

APLICAÇÃO DO SOFTWARE LVECD PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS FRENTE AO FENÔMENO DE FADIGA

Sílvia Lisboa Schuster

Doutorando em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
silviolschuster@gmail.com

Yasser Zanatta Assaf

Graduando em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
yasser.z.assaf@gmail.com

Lucas Dotto Bueno

Doutorando em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
lucas.bueno09@gmail.com

Jennifer Ilha Vendrusculo

Graduanda em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
jennifer-ilha@hotmail.com

Luciano Pivoto Specht

Professor do curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
luspecht@gmail.com

Resumo. A análise do comportamento das misturas asfálticas é de significativa importância no cenário da pavimentação, cujo objetivo final é o melhor desempenho, aliado à economia de recursos. A modelagem da fadiga em pavimentos é uma tarefa desafiadora, visto que o fenômeno tem uma natureza complexa.

O delinear metodológico deste trabalho consiste em apresentar o funcionamento do software LVECD na caracterização de quatro misturas asfálticas com CAP 50/70, seguidos pela análise de desempenho dos materiais empregados em estruturas hipotéticas, para a caracterização do comportamento à fadiga, por meio das curvas de dano médio acumulado e pela aplicação da função de transferência calibrada por Nascimento (2015) para obtenção da área trincada simulada ao longo do tempo. Após a demonstração do software, concluiu-se que este é capaz de identificar o comportamento das misturas e estruturas frente ao trincamento por fadiga, podendo fornecer ao

projetista uma avaliação das misturas asfálticas, identificando qual a melhor opção para o emprego em campo. Conclui-se também que misturas com CAP 50/70 podem oferecer tanto bom como ruim desempenho frente à fadiga, de modo que outras variáveis possuem forte influência no fenômeno.

Palavras-chave: LVECD. S-VECD. Fadiga.

1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento das misturas asfálticas é de significativa importância no cenário da pavimentação, cujo objetivo final é o melhor desempenho, aliado à economia de recursos.

Nascimento (2015) relata que o trincamento por fadiga, caracterizado pela repetição de carregamentos incidentes no pavimento, gerando uma danificação cumulativa no concreto asfáltico é o principal tipo de defeito observado nos revestimentos asfálticos brasileiros. Desta forma, são de

fundamental relevância o entendimento do fenômeno de fadiga e a verificação da resposta dos materiais que estão sendo empregados nas rodovias frente a este problema.

A modelagem da fadiga em pavimentos é uma tarefa desafiadora, visto que o fenômeno tem uma natureza complexa, aliado à imprecisão da maioria dos testes e protocolos de análise brasileiros. Compreender o comportamento das misturas asfálticas sob indução de cargas repetitivas é imprescindível para prever corretamente a ocorrência do trincamento por fadiga e, conseqüentemente, o desempenho do pavimento.

Além disso, o concreto asfáltico é um material com comportamento dependente de todo seu histórico de tensões, demandando a aplicação da teoria da viscoelasticidade e da análise do crescimento do dano no material para avaliar seu comportamento sob um complexo intervalo de cargas aplicadas, tempos distintos de aplicação e diferentes temperaturas.

Nesse sentido, o Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo Simplificado (S-VECD), reportado por Kim 2009, Underwood 2010, Underwood 2012, Nascimento 2015 e Schuster 2018, representa uma alternativa para caracterização do comportamento das misturas asfálticas, incorporando as propriedades fundamentais do material em um programa simplificado de ensaios laboratoriais, com base na teoria da viscoelasticidade e na mecânica de dano contínuo. Esta análise permite uma compreensão significativamente satisfatória de como a danificação evolui nas misturas asfálticas, sob diferentes condições de carga e ambiente.

Os dados obtidos a partir do modelo S-VECD, juntamente com as propriedades viscoelásticas das misturas, podem ser usados para a aplicação do software LVECD - *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*, comprovado como uma ferramenta capaz de prever a performance do

pavimento asfáltico (ESLAMINIA et al., 2012). Desta maneira, é possível avaliar o dano acumulado ao longo do tempo e analisar o desempenho do pavimento, classificando as misturas quanto sua resistência à fadiga.

