7,33	*											
200	0,075	2	10	5,90	4,84	*											
3. Características dos Agregados						4. Critérios de Seleção dos Agregados											
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm										
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD							
		30	20	50			AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 a 0,75)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	36,50%						
1,4%	16,0%	56,9%	3,2%	*	*	*	0,967	0,367	0,488								
5. Características Mecânicas da Mistura						6. Parâmetros Volumétricos											
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,669	Estabilid.	-			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,00%	DMT	*	Fluência	-			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,00%	Gmb	2,59					
7262	317	4,37	1033	62,9	6,1	1,94	0,08	4,13	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID						WLF			Tenacid.	1,94 Mpa	CV=2,85%	Energia Máxima	29,54 Mpa	CV=1,32%	Índ. Flexibilidade	20,99 Mpa	CV=14,86%
									Índice de Tenacid.	0,17 Mpa	CV=11,97%	Energia Total	79,39 Mpa	CV=3,98%	4		
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2									
150	34700	0,221	0,55	2,6	0,0800	5000	19,74	151,94									

Figura 0.5 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U3-DAER-FXB-ECO

MISTURA U3-DAER-FXB-ECO														
Trecho	RS 509				1. Ligante									
Mun. Us	Itaara				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.
Usina	Contínua contrafluxo - 80 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	ECOFLEX	0,03%	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)	
Agregado	Basáltico				6,76	6,8	*	AB-08	Dope	53	63	70	>240	1,01
2. Composição Granulométrica														
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)										
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno								
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1/2'	12,7	80,00	100,00	88,30	89,59	*								
3/8'	9,5	70,00	90,00	81,30	78,12	*								
4	4,8	50,00	70,00	59,70	50,47	*								
8	2,38	35,00	50,00	39,70	33,58	*								
30	0,59	18,00	29,00	22,00	16,24	*								
50	0,297	13,00	23,00	17,10	11,42	*								
100	0,15	8,00	16,00	11,60	7,40	*								
200	0,075	4,00	10,00	7,00	5,00	*								
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados							
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm							
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD			
		20	20	58	2		AG	GAF	FAF	(%)				
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 a 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	45,20%			
2,8%	14,5%	60,7%	0,4%	*	*	*	1,264	0,435	0,52					
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos							
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,10%	DMM	2,393	Estabilid.	1287,00Kg
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,60%	DMT	*	Fluência	3,20 1/100" (mm)
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,30%	Gmb	2,215		
4966	249	5,01	158	17,2	12,2	1,24	0,04	3,03	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT					
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,39 Mpa	Energia Máxima	20,0 Mpa	Índ. Flexibilidade	
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	CV=6,86%	CV=14,77%	40,2 Mpa	CV=3,93%		
30	24500	0,228	0,58	2,9	0,0200	10000	19,52	152,04	Índice de Tenacid.	Energia Total	5			
									0,28 Mpa	CV=37,83%	63,47 Mpa	CV=1,49%		

Figura 0.6 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U4-DNIT-FXC-50/70

MISTURA U4-DNIT-FXC-50/70																	
Trecho	BR 287			1. Ligante													
Mun. Us	Dilermando de Aguiar			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.				
Usina	Contínua fluxo paralelo - 100-150 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)					
Agregado	Basáltico			5,10	6,16	*	50-70										
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1 1/2'	38,1	100	100	100,00	100,00	*											
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100	100	100,00	100,00	*											
1/2'	12,7	80	100	92,50	90,00	*											
3/8'	9,5	70	90	81,50	80,17	*											
4	4,8	44	72	55,00	64,76	*											
10	2	22	50	28,40	36,56	*											
40	0,42	8	26	14,30	15,08	*											
80	0,18	4	16	10,90	11,17	*											
200	0,075	2	10	6,30	7,62	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm										
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD						
		25	20	55			AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	39,90%						
1,5%	11,0%	57,7%	1,9%	*	*	*	0,777	0,392	0,516								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,70%	DMM	2,635	Estabilid.	1027,00Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,50%	DMT	*	Fluência	2,92 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,00%	Gmb	2,537					
7377	320	4,34	284	42,9	15,1	1,8	0,25	13,97	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,66 Mpa	CV=12,4%	Energia Máxima	25,14 Mpa	CV=16,62%	Índ. Flexibilidade	19,2 Mpa	CV=18,75%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	Energia Total		6					
50	32200	0,22	0,605	2,4	0,0950	20000	19,54	152,17	0,19 Mpa	CV=29,37%	70,49	CV=6,85%					

Figura 0.7 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U4-DNIT-FXB-50/70

MISTURA U4-DNIT-FXB-50/70															
Trecho	BR 287				1. Ligante										
Mun. Us	Dilrmando de Aguiar				Teor de Ligante (%)		Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua Fluxo Paralelo - 100-150 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	CAP	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregad	Basáltico				4,70	5,46	*	50-70							
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	95,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	80,00	100,00	99,32	99,32	*									
3/8'	9,5	45,00	80,00	80,38	80,38	*									
4	4,8	28,00	60,00	59,13	59,13	*									
10	2	20,00	45,00	32,08	32,08	*									
40	0,42	10,00	32,00	13,09	13,09	*									
80	0,18	8,00	20,00	10,50	10,50	*									
200	0,075	3,00	8,00	7,79	7,79	*									
3. Características dos Agregados															
Porcentagem por fração (%)							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Mistura TMN 19 mm							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
		35	15	50			AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrasão	Eq.Areia	Sanidade	Ind.Forma	Lamelar.	AIMS	Limites				42,90%				
0,3%	11,0%	57,0%	1,9%	*	*	*	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,49%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,670	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,10%	DMT	*	Estabilid.	1230,00Kg	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,00%	Gmb	2,551	Fluência	2,10 1/100" (mm)	
9826	650	6,62	564	43,4	7,7	1,57	0,06	3,72	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,22 Mpa	Energia Máxima	18,55 Mpa	Índ. Flexibilidade	14,82 Mpa	CV=11,98%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,19 Mpa	Energia Total	54,99 Mpa	CV=2,7%	7	
90	31500	0,24	0,575	2,45	0,1300	6000	21,61	152,07							

Figura 0.8 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U5-DNIT-FXB-60/85

MISTURA U5-DNIT-FXB-60/85															
Trecho	BR 392			1. Ligante											
Mun. Us	Capão do Leão			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua Contrafluxo - 80-120 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	AMP	0,4% Evotherm	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregad	Granítico			4,80	4,85	*	60/85		51	65,2	86	>236	1,008		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	95,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	80,00	100,00	98,00	96,66	*									
3/8'	9,5	45,00	80,00	65,26	71,81	*									
4	4,8	28,00	60,00	48,38	51,29	*									
10	2	20,00	45,00	31,05	30,53	*									
40	0,42	10,00	32,00	15,51	13,90	*									
80	0,18	8,00	20,00	9,81	7,67	*									
200	0,075	3,00	8,00	5,67	4,29	*									
3. Características dos Agregados						4. Critérios de Seleção dos Agregados									
Porcentagem por fração (%)						Mistura TMN 19 mm									
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD					
		40	15	44	1		AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	nd. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	44,60%				
0,5%	26,4%	71,0%	5,4%	*	*	*	0,728	0,427	0,492						
5. Características Mecânicas da Mistura						6. Parâmetros Volumétricos									
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,442	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,10%	DMT	*	Estabilid.	1190,00Kg	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	75,00%	Gmb	2,345	Fluência	3,30 1/100" (mm)	
8054	297	3,69	175	12,0	6,9	2	0,14	6,81	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID						WLF			Tenacid.	1,71 MPa	Energia Máxima	27,36 Mpa	Índ. Flexibilidade	11,87 Mpa	CV=6,57%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,1 Mpa	Energia Total	67,46 Mpa	CV=15,4%	8	
79	32470	0,22	0,55	2,55	0,0800	5000	19,53	152,07							

Figura 0.9 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U5-DNIT-FXB-ECO

MISTURA U5-DNIT-FXB-ECO																	
Trecho	BR 392				1. Ligante												
Mun. Us	Capão do Leão				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Contínua Contrafluxo - 80-120 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	ECOFLEX	0,4% Evotherm	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregado	Granítico				6,20	5,75	*	AB-8		48	56,3	68	279	1,019			
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1'	25,4	95,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	80,00	100,00	100,00	97,35	*											
3/8'	9,5	45,00	80,00	67,80	74,91	*											
4	4,8	28,00	60,00	47,90	53,07	*											
10	2	20,00	45,00	30,10	32,33	*											
40	0,42	10,00	32,00	14,80	10,22	*											
80	0,18	8,00	20,00	8,30	5,07	*											
200	0,075	3,00	8,00	5,00	2,22	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm										
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD						
		35	18	46	1		AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites			43,70%							
0,5%	26,4%	71,0%	5,4%	*	*	*	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)								
							0,871	0,393	0,367								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,388			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,00%	DMT	*	Estabilid.	710,00Kg			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,00%	Gmb	2,293	Fluência	2,79 1/100" (mm)			
5431	300	5,52	37	5,0	13,7	1,17	0,08	6,97	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,2 MPa	CV=6,72%	Energia Máxima	17,17 Mpa	CV=7,45%	Índ. Flexibilidade	31,59 Mpa	CV=14,39%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,28 Mpa	CV=6,08%	Energia Total	55,42 Mpa	CV=9,56%	9		
50	28100	0,22	0,55	3	0,0500	5000	19,54	152,17									

Figura 0.10 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U5-DAER-FXB-ECO

MISTURA U5-DAER-FXB-ECO																	
Trecho	BR 392			1. Ligante													
Mun. Us	Capão do Leão			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.				
Usina	Contínua contrafluxo - 80-120 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	ECOFLEX	0,4%	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)					
Agregado				6,02	5,91	*	AB-08	Evother	48	56,3	68	279	1,019				
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100	100	100,0	100,00	*											
1/2'	12,7	80	100	89,9	94,12	*											
3/8'	9,5	70	90	81,4	87,53	*											
4	4,8	50	70	57,5	60,30	*											
8	2,38	35	50	41,8	41,30	*											
30	0,59	18	29	22,7	19,80	*											
50	0,297	13	23	16,3	12,84	*											
100	0,15	8	16	11,1	7,67	*											
200	0,075	4	10	7,5	4,27	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm										
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD						
		20	25	54		1	AG	GAF	FAF	(*)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	nd. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,5 - 0,65)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)							
0,5%	26,4%	71,0%	5,4%	*	*	*	0,885	0,479	0,387								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,389	Estabilid.	1351,00Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	17,30%	DMT	*	Fluência	2,55 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,70%	Gmb	2,293					
4738	206	4,35	61	7,0	11,5	1,28	0,01	0,94	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,4 MPa	CV=6,65%	Energia Máxima	19,97 Mpa	CV=5,46%	Índ. Flexibilidade	34,67 Mpa	CV=24,54%
									Índice de Tenacid.	0,26 Mpa	CV=12,13%	Energia Total	61,42 Mpa	CV=9,97%	10		
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2									
35	27900	0,238	0,565	3,6	0,0450	20000	19,75	152,03									

Figura 0.11 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U6-DNIT-FXC-60/85

MISTURA U6-DNIT-FXC-60/85															
Trecho	RS 470			1. Ligante											
Mun. Us	Veranópolis			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua contrafluxo - 80 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	AMP	Modific.	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado	Basáltico			5,40	5,53	*	60-85	em obra	48	66	87	>236	1,028		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100,00	100,00	99,88	100,00	*									
1/2'	12,7	80,00	100,00	88,75	91,34	*									
3/8'	9,5	70,00	90,00	81,74	80,62	*									
4	4,8	44,00	72,00	60,87	60,30	*									
10	2	22,00	50,00	39,46	32,54	*									
40	0,42	8,00	26,00	16,21	11,99	*									
80	0,18	4,00	16,00	8,91	6,03	*									
200	0,075	2,00	10,00	4,86	4,52	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD					
		27	20	53			AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,5 - 0,65)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	35,50%				
2,9%	11,8%	62,5%	3,7%	*	*	*	0,911	0,397	0,391						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,50%	DMM	2,354	Estabilid.	1750,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,80%	DMT	*	Fluência	3,56 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	75,00%	Gmb	2,254			
8576	538	6,28	10000 ¹	-	-	2,05	0,09	4,45	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,49 MPa	Energia Máxima	25,05 Mpa	Índ. Flexibilidade	7,36 Mpa	CV=25,71%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	Energia Total	11				
85	26000	0,21	0,52	2,5	0,3300	6000	20,68	151,96	0,05 Mpa	CV=79,25%	55,24 Mpa	CV=6,06%			

Figura 0.12 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U7-DNIT-FXC-60/85