Assim, este trabalho buscou avaliar o desempenho frente à fadiga de quatro misturas asfálticas, ensaiadas em laboratório, incorporadas ao modelo S-VECD e, posteriormente, simuladas em condições próximas as reais de campo com o software LVECD, avaliando a capacidade de utilização desta ferramenta como critério de avaliação de misturas asfálticas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nos itens que seguem, estão apresentados os conceitos que se fazem pertinentes ao entendimento do estudo em questão, objetivando a correta utilização da rotina de análise empregada neste estudo.

2.1 Fadiga em misturas asfálticas

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.

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 à 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.

2.2 Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-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 (Olard e Di Benedetto, 2003) com alguma teoria que fosse capaz de representar o acúmulo de dano no material. Desta forma, surge o S-VECD (Kim e Little (1990) Schapery (1981) Schapery (1990) Lee e Kim (1998) Daniel e Kim (2002) Chehab et. al. (2002) Underwood et al. (2010) e Underwood et al. (2012) Sabouri e Kim (2014)), 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.

2.3 Análise de desempenho por meio do LVECD

O desempenho de um pavimento está ligado diretamente à relação tensão-deformação que este apresenta quando solicitado. Conforme Huang (2004), o principal método de abordagem desta relação consiste em 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 viscoso, juntamente com o elástico. Baseado em uma abordagem viscoelástica de cargas em movimento, no modelo S-VECD, no critério de falha G^R (desenvolvido por Sabouri e Kim 2014) e considerando o carregamento em movimento gerando tensões tridimensionais, Eslaminia et al. (2012) desenvolveram o software *Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses* (LVECD). O programa está estruturado para prever os comportamentos de fadiga e de deformação permanente, utilizando a mecânica do dano contínuo e modelos viscoelásticos, 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;
- 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.

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.

2.4 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais são de extrema relevância na análise de fadiga das misturas

asfálticas, uma vez que fornecem subsídios para uma maior compreensão dos comportamentos desses materiais, quando submetidos a ciclos de tensões e deformações (Schuster, 2018).

Para a utilização do software LVECD, são necessários dados provenientes de ensaios de fadiga e a caracterização linear viscoelástica por meio do ensaio de módulo complexo.

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão (AASHTO TP 107) considera propriedades fundamentais para efetivamente caracterizar o comportamento asfáltico. Nele, é aplicado na amostra uma deformação cíclica senoidal de amplitude constante, a partir da qual se medem o ângulo de fase e módulo dinâmico do material. A rigidez da mistura é monitorada até que ocorra a ruptura da amostra.

A principal vantagem do ensaio é a rápida e precisa obtenção dos resultados a serem modelados através da mecânica do dano contínuo, com o modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD). Assim, ter-se-á a vida de fadiga das misturas, sob qualquer condição de carregamento, usando menos amostras e com um tempo de execução inferior ao dos outros ensaios.

O ensaio de módulo complexo (AASHTO T 342) pode ser definido com um teste que simula o comportamento real dos revestimentos asfálticos, variando a frequência e temperatura de exposição para representar suas características de rigidez. Assim, ele determina as características viscoelásticas do material de maneira bastante completa, uma vez que abrange diferentes espectros de rigidez, variando os fatores das quais ela depende diretamente.

3. METODOLOGIA

O delinear metodológico deste trabalho consiste na caracterização de quatro misturas

asfálticas em termos de rigidez e danificação, seguidos pela análise de desempenho dos materiais empregados em estruturas hipotéticas, com uso do LVECD.

3.1 Materiais

As quatro misturas asfálticas utilizadas neste trabalho para a demonstração do software LVECD até a previsão de área trincada ao longo do tempo, são misturas utilizadas em obras rodoviárias do Estado do Rio Grande do Sul, dosadas pelo método Marshall, com ligante convencional CAP 50/70, com composições granulométricas distintas e de diferentes origens mineralógicas.

3.2 Ensaios

Os ensaios de módulo complexo foram feitos com base na norma AASHTO T 342, 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 do referido documento.

Para os testes de fadiga, foi realizado o ensaio uniaxial cíclico de fadiga por tração-compressão, que 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.

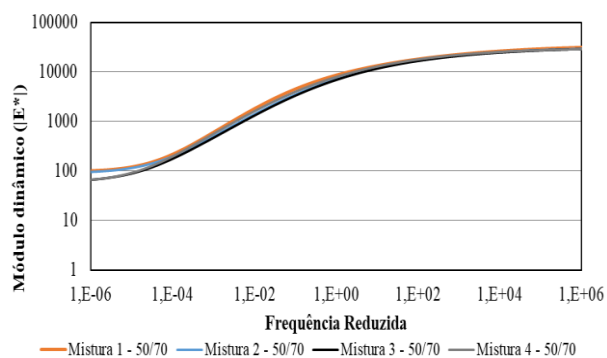
3.3 Caracterização linear viscoelástica

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

modelados por função sigmoideal são *input* necessário tanto para a construção das curvas características de dano (C vs S) (seção 3.2) quanto como dados de entrada no software LVECD para a análise tensão-deformação.

As curvas mestras de módulo dinâmico (Figura 1) demonstram que as misturas apresentam um comportamento similar no espectro de rigidez, não sugerindo grandes diferenciações quando analisadas as respostas de tensões e deformações quando simuladas em estruturas de pavimento.

Figura 1 - Curvas mestras de módulo dinâmico

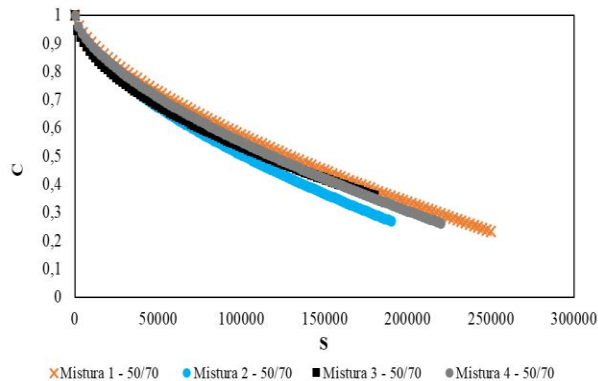


3.4 Obtenção da curva característica de dano C vs S e das envoltórias de Ruptura Gr vs Nf

O modelo S-VECD foi utilizado para a construção das curvas características de dano (C vs S) e para o critério de falha na previsão de desempenho. As curvas características do dano representam a relação entre integridade do material (C) e dano (S), e são independentes do histórico de carga e da temperatura. Este atributo permite a derivação de um modelo para prever a evolução do dano por fadiga sob qualquer situação, com um protocolo de ensaios de poucas amostras e de tempo reduzido. A Figura 2 exhibe as curvas características de dano obtidas por meio do modelo S-VECD para cada uma das misturas asfálticas estudadas.

Visualiza-se na Figura 2 que a Mistura 1, 2 e 4 rompem em um nível de perda de integridade muito semelhante, entretanto a Mistura 1 é a que tolera o maior nível de dano até a ruptura, seguida das Misturas 4 e 2 respectivamente. Já a Mistura 3 rompe para uma perda menor de integridade. Embora se possa estabelecer níveis de acúmulo de dano e de integridade na ruptura, as curvas C vs S não estabelecem critérios de resistência à fadiga, pois estes dependem de um critério de falha e também de uma simulação de pavimento, para as análises de tensões e deformações.