MISTURA U7-DNIT-FXC-60/85															
Trecho	RS 470			1. Ligante											
Mun. Us	Veranópolis			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua contrafluxo - 100 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	AMP	Modific.	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado	Basáltico			5,40	5,60	*	60-85	em obra	48	66	87	>236	1,028		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100,00	100,00	99,88	100,00	*									
1/2'	12,7	80,00	100,00	88,75	88,79	*									
3/8'	9,5	70,00	90,00	81,74	81,40	*									
4	4,8	44,00	72,00	60,87	67,02	*									
10	2	22,00	50,00	39,46	42,45	*									
40	0,42	8,00	26,00	16,21	11,27	*									
80	0,18	4,00	16,00	8,91	6,23	*									
200	0,075	2,00	10,00	4,86	4,01	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
		27	20	53			AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	39,00%				
2,9%	11,8%	62,5%	3,7%	*	*	*	0,773	0,392	0,333						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,50%	DMM	2,354	Estabilid.	1750,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	18,80%	DMT	*	Fluência	3,56 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	75,00%	Gmb	2,254			
10377	756	7,29	10000 ¹	-	-	2,31	0,01	0,56	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,6 MPa	Energia Máxima	23,82 Mpa	Índ. Flexibilidade	-	CV=--%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,06 Mpa	Energia Total	55,34 Mpa	CV=5,09%	12	
85	22800	0,192	0,468	2,55	0,6000	10000	15,29	119,7							

Figura 0.13 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U8-DNIT-FXB-50/70

MISTURA U8-DNIT-FXB-50/70															
Trecho	BR 290			1. Ligante											
Mun. Us	Uruguaiana			Teor de Ligante (%)		Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Contínua Contrafluxo - 140 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	CAP	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregad				4,60	4,71	*	50/70	51	50,8		>236	1,000			
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	95,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	80,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/8'	9,5	45,00	80,00	76,50	80,07	*									
4	4,8	28,00	60,00	51,40	52,58	*									
10	2	20,00	45,00	26,00	24,79	*									
40	0,42	10,00	32,00	12,40	10,82	*									
80	0,18	8,00	20,00	8,80	8,33	*									
200	0,075	3,00	8,00	5,50	7,03	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD					
		31	10	57	2		AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrasão	Eq. Areia	Sanidade	nd. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	37,80%				
2,6%	12,5%	61,7%	4,7%	*	*	*	0,334	0,546	0,546						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	5,03%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,584	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,25%	DMT	*	Estabilid.	1042,00Kg	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	69,05%	Gmb	2,454	Fluência	3,15 1/100" (mm)	
10399	478	4,6	779	61,0	7,8	2,19	0,05	2,39	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,56 Mpa	Energia Máxima	26,43 Mpa	Índ. Flexibilidade	6,16 Mpa	CV=6,79%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,06 Mpa	Energia Total	60,41 Mpa	CV=4,94%	13	
100	34200	0,21	0,57	2,1	0,3500	1500	19,75	152,04	CV=42,38%						

Figura 0.14 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U8-DNIT-FXC-50/70

MISTURA U8-DNIT-FXC-50/70															
Trecho	BR 290				1. Ligante										
Mun. Us	Uruguaiana				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.	
Usina	Contínua contrafluxo - 140 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)		
Agregado	Basáltico				5,00	5,12	*	50-70		57	48,2		>236		1,000
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100	100	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100	100	100,00	100,00	*									
1/2'	12,7	80	100	90,40	87,95	*									
3/8'	9,5	70	90	81,80	79,87	*									
4	4,8	44	72	55,40	54,09	*									
10	2	22	50	28,00	28,45	*									
40	0,42	8	26	13,30	11,98	*									
80	0,18	4	16	9,30	9,70	*									
200	0,075	2	10	5,70	7,69	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD					
		24	12	62			AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	40,40%				
2,6%	12,5%	61,7%	4,7%	*	*	*	0,368	0,545	0,545						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,05%	DMM	2,568	Estabilid.	1210,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,30%	DMT	*	Fluência	3,04 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	75,15%	Gmb	2,464			
9707	536	5,52	359	21,9	6,1	1,98	0,16	8,23	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,41 MPa	Energia Máxima	21,84 Mpa	Índ. Flexibilidade	10,83 Mpa	CV=17,36%
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	Energia Total	14				
60	31750	0,225	0,545	2,05	0,0800	20000	20,66	151,83	0,16 Mpa	CV=29,56%	62,47 Mpa	CV=6,64%			

Figura 0.15 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U9-DNIT-FXC-60/85

MISTURA U9-DNIT-FXC-60/85															
Trecho	BR 290			1. Ligante											
Mun. Us	Eldorado do Sul			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Gravimétrica - 100-140 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	AMP	0,05%	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado				5,24	5,87	*	60-85	Dope	56,5	72	86,5	>236			
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100	100	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100	100	100,00	100,00	*									
1/2'	12,7	80	100	83,90	91,74	*									
3/8'	9,5	70	90	75,70	86,69	*									
4	4,8	44	72	59,30	71,22	*									
10	2	22	50	40,20	44,03	*									
40	0,42	8	26	14,30	19,08	*									
80	0,18	4	16	9,00	12,31	*									
200	0,075	2	10	5,80	6,74	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
		25	15	60			AG	GAF	FAF	(*)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	*				
1,0%	19,8%	63,0%	4,8%	*	*	*	1,162	0,436	0,505						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,57%	DMM	2,374	Estabilid.	1292,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,32%	DMT	*	Fluência	2,96 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,20%	Gmb	2,289			
7406	423	5,71	647	98,3	15,2	2,2	0	0,1	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.		Energia Máxima		Índ. Flexibilidade		
									1,78 MPa	CV=3,44%	29,98 Mpa	CV=4,44%	8,68 Mpa	CV=8,88%	
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.		Energia Total		15		
55	30000	0,225	0,57	2,8	0,1300	1500	24,66	174,54	0,04 Mpa	CV=55,08%	64,67 Mpa	CV=2,64%			

Figura 0.16 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U9-DNIT-FXC-TLA FLEX

MISTURA U9-DNIT-FXC-TLA FLEX																	
Trecho	BR 290				1. Ligante												
Mun. Us	Eldorado do Sul				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Gravimétrica - 100-140 ton/h				Projeto	Rotarex	Forno	TLA	0,04%	(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregado					5,49	5,27	*	FLEX	Dope	29	70,6	80	>236		1,094		
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1/2'	12,7	80,00	100,00	83,90	92,31	*											
3/8'	9,5	70,00	90,00	75,70	85,01	*											
4	4,8	44,00	72,00	59,40	70,88	*											
10	2	22,00	50,00	40,20	39,00	*											
40	0,42	8,00	26,00	14,30	14,64	*											
80	0,18	4,00	16,00	9,00	8,83	*											
200	0,075	2,00	10,00	5,80	4,44	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm										
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD						
		25	15	60			AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,5 - 0,65)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	38,10%						
1,0%	19,8%	63,0%	4,8%	*	*	*	1,298	0,404	0,435								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,47%	DMM	2,376	Estabilid.	1542,00Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,37%	DMT	*	Fluência	2,99 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	78,85%	Gmb	2,293					
9590	387	4,04	2001	246,8	12,3	2,25	0,02	1,07	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,83 MPa	CV=5,65%	Energia Máxima	28,13 Mpa	CV=6,7%	Índ. Flexibilidade	-	CV=--%
									Índice de Tenacid.	0,07 Mpa	CV=57,35%	Energia Total	65,22 Mpa	CV=2,54%			
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	16								
55	27980	0,175	0,535	1,9	0,0800	550	24,78	180,88									

Figura 0.17 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U10-DNIT-FXC-50/70

MISTURA U10-DNIT-FXC-50/70															
Trecho	BR 392			1. Ligante											
Mun. Us	Caçapava do Sul			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Gravimétrica - 60-80 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado				4,84	5,33	*	50-70		57	48,2		>236	1,000		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100	100	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100	100	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100	100	100,00	100,00	*									
1/2'	12,7	80	100	86,40	92,87	*									
3/8'	9,5	70	90	81,00	88,37	*									
4	4,8	44	72	56,50	54,53	*									
10	2	22	50	33,00	33,55	*									
40	0,42	8	26	13,30	16,31	*									
80	0,18	4	16	9,00	10,70	*									
200	0,075	2	10	5,70	7,20	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
		21	18	60	1		AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,5 - 0,65)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	41,50%				
0,4%	14,8%	58,3%	4,3%	*	*	*	0,82	0,504	0,531						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,71%	DMM	2,590	Estabilid.	1495,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,81%	DMT	*	Fluência	3,02 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,16%	Gmb	2,491			
8297	489	5,9	485	20,5	4,2	1,78	0,01	0,68	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.		Energia Máxima		Índ. Flexibilidade		
									1,32 MPa	CV=2,45%	19,5 Mpa	CV=4,43%	18,71 Mpa	CV=17,54%	
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.		Energia Total		17		
60	31200	0,25	0,58	2,4	0,2100	20000	22,67	171,57	0,25 Mpa	CV=9,83%	65,39 Mpa	CV=8,23%			

Figura 0.18 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U11-DAER-FXA-50/70

MISTURA U11-DAER-FXA-50/70																	
Trecho	Ruas Prefeitura				1. Ligante												
Mun. Us	Sarandi				Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Contínua contrafluxo				Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregado	Basáltico				5,55	4,97	*	50/70		56	49,5		>236		1,000		
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1/2'	12,7	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/8'	9,5	80,00	100,00	98,40	94,58	*											
4	4,8	55,00	75,00	61,70	61,29	*											
8	2,38	35,00	50,00	41,10	44,14	*											
30	0,59	18,00	29,00	23,60	26,08	*											
50	0,297	13,00	23,00	17,10	20,73	*											
100	0,15	8,00	16,00	10,90	15,91	*											
200	0,075	4,00	10,00	6,30	11,46	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 9,5 mm										
1"	1 1/2"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD							
			36	64			AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,4 - 0,55)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	45,60%						
1,9%	16,9%	69,9%	1,2%	*	*	*	0,978	0,591	0,61								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,674	Estabilid.	1390,00Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	17,00%	DMT	*	Fluência	3,30 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	76,00%	Gmb	2,562					
8277	386	4,67	226	36,7	16,2	1,72	0,1	6,11	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,32 MPa	CV=7,3%	Energia Máxima	20,26 Mpa	CV=8,32%	Índ. Flexibilidade	14,36 Mpa	CV=30,13%
									Índice de Tenacid.	0,14 Mpa	CV=34,71%	Energia Total	53,71 Mpa	CV=6,57%	18		
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2									
55	27980	0,175	0,535	1,9	0,0800	700	19,05	141,51									

Figura 0.19 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U12-DAER-FXB-60/85

MISTURA U12-DAER-FXB-60/85																	
Trecho	RS-406			1. Ligante													
Mun. Us	Sarandi			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.				
Usina	Gravimétrica			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)					
Agregado				5,00	5,67	*	60/85		52	72	88,5	>240	1,01				
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	99,10	*											
1/2'	12,7	80,00	100,00	88,10	88,24	*											
3/8'	9,5	70,00	90,00	80,50	83,57	*											
4	4,8	50,00	70,00	56,00	59,68	*											
8	2,38	35,00	50,00	39,00	40,83	*											
30	0,59	18,00	29,00	22,50	21,90	*											
50	0,297	13,00	23,00	16,30	17,09	*											
100	0,15	8,00	16,00	10,40	12,13	*											
200	0,075	4,00	10,00	6,00	7,48	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm										
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD						
		20	20	60			AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	48,10%						
1,9%	16,9%	69,9%	1,2%	*	*	*	1,454	0,471	0,607								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,688	Estabilid.	1450,00Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,80%	DMT	*	Fluência	3,05 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	75,00%	Gmb	2,580					
8390	453	5,4	923	149,7	16,2	1,87	0,13	6,8	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,91 MPa	CV=17,41%	Energia Máxima	27,91 Mpa	CV=9,18%	Índ. Flexibilidade	20,1 Mpa	CV=11,55%
									Índice de Tenacid.	0,15 Mpa	CV=30,52%	Energia Total	71,71	CV=8,05%	19		
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2									
70	26800	0,195	0,54	1,85	0,0300	3500	15,7	119,61									

Figura 0.20 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U12-DAER-FXC-60/85

MISTURA U12-DAER-FXC-60/85															
Trecho	RS-406			1. Ligante											
Mun. Us	Sarandi			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Gravimétrica			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregado				5,15	5,44	*	60/85		52	72	88,5	>240	1,01		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	80,00	100,00	95,9	88,89	*									
3/8'	9,5	60,00	80,00	70,7	74,10	*									
4	4,8	48,00	65,00	54,3	52,79	*									
8	2,38	35,00	50,00	37,5	34,40	*									
30	0,59	19,00	30,00	22,0	17,93	*									
50	0,297	13,00	23,00	15,7	13,32	*									
100	0,15	7,00	15,00	9,4	8,75	*									
200	0,075	0,00	8,00	4,5	4,75	*									
						*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
10		21	10	59			AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 -1, 0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	37,40%				
1,5%	16,9%	69,9%	1,2%	*	*	*	1,252	0,442	0,57						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,00%	DMM	2,692	Estabilid.	1765,00Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	17,20%	DMT	*	Fluência	3,30 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	77,00%	Gmb	2,584			
7890	323	4,09	986	77,8	7,9	1,84	0,06	3,01	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		1,59 MPa	CV=21,62%	21,29 Mpa	CV=2,32%	15,42 Mpa	CV=11,55%	
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	Energia Máxima		Índ. Flexibilidade			
115	27750	0,245	0,575	2,475	0,0550	6000	19,47	151,71	0,19 Mpa	CV=12,89%	62,84 Mpa	CV=6,54%	20		

Figura 0.21 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U13-DNIT-FXB-50/70

MISTURA U13-DNIT-FXB-50/70														
Trecho	RS 287			1. Ligante										
Mun. Us	Santa Cruz do Sul			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.	
Usina	Contínua Contrafluxo - 80 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)		
Agregad				4,83	5,42	*	50/70		57	48,2		>236	1,005	
2. Composição Granulométrica														
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)										
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno								
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*								
1'	25,4	95,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/4'	19,1	80,00	100,00	100,00	100,00	*								
3/8'	9,5	45,00	80,00	71,50	76,32	*								
4	4,8	28,00	60,00	46,20	56,30	*								
10	2	20,00	45,00	28,30	33,66	*								
40	0,42	10,00	32,00	15,00	17,38	*								
80	0,18	8,00	20,00	10,50	12,89	*								
200	0,075	3,00	8,00	5,50	8,47	*								
3. Características dos Agregados						4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)						Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD				
		32	28	40	0		AG	GAF	FAF	(%)				
Absorção	Abrassão	Eq.Areia	Sanidade	Ind.Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	48,40%			
1,0%	13,1%	60,8%	5,8%	*	*	*	0,846	0,448	0,6					
5. Características Mecânicas da Mistura						6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,80%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,602
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	16,20%	DMT	*	Estabilid.	1132,85Kg
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	71,02%	Gmb	2,486	Fluência	2,70 1/100" (mm)
7410	364	4,91	336	40,3	12,0	1,93	0,03	1,53	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT					
Parâmetros do Modelo 2S2PID						WLF			Tenacid.	1,58 MPa	Energia Máxima	25,91 Mpa	Índ. Flexibilidade	11,61 Mpa
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,07 Mpa	Energia Total	59,38 Mpa	CV=11,8%	
80	29000	0,225	0,575	2,45	0,1300	6000	20,64	151,7	CV=32,59%		CV=6,13%		21	

Figura 0.22 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U14-DNIT-FXC-50/70

MISTURA U14-DNIT-FXC-50/70																	
Trecho	RS 287		1. Ligante														
Mun. Us	Santa Maria		Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.					
Usina	Contínua contrafluxo - 100 ton/h		Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)						
Agregado	Basáltico		5,00	5,39	*	50/70		52	48,6		>236	1,001					
2. Composição Granulométrica																	
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)													
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno											
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*											
1/2'	12,7	80,00	100,00	89,44	93,99	*											
3/8'	9,5	70,00	90,00	82,55	87,63	*											
4	4,8	44,00	72,00	54,39	71,83	*											
10	2	22,00	50,00	33,15	39,93	*											
40	0,42	8,00	26,00	15,22	20,11	*											
80	0,18	4,00	16,00	10,53	13,98	*											
200	0,075	2,00	10,00	6,82	9,49	*											
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados										
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 12,5 mm										
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey			Metodologia FAD							
		24	25	50	1		AG	GAF	FAF	(%)							
Absorção	Abrásão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,5 - 0,65)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	46,60%						
1,0%	13,7%	63,0%	16,5%	*	*	*	1,403	0,508	0,567								
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos										
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,07%	DMM	2,627	Estabilid.	1234,43Kg			
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,47%	DMT	*	Fluência	3,11 1/100" (mm)			
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	81,26%	Gmb	2,520					
8576	516	6,02	822	110,5	13,5	2,08	0,06	3,01	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT								
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF		Tenacid.	1,59 MPa	CV=6,13%	Energia Máxima	26,54 Mpa	CV=5,89%	Índ. Flexibilidade	8,88 Mpa	CV=6,01%
									Índice de Tenacid.	0,08 Mpa	CV=11,58%	Energia Total	63,58 Mpa	CV=8,18%	22		
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2									
45	28800	0,175	0,525	2,21	0,0550	3500	15,7	119,61									

Figura 0.23 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U14-DNIT-FXB-50/70

MISTURA U14-DNIT-FXB-50/70															
Trecho	RS 287			1. Ligante											
Mun. Us	Santa Maria			Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.		
Usina	Contínua Contrafluxo - 100 ton/h			Projeto	Rotarex	Forno	CAP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)			
Agregad				4,60	5,13	*	50/70		58	49,4		>236	1,001		
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	95,00	100,00	97,34	100,00	*									
3/4'	19,1	80,00	100,00	94,04	95,49	*									
3/8'	9,5	45,00	80,00	58,84	69,82	*									
4	4,8	28,00	60,00	42,96	58,73	*									
10	2	20,00	45,00	30,80	35,30	*									
40	0,42	10,00	32,00	17,84	16,34	*									
80	0,18	8,00	20,00	10,66	11,60	*									
200	0,075	3,00	8,00	5,12	7,73	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
	6	44		49	1		AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrasão	Eq.Areia	Sanidade	Ind.Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	39,80%				
1,0%	13,7%	63,0%	16,5%	*	*	*	0,367	0,434	0,549						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	4,31%	DMM proj.	*	DMM ens.	2,666	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	14,78%	DMT	*	Estabilid.	1192,82Kg	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	79,25%	Gmb	2,551	Fluência	2,73 1/100" (mm)	
10076	560	5,55	549	50,1	9,1	2,29	0,01	0,31	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF			Tenacid.	1,66 MPa	Energia Máxima	22,13 Mpa	Índ. Flexibilidade	-
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	CV=6,97%	CV=9,06%					
45	30800	0,2	0,55	2,21	0,1500	4500	18,31	134,37	Índice de Tenacid.	0,15 Mpa	Energia Total	63,00 Mpa	CV=9,12%	23	
									CV=21,18%						

Figura 0.24 - Informações, composição, e características físicas e mecânicas da mistura U14-DNIT-FXC-60/85

MISTURA U14-DNIT-FXC-60/85															
Trecho	RS 287		1. Ligante												
Mun. Us	Santa Maria		Teor de Ligante (%)			Tipo	Obs.	Penetraç.	P. Amol.	Rec. Elás.	P. Fulgor	Densid.			
Usina	Contínua contrafluxo - 100 ton/h		Projeto	Rotarex	Forno	AMP		(0,1 mm)	(°C)	(%)	(°C)				
Agregado	Basáltico		5,00	4,81	*	60/85		56	73	86,5	>236	1,003			
2. Composição Granulométrica															
Peneiras		Limites da Faixa		Granulometria Passante (%)											
#	mm	min	max	Projeto	Rotarex	Forno									
1 1/2'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
3/4'	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	*									
1/2'	12,7	80,00	100,00	89,44	81,21	*									
3/8'	9,5	70,00	90,00	82,55	72,39	*									
4	4,8	44,00	72,00	54,39	47,22	*									
10	2	22,00	50,00	33,15	28,95	*									
40	0,42	8,00	26,00	15,22	15,13	*									
80	0,18	4,00	16,00	10,53	10,95	*									
200	0,075	2,00	10,00	6,82	5,77	*									
3. Características dos Agregados							4. Critérios de Seleção dos Agregados								
Porcentagem por fração (%)							Mistura TMN 19 mm								
1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	Pó	Cal	Areia	Método Bailey				Metodologia FAD				
		24	25	50	1		AG	GAF	FAF	(%)					
Absorção	Abrassão	Eq. Areia	Sanidade	Ind. Forma	Lamelar.	AIMS	Limites	(0,6 - 1,0)	(0,35-0,55)	(0,35-0,55)	44,90%				
1,0%	13,7%	63,0%	16,5%	*	*	*	0,912	0,461	0,599						
5. Características Mecânicas da Mistura							6. Parâmetros Volumétricos								
Módulo de Resiliência			Flow Number			Ensaio RT			VV	3,93%	DMM	2,640	Estabilid.	1244,30Kg	
MR 25°	SD	CV	FN@60°	SD	CV	RT@25°	SD	CV	VAM	15,47%	DMT	*	Fluência	3,20 1/100" (mm)	
(MPa)	(MPa)	(%)	(Ciclos)	(Ciclos)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	RBV	82,22%	Gmb	2,552			
11520	633	5,49	10000 ¹	-	-	2,29	0,01	0,31	7. Índices Obtidos do Ensaio de RT						
Parâmetros do Modelo 2S2PID							WLF			Tenacid.	1,65	Energia Máxima	22,13	Índ. Flexibilidade	-
E00 (Mpa)	E0 (Mpa)	k	h	δ	τE (s)	β	C1	C2	Índice de Tenacid.	0,15	Energia Total	63	24		
89	30200	0,177	0,524	1,95	0,1000	750	16,91	116,01	CV=21,18	CV=9,12	CV=9,12				

Apêndice II. Módulo dinâmico e ângulo de fase a 21°C e 10Hz

Tabela AII - Módulo dinâmico e ângulo de fase a 21°C e 10Hz

Mistura	 E* @21°C 10Hz	ϕ° @21°C 10 Hz
U1-DAER-FXA-50/70	11971,50	16,00
U2-DAER-FXB-50/70	12957,50	15,68
U2-DNIT-FXC-60/85	12369,50	15,41
U2-DNIT-FXC-65/90	11353,00	17,92
U3-DAER-FXB-ECO	6019,00	24,07
U4-DNIT-FXC-50/70	11480,00	17,67
U4-DNIT-FXB-50/70	11834,50	17,84
U5-DNIT-FXB-60/85	10994,50	17,08
U5-DNIT-FXB-ECO	7657,50	19,81
U5-DAER-FXB-ECO	6951,00	21,14
U6-DNIT-FXC-60/85	10869,00	13,57
U7-DNIT-FXC-60/85	9595,00	12,25
U8-DNIT-FXB-50/70	15838,00	13,34
U8-DNIT-FXC-50/70	12044,50	17,29
U9-DNIT-FXC-60/85	10208,00	16,71
U9-DNIT-FXC-TLAF	12123,00	12,64
U10-DNIT-FXC-50/70	13240,00	15,88
U11-DAER-FXA-50/70	10423,50	14,51
U12-DAER-FXB-60/85	8226,00	20,15
U12-DAER-FXC-60/85	8851,50	20,54
U13-DNIT-FXB-50/70	10510,00	16,97
U14-DNIT-FXC-50/70	9156,50	15,50
U14-DNIT-FXB-50/70	11641,00	16,45
U14-DNIT-FXC-60/85	10633,50	15,42

Apêndice III. Curvas de Wöhler

Tabela AIII.a - Dados de deformação e ciclo de ruptura pelo critério do pico de ângulo de fase para as amostras ensaiadas

MISTURA	Def (μs)	Nf	MISTURA	Def (μs)	Nf
U1-DAER-FXA-50/70	150	25438	U8-DNIT-FXB-50/70	150	13056
	200	13012		200	10884
	250	6623		250	2491
U2-DAER-FXB-50/70	175	44974	U8-DNIT-FXC-50/70	150	58415
	200	18273		200	16649
	250	10692		250	6381
U2-DNIT-FXC-60/85	150	64489	U9-DNIT-FXC-60/85	200	25532
	200	12264		250	13430
	250	5612		300	6715
U2-DNIT-FXC-65/90	200	21192	U9-DNIT-FXC-TLAF	175	11981
	250	8360		200	9265
	300	3449		250	3678
U3-DAER-FXB-ECO	150	100040	U10-DNIT-FXC-50/70	150	39260
	200	21345		200	13692
	250	7683		250	17334
	300	2276			
U4-DNIT-FXB-50/70	150	25148	U11-DAER-FXA-50/70	150	39152
	200	6949		175	22654
	250	4477		200	12095
U4-DNIT-FXC-50/70	150	30680	U12-DAER-FXB-60/85	150	30034
	200	13075		200	8684
	250	7300		250	5284
U5-DNIT-FXB-60/85	150	9901	U12-DAER-FXC-60/85	175	32266
	200	4135		200	28679
	250	2677		250	7506
U5-DNIT-FXB-ECO	200	11550	U13-DNIT-FXB-50/70	150	26424
	250	5418		200	8188
	300	3712		250	3533
U5-DAER-FXB-ECO	200	30528	U14-DNIT-FXC-50/70	150	10035
	250	7695		200	6600
	300	4390		250	1702
U6-DNIT-FXC-60/85	150	61038	U14-DNIT-FXB-50/70	125	31726
	175	22485		150	21482
	250	10422		175	13579
	300	5935		200	12009
	350	5935			
U7-DNIT-FXC-60/85	150	10981	U14-DNIT-FXC-60/85	150	13468
	200	2411		200	9323
	250	1525		225	4243
			250	3403	