Figura 2 - Curvas características de dano (C vs S)



Desta forma, o critério de falha por fadiga G^R do modelo S-VECD foi aplicado para todas as misturas deste estudo. Este critério é apresentado por Zhang et al. (2013), que 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 por fadiga de maneira equivalente a queda do ângulo de fase em observações experimentais, com consistência e precisão. Posteriormente Sabouri e Kim (2014) atualizaram o método e definiram o 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 1).

$$G^R = \frac{\overline{W_C^R}}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{N_f} \quad (1)$$

Em que:

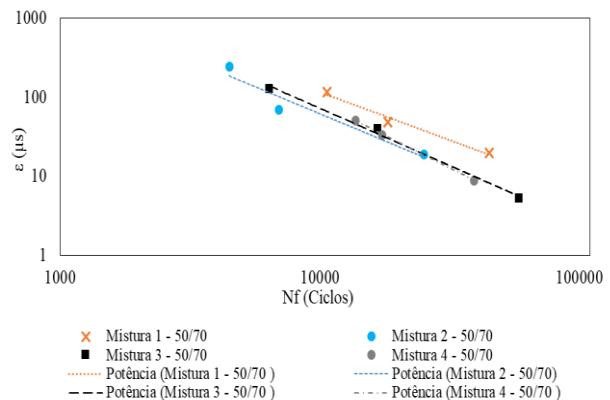
W_C^R = energia de pseudo deformação liberada por ciclo

N_f = ciclo de falha por fadiga definido pelo pico do ângulo de fase

A diferença entre a energia de pseudo-deformação máxima armazenada e o estado em que o material não é submetido ao dano é referida como a energia de pseudo-deformação total liberada e é denotada como W_C^R . Detalhes sobre o método G^R e seus cálculos correspondentes podem ser encontrados também em Nascimento (2015), Norouzi (2015) e Schuster (2018).

Visto isso, as envoltórias de ruptura (G^R vs N_f) das misturas estão apresentadas na Figura 3, indicando que misturas com melhor desempenho à fadiga tendem a apresentar envoltórias localizadas mais acima e à direita, além de menores inclinações, sinalizando que, para um mesmo valor de G^R , estas misturas apresentam um N_f superior (Norouzi et al., 2015).

Figura 3 - Envoltórias de ruptura G^R vs N_f



Percebe-se por meio das envoltórias de ruptura um comportamento próximo das misturas 2, 3 e 4, ao passo que a Mistura 1 exibe uma curva mais a direita e acima que as

demais, sugerindo um melhor comportamento a fadiga.

3.3 Análise de desempenho por meio do LVECD

Neste estudo, as simulações do programa LVECD, versão 1.1 (Beta), foram usadas para avaliar os efeitos das características de cada mistura asfáltica frente ao dano por fadiga em uma estrutura típica de pavimento.

Considerou-se uma implantação de estrutura de pavimento nova, com período de projeto de 10 anos. Utilizou-se uma estrutura 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. Acima destas camadas fixadas, foi disposto o revestimento asfáltico, com 10 cm de espessura.

A interface do software LVECD está dividida em seis abas principais, 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 diz respeito às informações gerais do projeto. 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.