Tabela AIII.b - Curvas de Wöhler - Coeficientes do modelo de potência a R^2 das curvas

Mistura	Modelo de Potência		
	A	B	R^2
U1-DAER-FXA-50/70	7128,0	-0,380	0,99
U2-DAER-FXB-50/70	2189,8	-0,238	0,91
U2-DNIT-FXC-60/85	1412,7	-0,204	0,98
U2-DNIT-FXC-65/90	1862,0	-0,223	0,99
U3-DAER-FXB-ECO	1258,3	-0,186	0,99
U4-DNIT-FXC-50/70	2514,5	-0,280	0,95
U4-DNIT-FXB-50/70	5814,9	-0,354	0,99
U5-DNIT-FXB-60/85	4972,7	-0,382	0,98
U5-DNIT-FXB-ECO	5146,7	-0,348	0,96
U5-DAER-FXB-ECO	1562,1	-0,200	0,93
U6-DNIT-FXC-60/85	6368,4	-0,347	0,94
U7-DNIT-FXC-60/85	1397,6	-0,241	0,77
U8-DNIT-FXB-50/70	1762,2	-0,248	1,00
U8-DNIT-FXC-50/70	1884,2	-0,231	0,99
U9-DNIT-FXC-60/85	4364,7	-0,303	0,97
U9-DNIT-FXC-TLAF	2633,9	-0,286	0,91
U10-DNIT-FXC-50/70	7356,0	-0,364	0,61
U11-DAER-FXA-50/70	1997,1	-0,244	0,99
U12-DAER-FXB-60/85	2709,8	-0,282	0,97
U12-DAER-FXC-60/85	1668,7	-0,212	0,95
U13-DNIT-FXB-50/70	1973,4	-0,253	0,99
U14-DNIT-FXC-50/70	1740,5	-0,258	0,87
U14-DNIT-FXB-50/70	6497,6	-0,378	0,97
U14-DNIT-FXC-60/85	3343,3	-0,319	0,81

Apêndice IV - Curvas características de dano (C vs S)