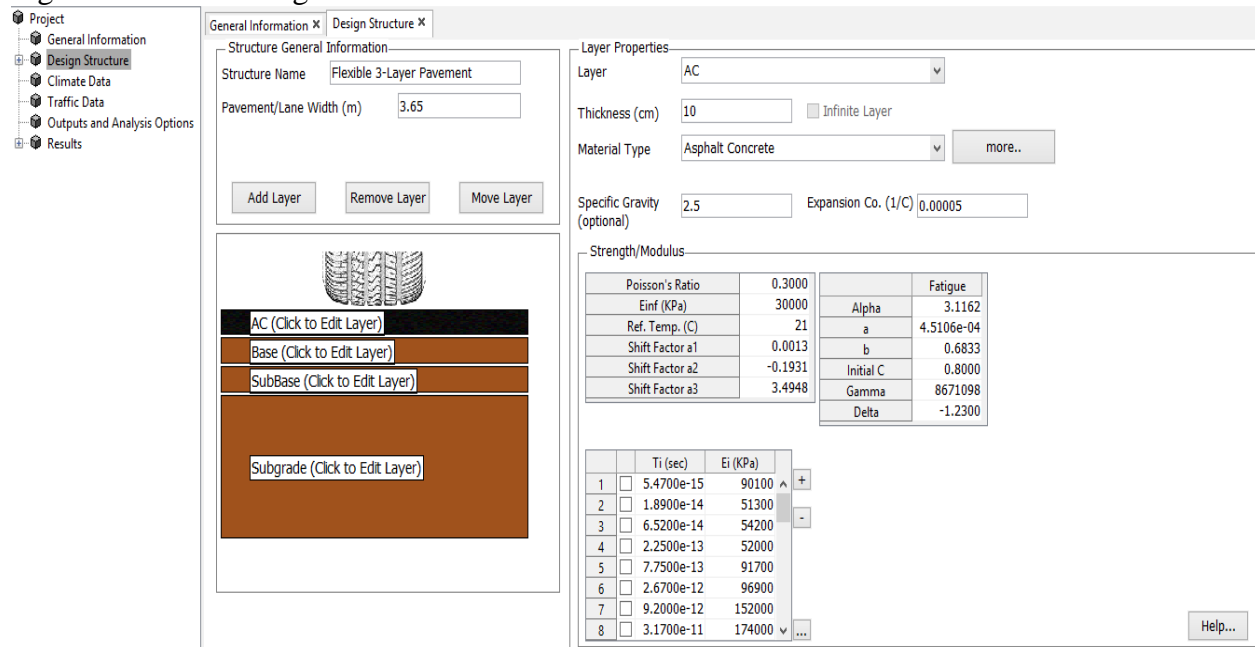
Para este trabalho, habilitou-se a opção de fadiga e de tensões advindas da variação de temperatura, não sendo contemplados os defeitos de afundamento de trilha de roda, visto que este não faz parte do escopo desta pesquisa.

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 4).

Com a estrutura determinada, editam-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 o dados provenientes do modelo S-VECD, como os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos pelo ajuste do modelo exponencial 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 .

Figura 4 - Aba "Desing Structure" do software LVECD



Após a inserção dos dados de caracterização da estrutura, passa-se para a seguinte aba, que consiste da entrada dos dados climáticos.

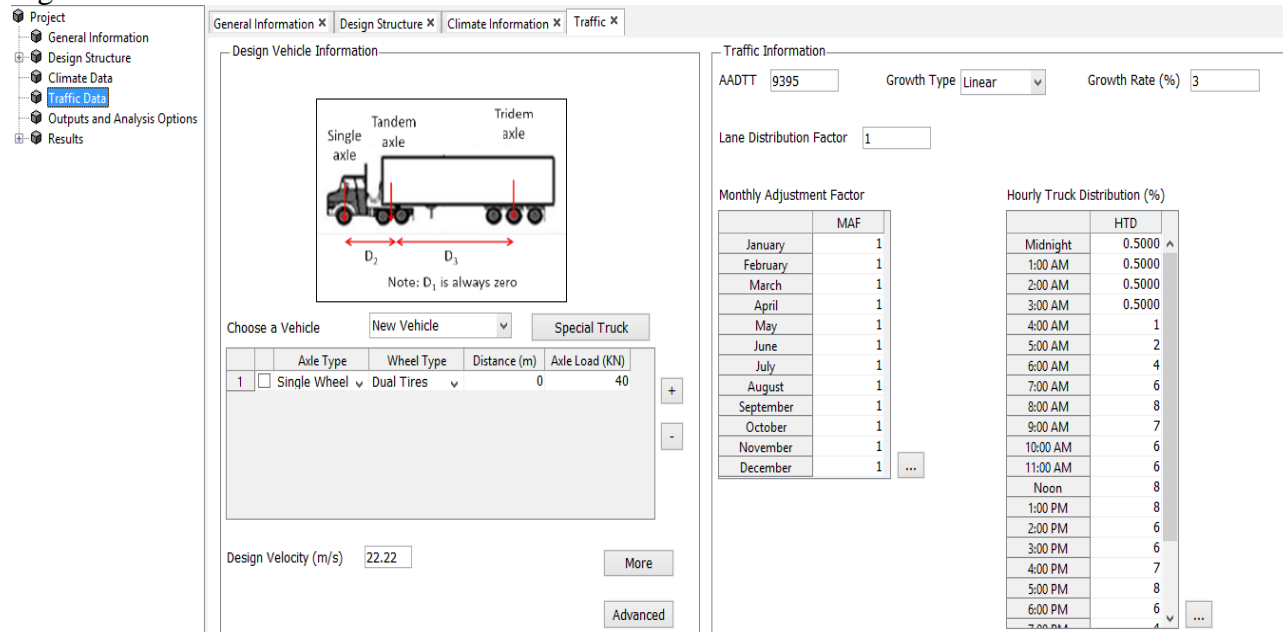
Utilizou-se para estes um modelo EIMC (*Enhanced Integrated Climate Model*) do banco de dados padrão do software. Este banco de dados conta com dados de temperatura ao longo da profundidade para todos os dias do ano, separados de hora em hora, em diferentes estados e cidades norte americanas. De modo a simular uma condição próxima àquela apresentada no estado do Rio Grande do Sul, optou-se por utilizar as informações existentes para a cidade de San Diego, no estado da Califórnia (EUA), cujas variações térmicas se assemelham com aquelas observadas na região sul do Brasil.