Figura 0.25 - Curvas C vs S mistura U1-DAER-FXA-50/70

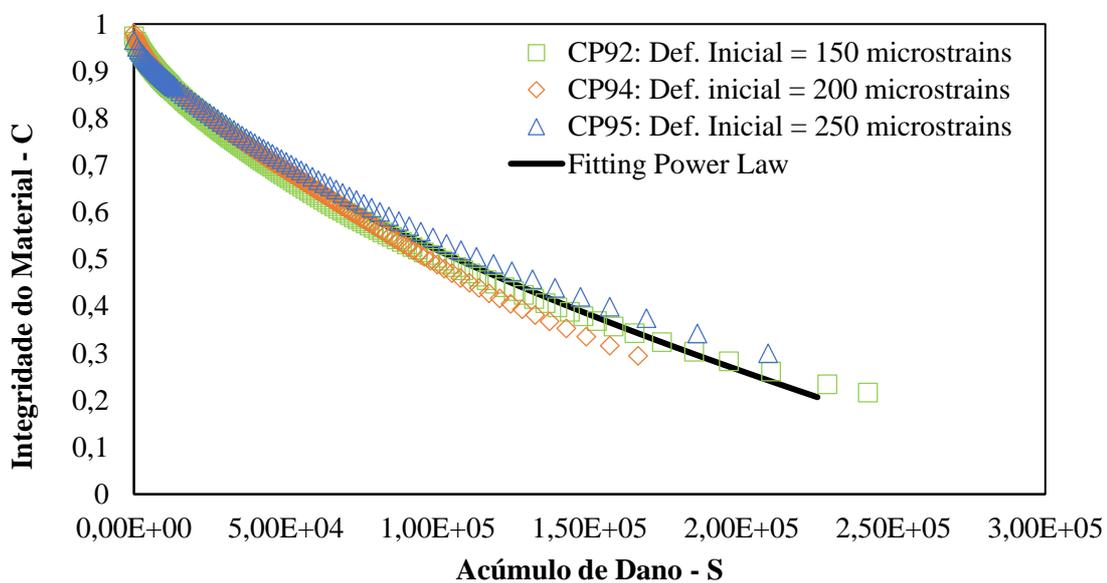


Figura 0.26 - Curvas C vs S mistura U2-DAER-FXB-50/70

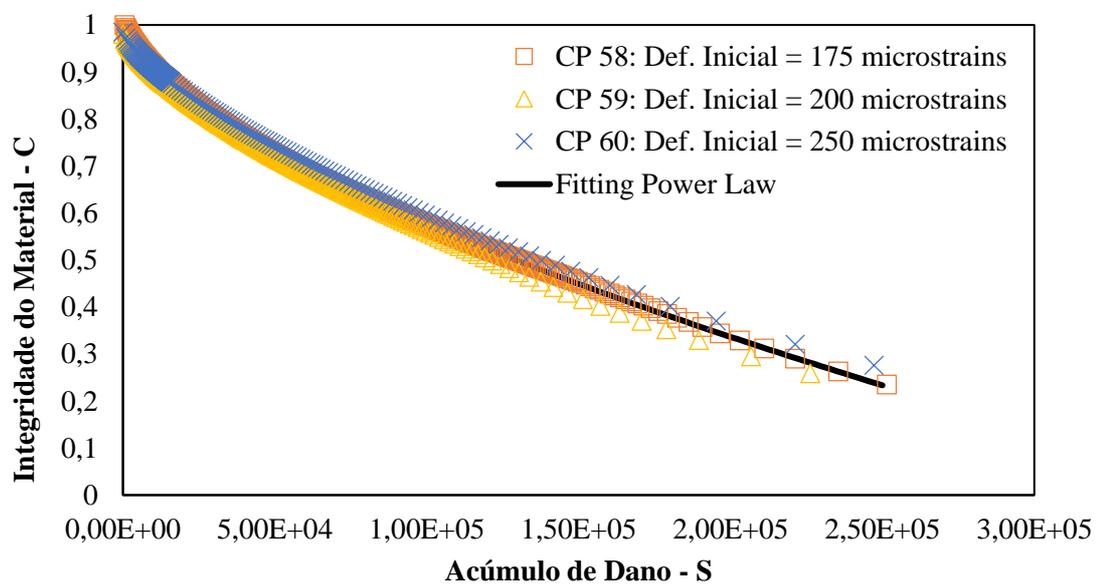


Figura 0.27 - Curvas C vs S mistura U2-DNIT-FXC-60/85

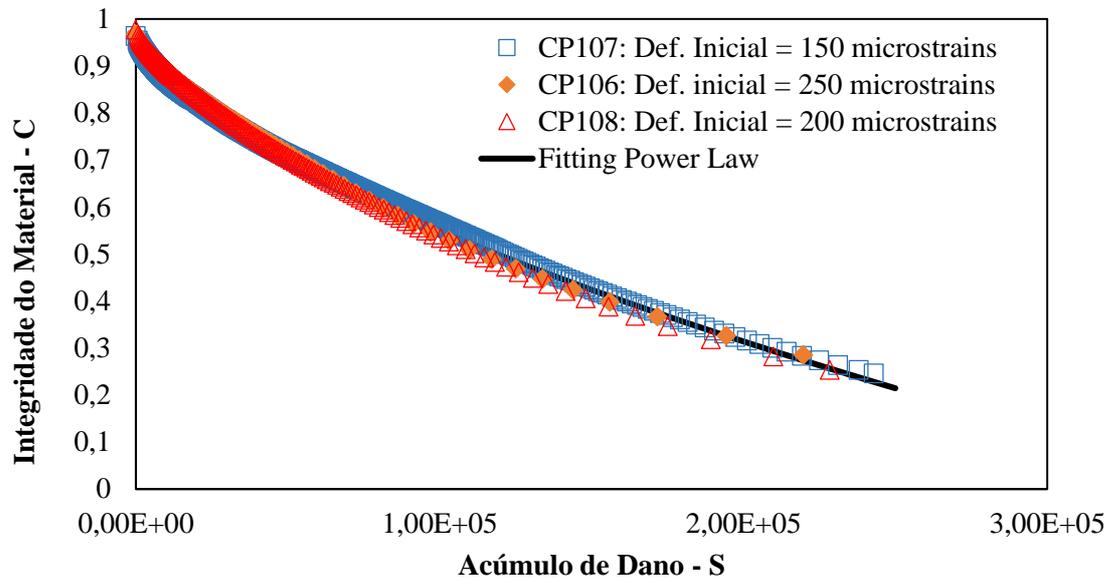


Figura 0.28 - Curvas C vs S mistura U2-DNIT-FXC-65/90

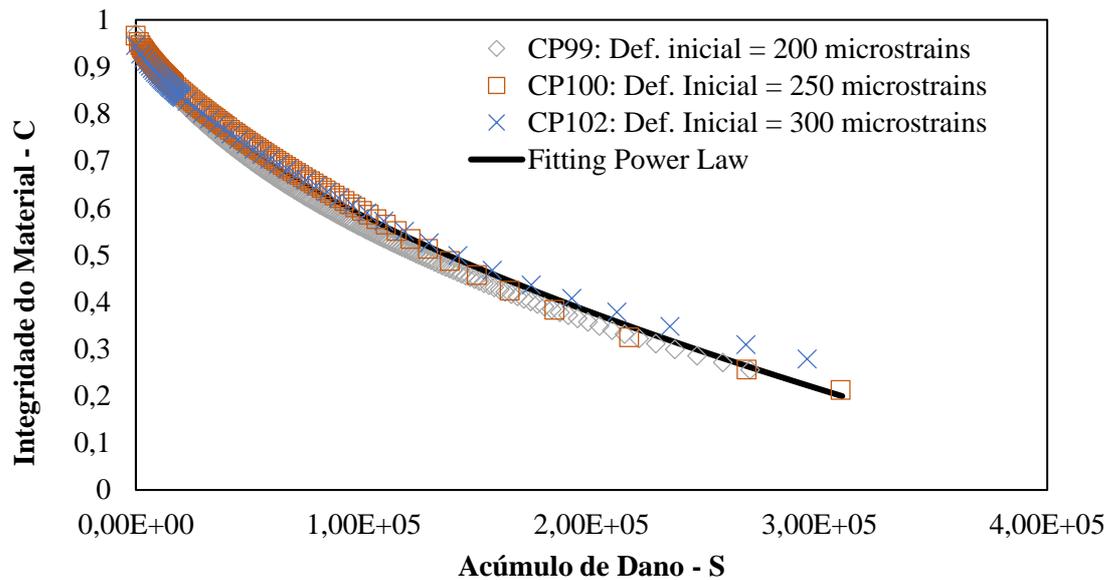


Figura 0.29 - Curvas C vs S mistura U3-DAER-FXB-ECO

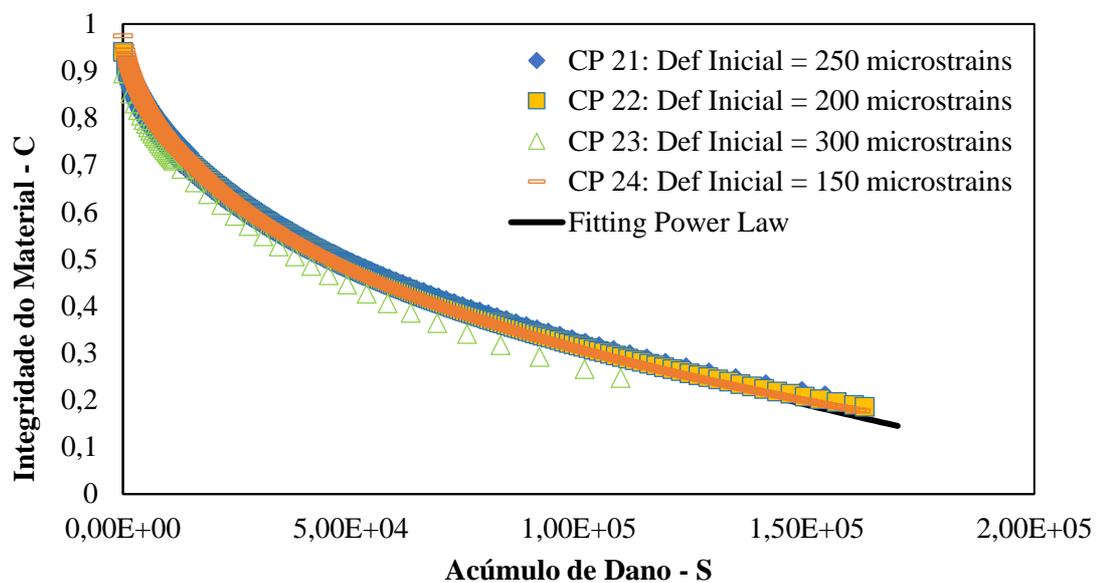


Figura 0.30 - Curvas C vs S mistura U4-DNIT-FXB-50/70

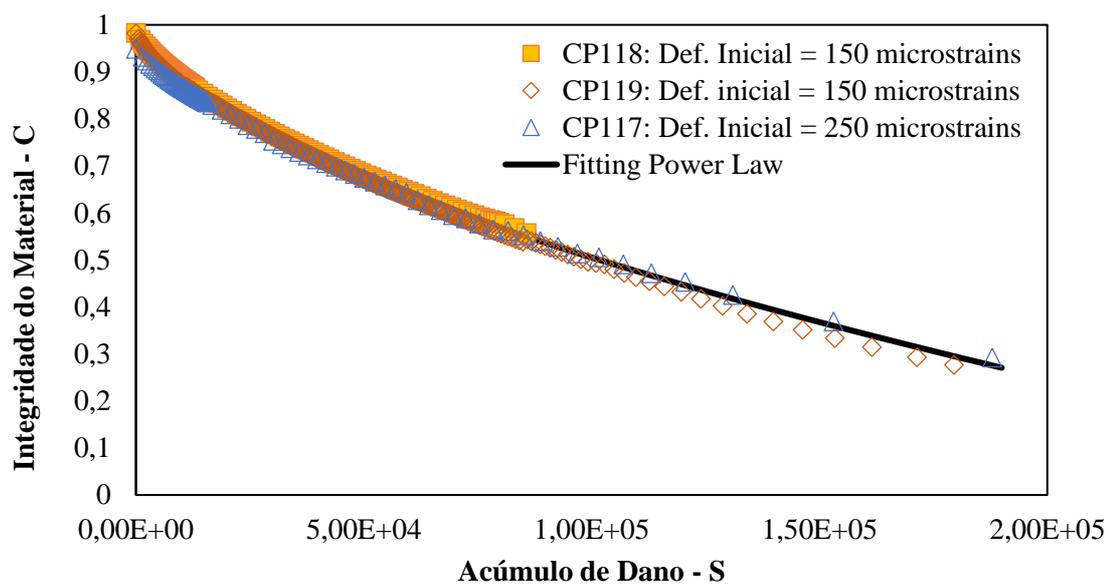


Figura 0.31 - Curvas C vs S mistura U4-DNIT-FXC-50/70

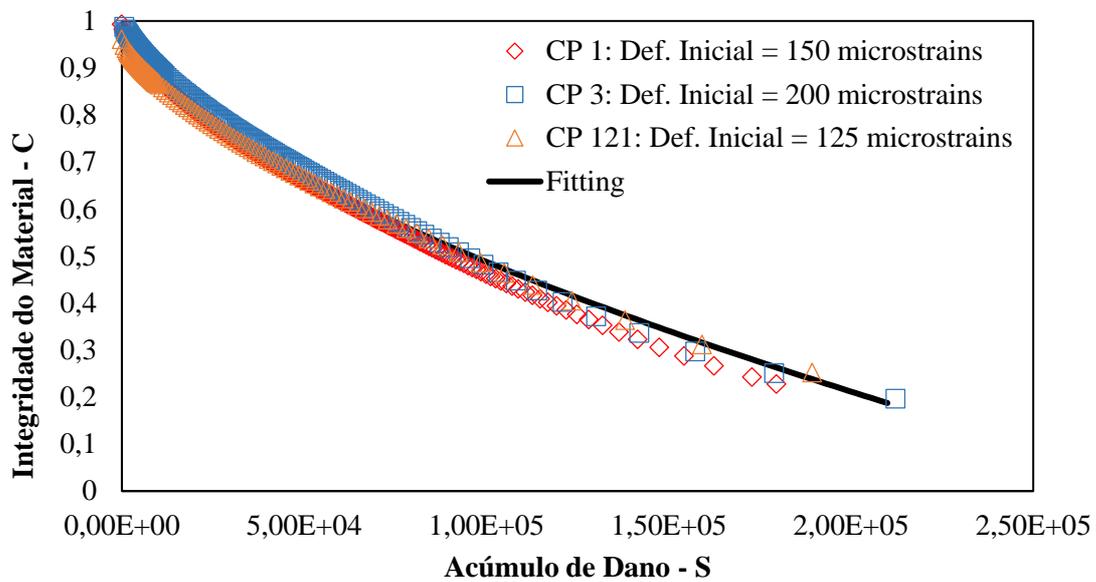


Figura 0.32 - Curvas C vs S mistura U5-DNIT-FXB-ECO

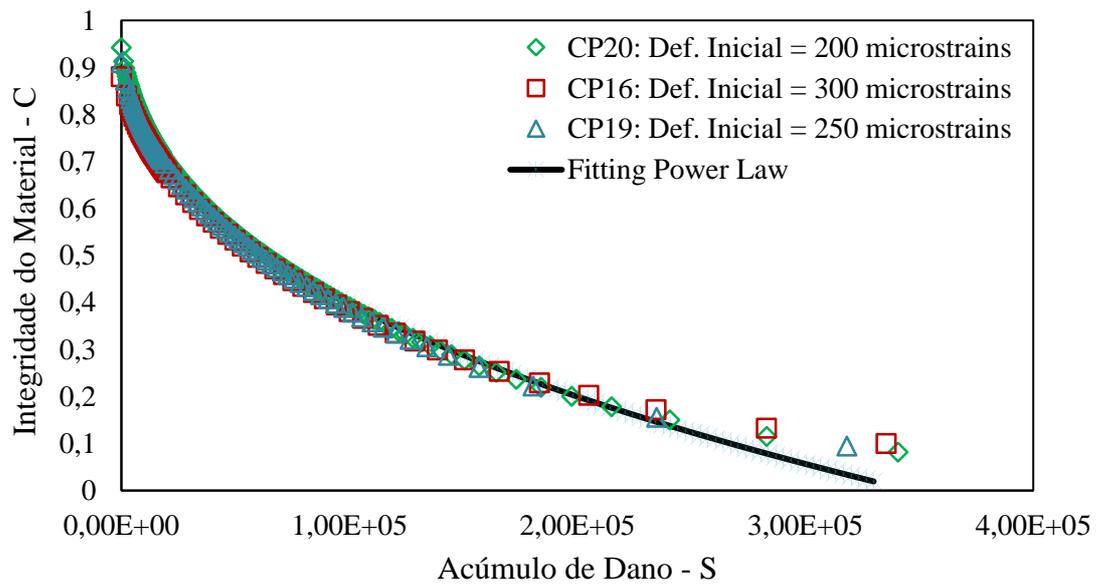


Figura 0.33 - Curvas C vs S mistura U6-DNIT-FXC-60/85

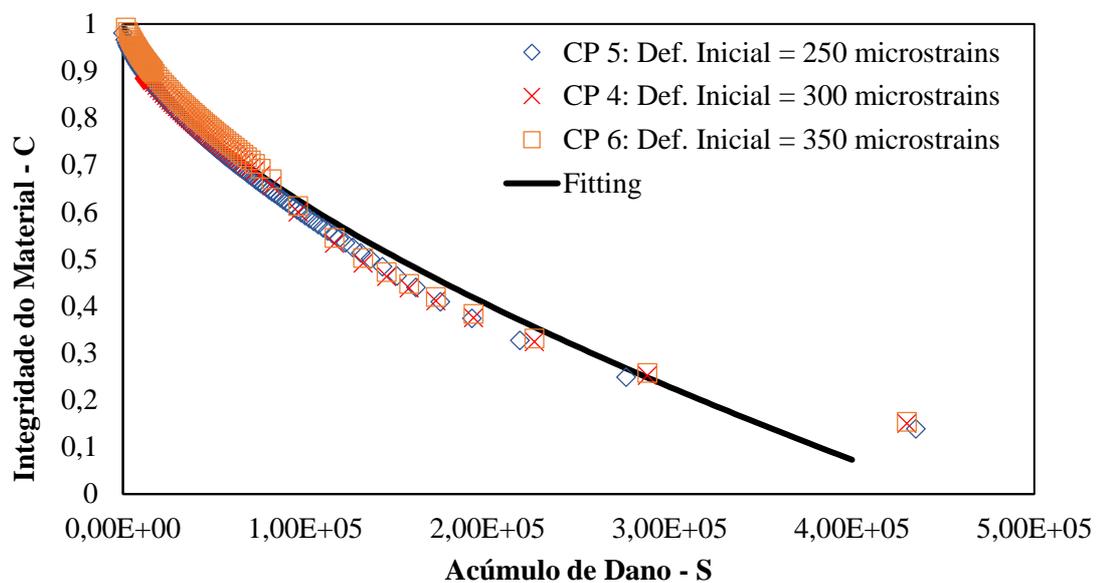


Figura 0.34 - Curvas C vs S mistura U7-DNIT-FXC-60/85

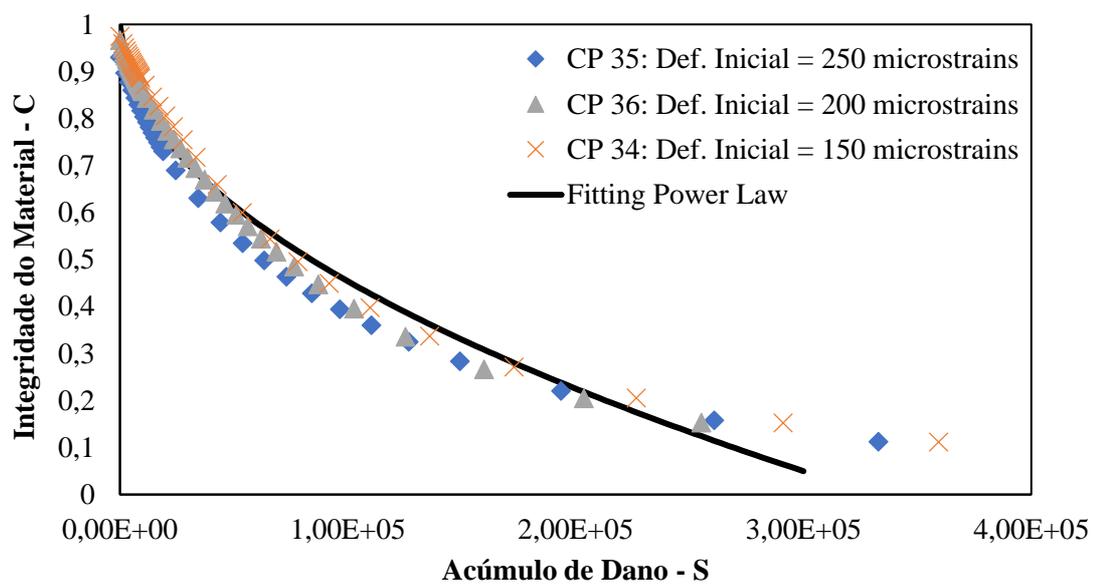


Figura 0.35 - Curvas C vs S mistura U8-DNIT-FXB-50/70

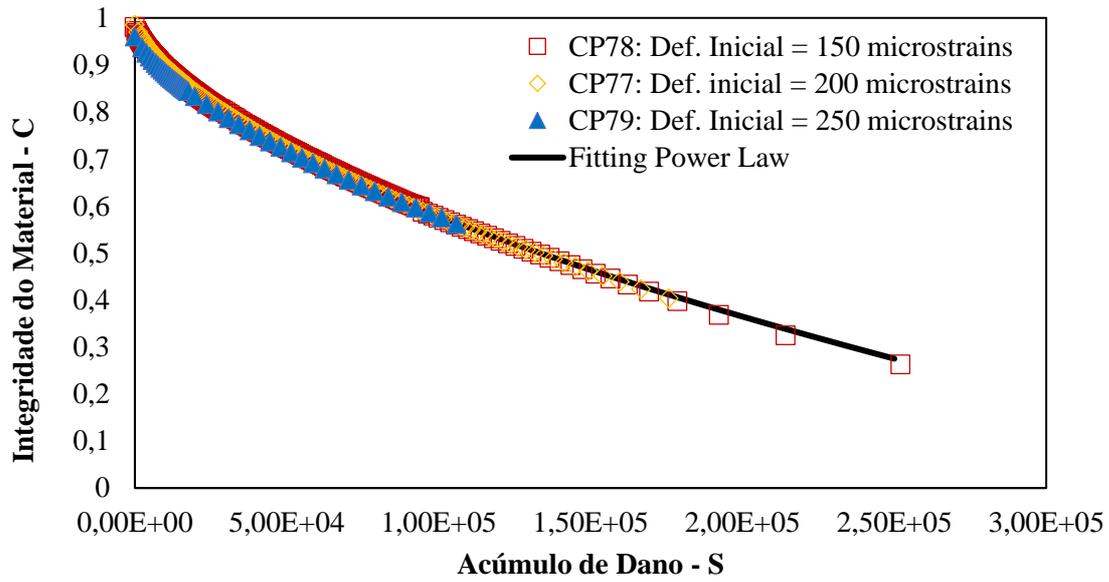


Figura 0.36 - Curvas C vs S mistura U8-DNIT-FXC-50/70

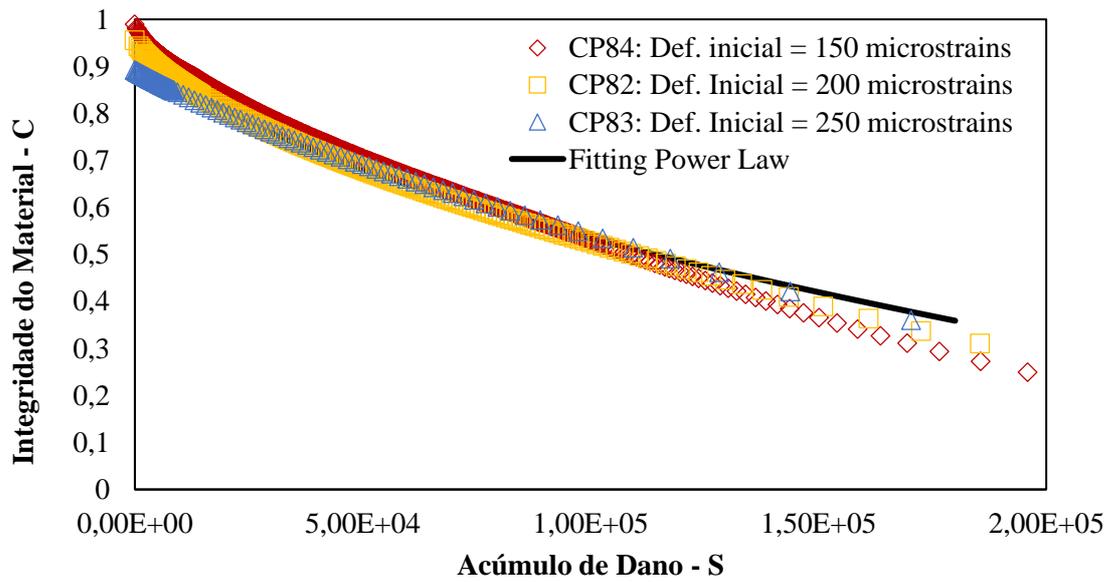


Figura 0.37 - Curvas C vs S mistura U9-DNIT-FXC-60/85

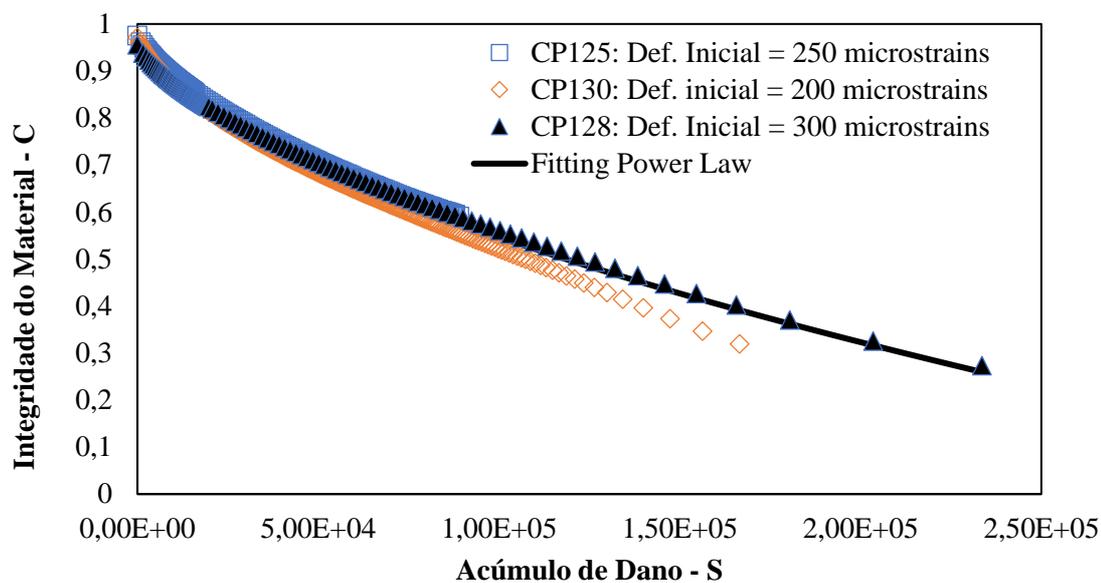


Figura 0.38 - Curvas C vs S mistura U9-DNIT-FXC-TLAF

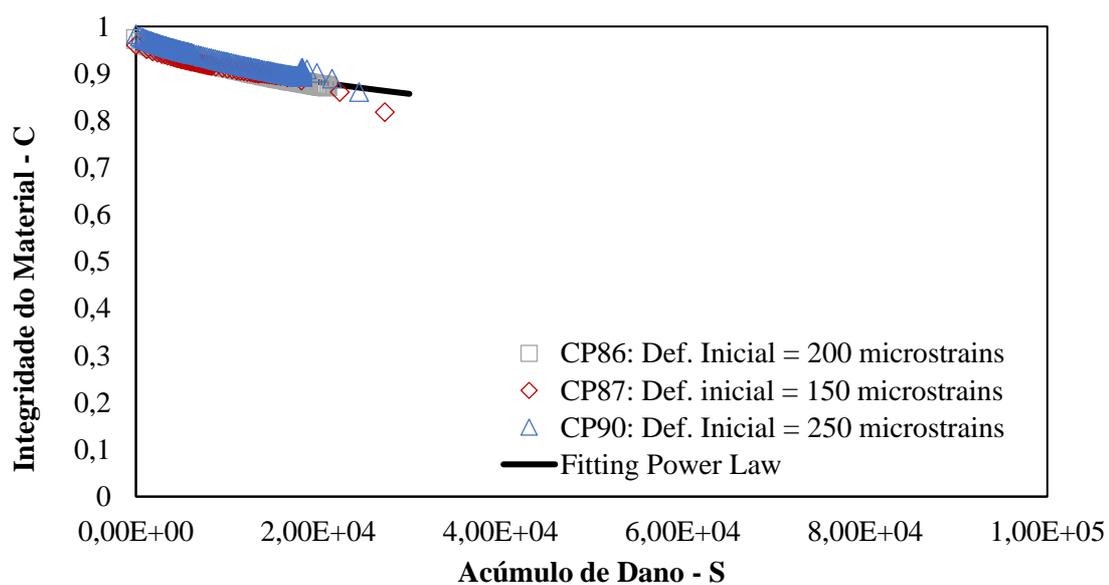


Figura 0.39 - Curvas C vs S mistura U10-DNIT-FXC-50/70

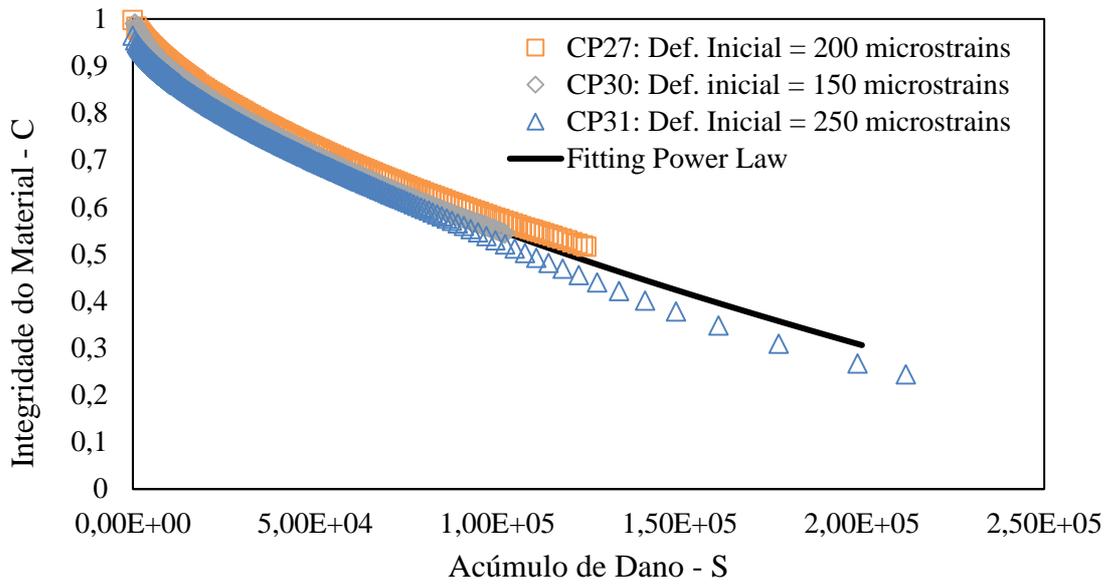


Figura 0.40 - Curvas C vs S mistura U11-DAER-FXA-50/70

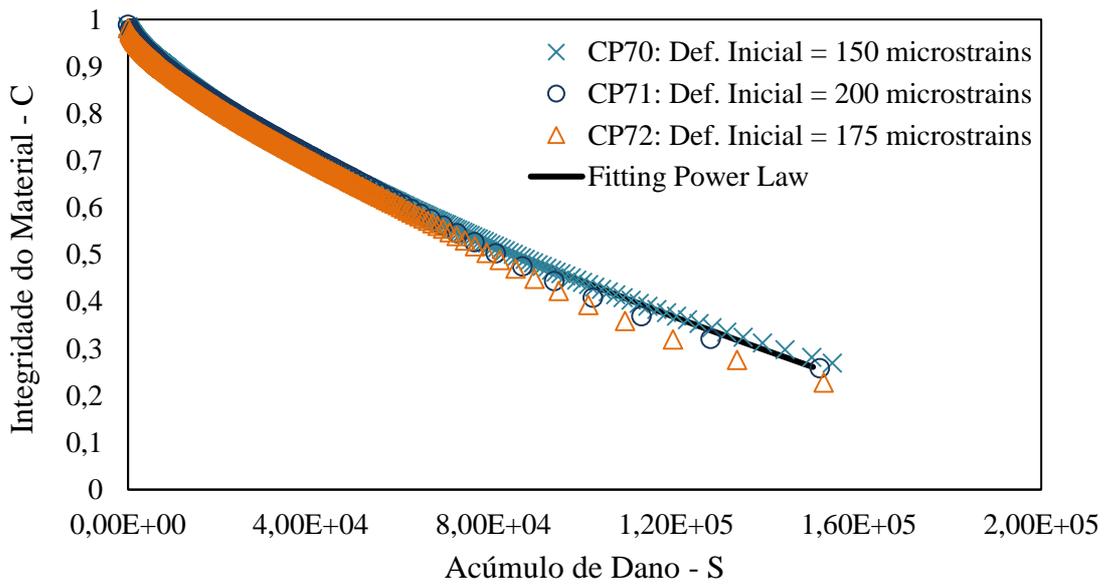


Figura 0.41 - Curvas C vs S mistura U12-DAER-FXB-60/85

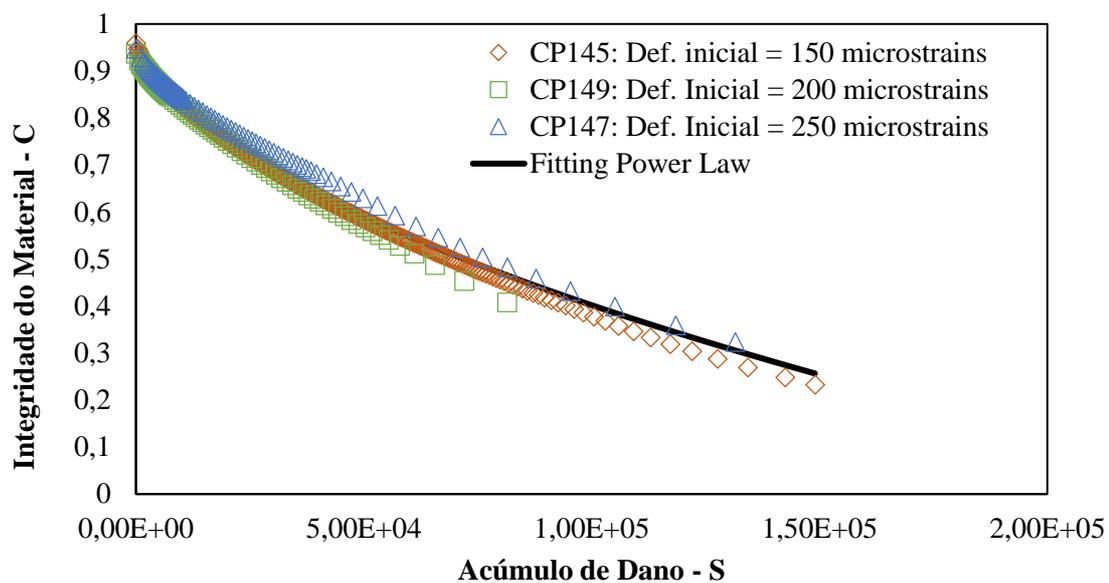


Figura 0.42 - Curvas C vs S mistura U12-DAER-FXC-60/85

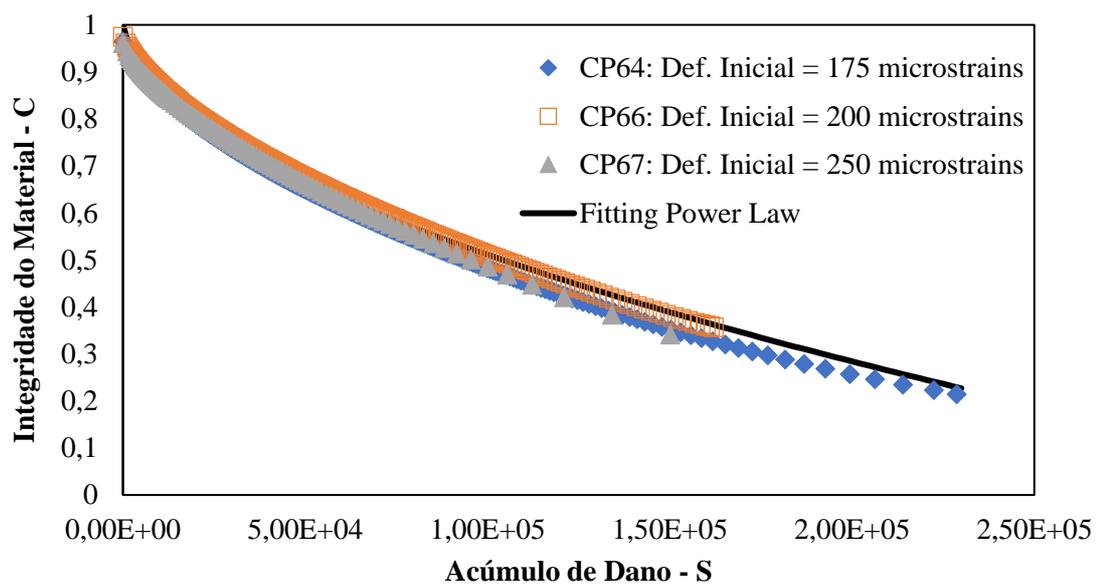


Figura 0.43 - Curvas C vs S mistura U13-DNIT-FXB-50/70

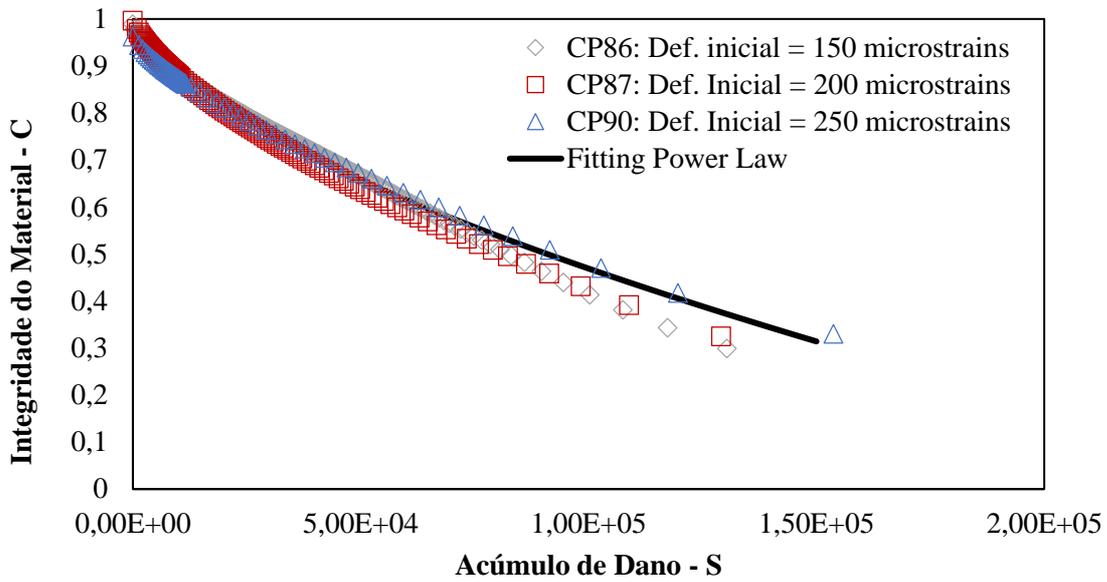


Figura 0.44- Curvas C vs S mistura U14-DNIT-FXB-50/70

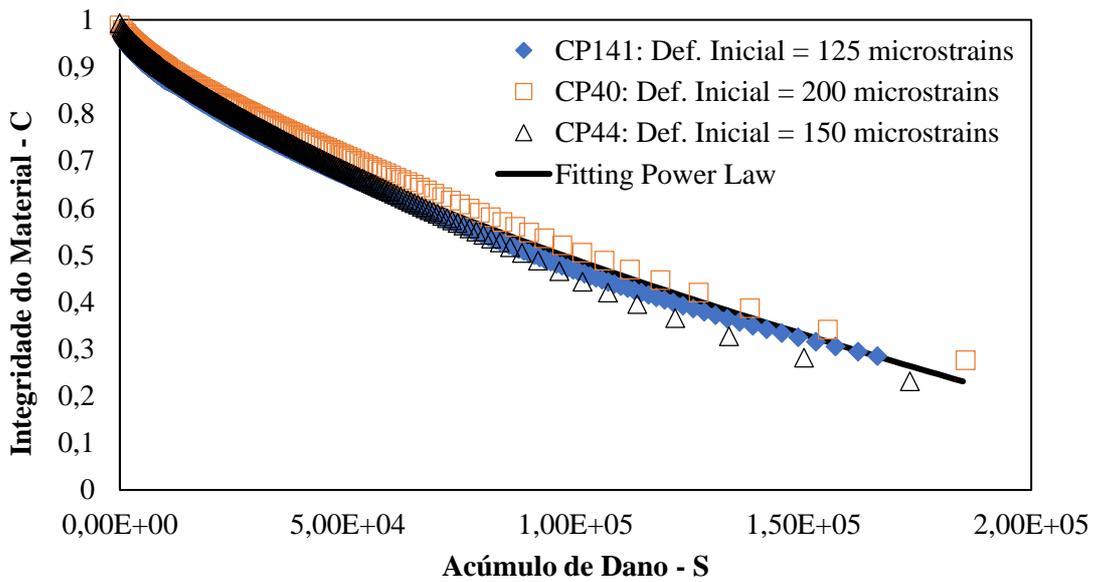


Figura 0.45 - Curvas C vs S mistura U14-DNIT-FXC-50/70

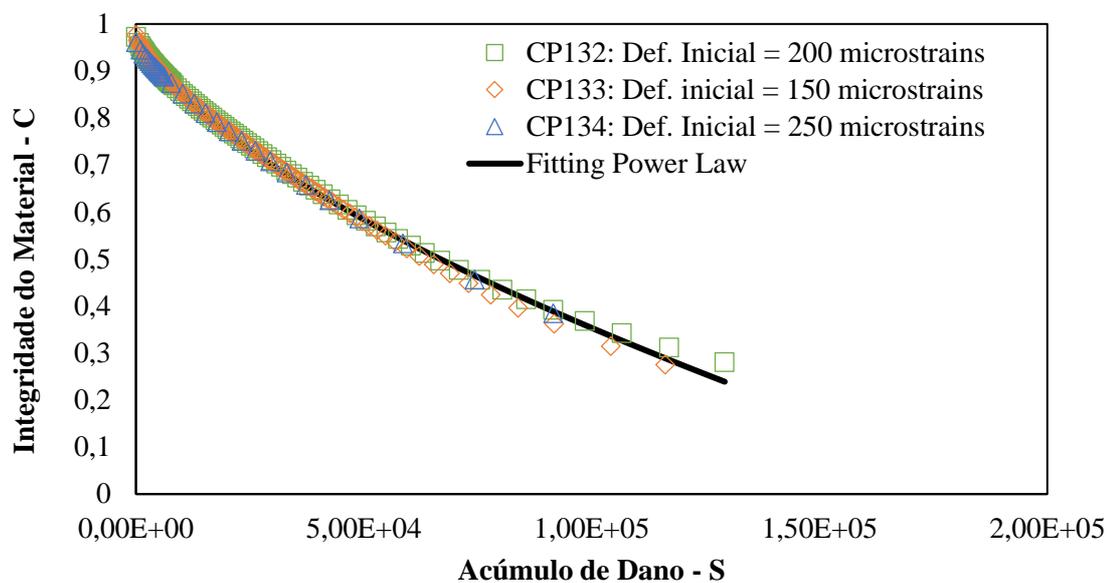
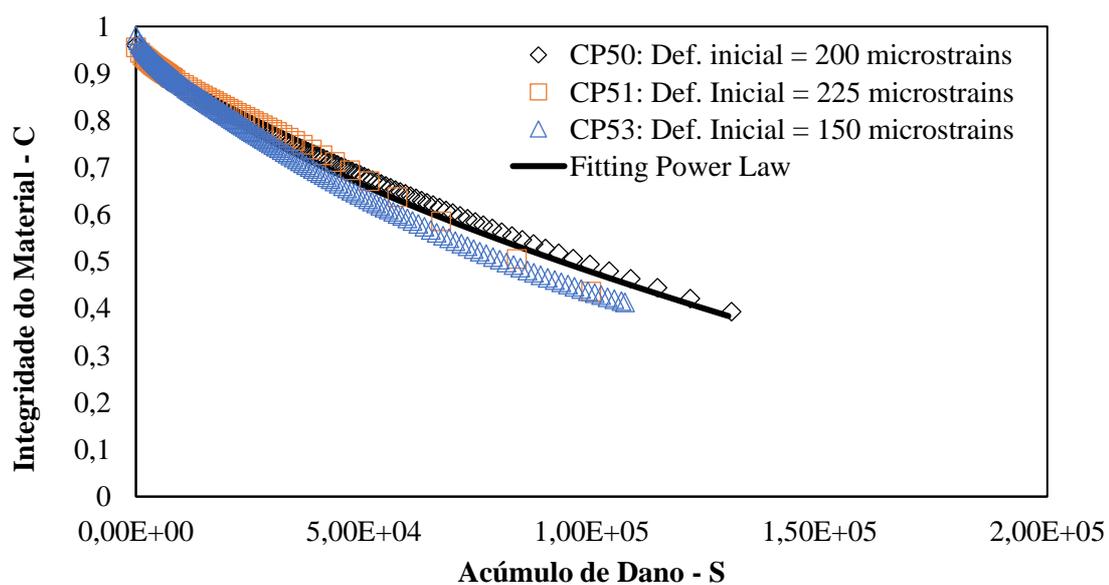


Figura 0.46 - Curvas C vs S mistura U14-DNIT-FXC-60/85