Em relação às características de tráfego, foi determinado um número de 3500 passagens diárias, com uma taxa anual de crescimento de 3% ao ano, resultando ao final dos 10 anos de análise um N de cerca de $1,5 \times 10^7$ repetições do eixo padrão. O tráfego

foi considerado igualmente distribuído ao longo dos meses do ano, entretanto variou ao longo das horas do dia, conforme recomendações de Nascimento (2015), 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.

Para representação do carregamento do tráfego transmitido a estrutura do pavimento, 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. A Figura 5 exhibe o layout da aba de entrada de dados de tráfego utilizada pelo software.

Figura 5 - Aba "Traffic" do software FlexPAVE



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.

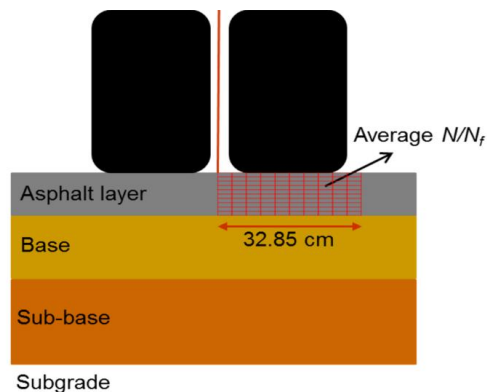
Também é nessa aba a determinação da malha de pontos para a análise tanto dos dados de tensão e deformação como para o cálculo do dano médio (N/N_f) acumulado por fadiga.

Para a análise foi utilizada uma malha com 110 pontos (Figura 6), 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), Schuster (2018) e Mocelin (2018).

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



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 como se comportam em campo. Maiores detalhes a respeito do funcionamento do software podem ser encontrados em Eslaminia et al. (2012).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através da proposta metodologica deste trabalho.

4.1 Curvas de dano médio acumulado

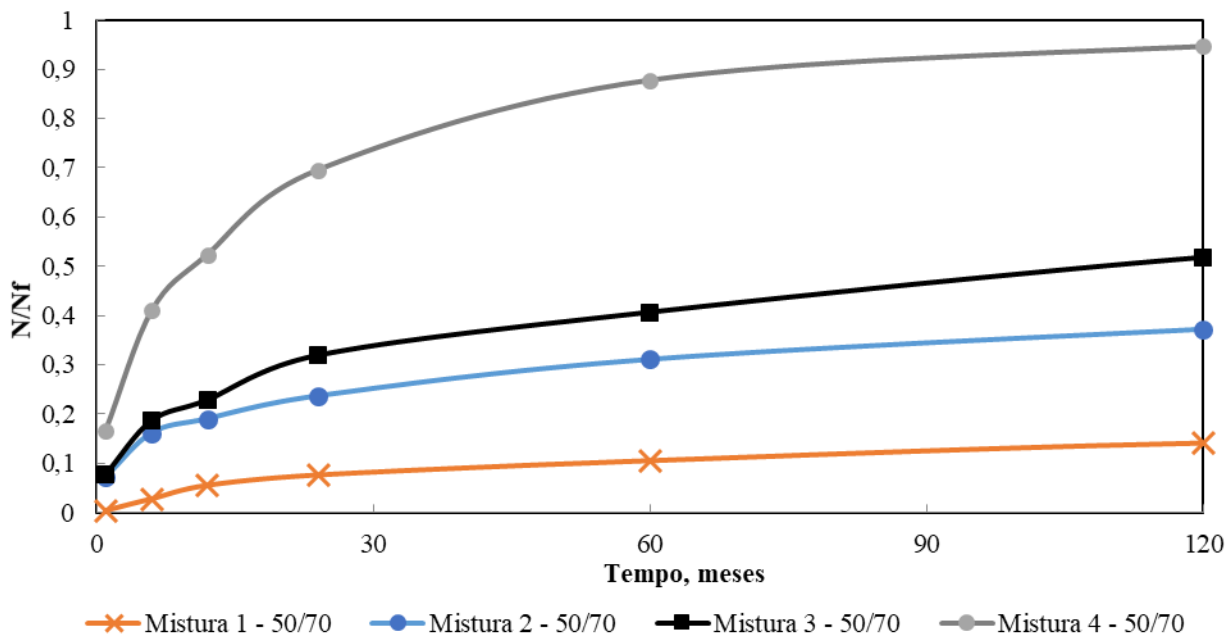
A fim de avaliar o desempenho à

fadiga dos revestimentos asfálticos empregados nos trechos monitorados, testes de módulo dinâmico e de fadiga foram conduzidos no intuito de inserir as propriedades das misturas no programa LVECD (Eslaminia et al. 2012).

Vale mencionar que, o parâmetro de dano calculado por meio do LVECD está atrelado as mais distintas variáveis que compõem a estrutura de pavimento, entre elas: a espessura das camadas constituintes, o comportamento linear viscoelástico e de dano por fadiga das misturas asfálticas, a condição de temperatura do revestimento, o tráfego e a rigidez das camadas subjacentes ao revestimento.

É possível verificar, por meio da Figura 7, distintos comportamentos de acúmulo de dano por fadiga em cada uma das misturas analisadas.

Figura 7 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo



Visto que se utilizou a mesma estrutura de pavimento, o mesmo tráfego e clima, e variou-se apenas a camada de revestimento

composta pelas misturas asfálticas deste estudo, é possível inferir pela Figura 7 que a Mistura 1 é a que apresenta o melhor

comportamento em relação as demais, apresentando um dano médio acumulado extremamente baixo ao longo dos 10 anos de projeto simulados.

As Misturas 2 e 3 exibem comportamento intermediários de dano, enquanto a Mistura 4 apresenta o pior comportamento. Frente a estes fatos, é possível perceber que, como ambas as quatro misturas são constituídas de ligante convencional CAP 50/70, este ligante pode favorecer tanto baixos como altos níveis de dano por fadiga dentro de uma mesma situação de projeto, sugerindo que as variáveis como composição granulométrica, teor de ligante, origem mineralógica, morfologia dos agregados, etc... também exercem forte