Apêndice V - Curvas G^R vs N_f

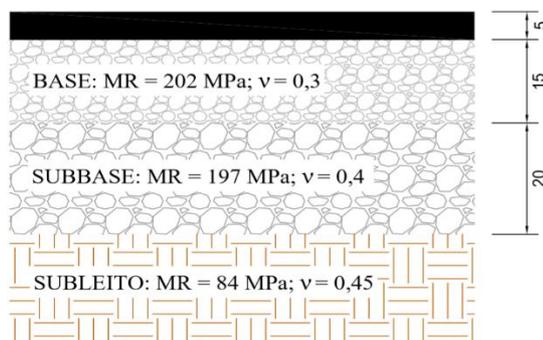
Mistura	Modelo de Potência		
	Y	Δ	R2
U1-DAER-FXA-50/70	367490145,0	-1,640	0,96
U2-DAER-FXB-50/70	8216632,0	-1,210	0,98
U2-DNIT-FXC-60/85	11537547,0	-1,290	1,00
U2-DNIT-FXC-65/90	31453554,0	-1,350	0,96
U3-DAER-FXB-ECO	8671099,0	-1,230	1,00
U4-DNIT-FXC-50/70	61637215,0	-1,450	0,93
U4-DNIT-FXB-50/70	18965136,0	-1,370	0,95
U5-DNIT-FXB-60/85	10761297,0	-1,240	0,94
U5-DNIT-FXB-ECO	1602010083,0	-1,728	0,96
U5-DAER-FXB-ECO	1280242,0	-1,050	0,99
U6-DNIT-FXC-60/85	22477043,0	-1,340	1,00
U7-DNIT-FXC-60/85	1144173908147,0	-2,720	1,00
U8-DNIT-FXB-50/70	7258828,0	-1,230	0,85
U8-DNIT-FXC-50/70	45068115,0	-1,450	0,99
U9-DNIT-FXC-60/85	6270982,0	-1,230	1,00
U9-DNIT-FXC-TLAF	2691812,0	-1,390	0,96
U10-DNIT-FXC-50/70	336507266,0	-1,649	1,00
U11-DAER-FXA-50/70	802919,0	-1,093	0,97
U12-DAER-FXB-60/85	847158,0	-1,101	0,99
U12-DAER-FXC-60/85	519809,0	-0,983	1,00
U13-DNIT-FXB-50/70	1718654926,0	-1,870	1,00
U14-DNIT-FXC-50/70	1191290,0	-1,130	0,95
U14-DNIT-FXB-50/70	1426851634,0	-1,835	1,00
U14-DNIT-FXC-60/85	2621604,0	-1,210	0,99

Apêndice VI - Curvas obtidas pela simulação por meio do critério de ruptura G^R e dos dados do modelo S-VECD

Mistura	Modelo de Potência		Deformações e Nf			
	A	B	100	125	150	200
U1-DAER-FXA-50/70	2003,6	-0,243	232159	92543	43649	13335
U2-DAER-FXB-50/70	759,3	-0,132	4488052	831456	209688	23855
U2-DNIT-FXC-60/85	841,8	-0,150	1402428	322963	95667	14029
U2-DNIT-FXC-65/90	962,2	-0,160	1363367	338844	108642	18052
U3-DAER-FXB-ECO	1176,1	-0,133	114109389	21274617	5393241	618604
U4-DNIT-FXC-50/70	446,7	-0,107	1181192	146897	26750	1820
U4-DNIT-FXB-50/70	883,1	-0,171	351776	95082	32649	6045
U5-DNIT-FXB-60/85	839,2	-0,133	8449329	1585662	404135	46748
U5-DNIT-FXB-ECO	4749,6	-0,298	428415	202463	109743	41755
U5-DAER-FXB-ECO	491,2	-0,068	14474273652	544636707	37343407	544161
U6-DNIT-FXC-60/85	1079,3	-0,154	4886286	1152243	353910	54953
U7-DNIT-FXC-60/85	22664,0	-0,565	14871	10016	7251	4356
U8-DNIT-FXB-50/70	573,6	-0,133	496912	93023	23660	2728
U8-DNIT-FXC-50/70	1234,1	-0,196	362064	116192	45906	10605
U9-DNIT-FXC-60/85	791,4	-0,134	4825384	917417	236317	27798
U9-DNIT-FXC-TLAF	553,3	-0,173	19168	5297	1852	353
U10-DNIT-FXC-50/70	1884,5	-0,245	163234	65562	31115	9599
U11-DAER-FXA-50/70	550,7	-0,107	8401421	1043862	189944	12911
U12-DAER-FXB-60/85	427,4	-0,093	5651219	518667	73687	3390
U12-DAER-FXC-60/85	403,0	-0,060	10814104110	267635447	13031096	110640
U13-DNIT-FXB-50/70	3136,8	-0,300	97559	46363	25245	9675
U14-DNIT-FXC-50/70	542,8	-0,108	6314811	800298	147999	10320
U14-DNIT-FXB-50/70	2792,0	-0,285	120611	55057	29010	10555
U14-DNIT-FXC-60/85	570,8	-0,127	899164	155272	36973	3842

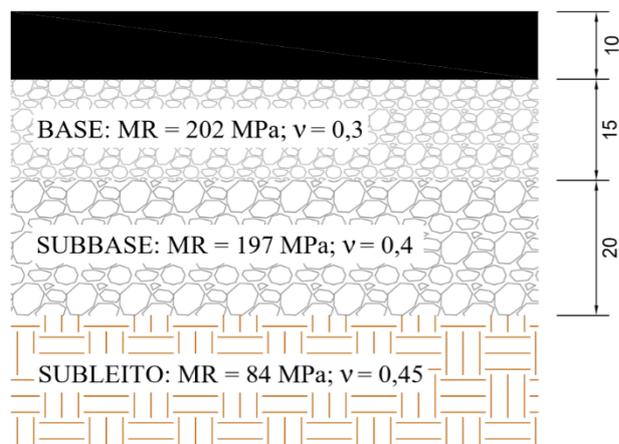
Apêndice VII - Resultados de dano médio acumulado ao longo do tempo por meio do software FlexPAVE 1.0 para as estruturas analisadas

A) Estrutura E1



Dano médio acumulado ao longo dos meses						
Mistura	1	6	12	24	60	120
U1-DAER-FXA-50/70	0,283	0,381	0,453	0,532	0,635	0,704
U2-DAER-FXB-50/70	0,151	0,182	0,192	0,214	0,250	0,297
U2-DNIT-FXC-60/85	0,241	0,256	0,271	0,304	0,366	0,423
U2-DNIT-FXC-65/90	0,186	0,214	0,229	0,257	0,317	0,372
U3-DAER-FXB-ECO	0,157	0,163	0,168	0,177	0,199	0,232
U4-DNIT-FXC-50/70	0,208	0,274	0,327	0,393	0,486	0,558
U4-DNIT-FXB-50/70	0,240	0,284	0,322	0,376	0,459	0,516
U5-DNIT-FXB-60/85	0,196	0,220	0,234	0,264	0,327	0,352
U5-DNIT-FXB-ECO	0,286	0,367	0,426	0,512	0,625	0,707
U5-DAER-FXB-ECO	0,162	0,162	0,163	0,164	0,169	0,176
U6-DNIT-FXC-60/85	0,187	0,205	0,218	0,242	0,297	0,356
U7-DNIT-FXC-60/85	0,720	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
U8-DNIT-FXB-50/70	0,267	0,280	0,294	0,325	0,385	0,435
U8-DNIT-FXC-50/70	0,255	0,315	0,366	0,432	0,517	0,596
U9-DNIT-FXC-60/85	0,181	0,196	0,207	0,228	0,273	0,325
U9-DNIT-FXC-TLAF	0,673	0,695	0,709	0,737	0,774	0,806
U10-DNIT-FXC-50/70	0,345	0,473	0,545	0,622	0,709	0,770
U11-DAER-FXA-50/70	0,182	0,202	0,215	0,236	0,287	0,326
U12-DAER-FXB-60/85	0,173	0,181	0,187	0,199	0,225	0,258
U12-DAER-FXC-60/85	0,133	0,138	0,149	0,153	0,161	0,170
U13-DNIT-FXB-50/70	0,383	0,581	0,658	0,737	0,845	0,898
U14-DNIT-FXC-50/70	0,210	0,225	0,238	0,268	0,312	0,349
U14-DNIT-FXB-50/70	0,367	0,509	0,624	0,706	0,796	0,847
U14-DNIT-FXC-60/85	0,239	0,261	0,281	0,321	0,376	0,433

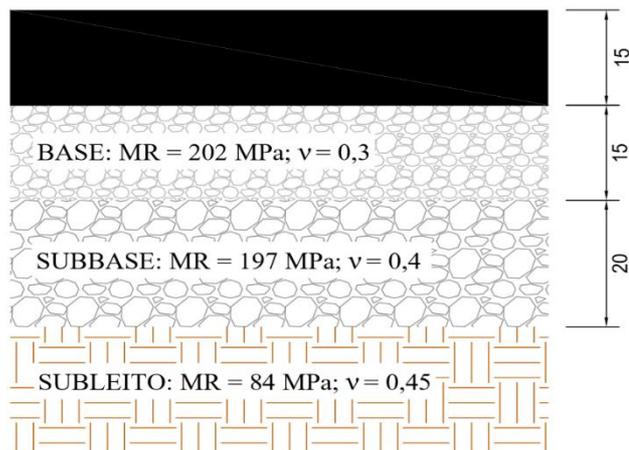
B) Estrutura E2



Dano médio acumulado ao longo dos meses

Mistura	1	6	12	24	60	120
U1-DAER-FXA-50/70	0,140	0,228	0,264	0,305	0,393	0,484
U2-DAER-FXB-50/70	0,021	0,062	0,083	0,107	0,141	0,166
U2-DNIT-FXC-60/85	0,075	0,116	0,139	0,169	0,211	0,257
U2-DNIT-FXC-65/90	0,053	0,102	0,125	0,153	0,189	0,232
U3-DAER-FXB-ECO	0,049	0,066	0,074	0,089	0,114	0,136
U4-DNIT-FXC-50/70	0,082	0,157	0,182	0,222	0,269	0,310
U4-DNIT-FXB-50/70	0,109	0,164	0,182	0,218	0,259	0,291
U5-DNIT-FXB-60/85	0,069	0,111	0,128	0,152	0,184	0,222
U5-DNIT-FXB-ECO	0,174	0,255	0,287	0,339	0,459	0,557
U5-DAER-FXB-ECO	0,040	0,044	0,045	0,047	0,054	0,065
U6-DNIT-FXC-60/85	0,048	0,092	0,114	0,143	0,182	0,225
U7-DNIT-FXC-60/85	0,653	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
U8-DNIT-FXB-50/70	0,078	0,119	0,145	0,175	0,220	0,263
U8-DNIT-FXC-50/70	0,118	0,181	0,207	0,244	0,290	0,340
U9-DNIT-FXC-60/85	0,039	0,082	0,099	0,125	0,159	0,186
U9-DNIT-FXC-TLAF	0,412	0,443	0,460	0,494	0,558	0,622
U10-DNIT-FXC-50/70	0,195	0,281	0,313	0,374	0,485	0,569
U11-DAER-FXA-50/70	0,058	0,100	0,119	0,142	0,165	0,194
U12-DAER-FXB-60/85	0,049	0,077	0,087	0,105	0,128	0,149
U12-DAER-FXC-60/85	0,009	0,021	0,025	0,035	0,044	0,058
U13-DNIT-FXB-50/70	0,236	0,349	0,421	0,521	0,660	0,771
U14-DNIT-FXC-50/70	0,090	0,125	0,137	0,156	0,181	0,212
U14-DNIT-FXB-50/70	0,037	0,156	0,236	0,304	0,432	0,567
U14-DNIT-FXC-60/85	0,102	0,145	0,161	0,184	0,225	0,255

C) Estrutura E3



Dano médio acumulado ao longo dos meses

Mistura	1	6	12	24	60	120
U1-DAER-FXA-50/70	0,025	0,115	0,162	0,206	0,279	0,329
U2-DAER-FXB-50/70	0,000	0,005	0,010	0,020	0,053	0,077
U2-DNIT-FXC-60/85	0,003	0,018	0,037	0,072	0,107	0,152
U2-DNIT-FXC-65/90	0,002	0,015	0,029	0,059	0,092	0,126
U3-DAER-FXB-ECO	0,002	0,004	0,007	0,012	0,028	0,053
U4-DNIT-FXC-50/70	0,009	0,056	0,091	0,123	0,174	0,212
U4-DNIT-FXB-50/70	0,011	0,060	0,087	0,115	0,164	0,197
U5-DNIT-FXB-60/85	0,003	0,018	0,034	0,065	0,092	0,122
U5-DNIT-FXB-ECO	0,040	0,118	0,153	0,208	0,292	0,353
U5-DAER-FXB-ECO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004
U6-DNIT-FXC-60/85	0,002	0,012	0,024	0,053	0,091	0,122
U7-DNIT-FXC-60/85	0,516	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
U8-DNIT-FXB-50/70	0,004	0,015	0,033	0,070	0,103	0,143
U8-DNIT-FXC-50/70	0,015	0,078	0,105	0,147	0,194	0,243
U9-DNIT-FXC-60/85	0,001	0,008	0,016	0,036	0,070	0,093
U9-DNIT-FXC-TLAF	0,175	0,247	0,279	0,330	0,389	0,448
U10-DNIT-FXC-50/70	0,031	0,130	0,181	0,227	0,300	0,359
U11-DAER-FXA-50/70	0,001	0,013	0,031	0,057	0,078	0,095
U12-DAER-FXB-60/85	0,001	0,005	0,009	0,019	0,044	0,062
U12-DAER-FXC-60/85	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004
U13-DNIT-FXB-50/70	0,099	0,238	0,295	0,352	0,477	0,596
U14-DNIT-FXC-50/70	0,004	0,024	0,047	0,069	0,088	0,115
U14-DNIT-FXB-50/70	0,007	0,176	0,258	0,313	0,426	0,512
U14-DNIT-FXC-60/85	0,006	0,039	0,068	0,088	0,127	0,161