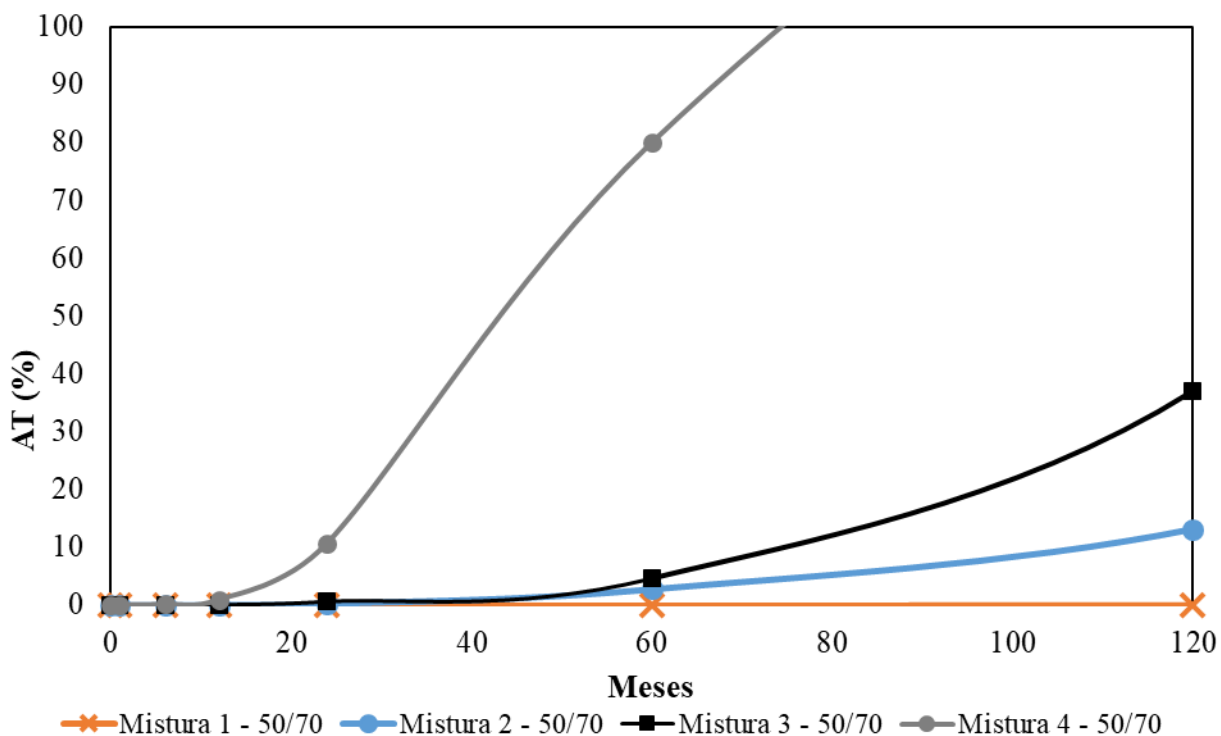
influência sobre a resistência a à fadiga das misturas asfálticas.

4.2 Simulação de área trincada ao longo do tempo

O modelo de dano contínuo viscoelástico foi utilizado no trabalho de Nascimento (2015) para a calibração de uma função de transferência entre dano obtido em laboratório e área trincada observada em pistas experimentais do “Projeto Fundação”, no Rio de Janeiro/RJ. Para o equacionamento da função de transferência reportar a Nascimento (2015).

As misturas analisadas neste estudo passaram pela transferência entre dano acumulado simulado pelo LVECD para área trincada superficial ao longo do tempo em pista, e estão apresentas abaixo na Figura 8.

Figura 8 - Previsão de área trincada para as misturas estudadas



Pode-se perceber por meio da Figura 8 que todas as misturas seguem a mesma tendência de comportamento observado nas

curvas de dano acumulado. A Mistura 4 apresenta uma elevada área trincada simulada superficial ao longo do tempo, atingindo entre

20% e 30% de área trincada (principais indicadores de falha por fadiga adotados em revestimentos asfálticos) em aproximadamente dois anos de serviço. As Misturas 2 e 3, de comportamento intermediário, apresentam baixo trincamento inicial, rompendo pelo mesmo critério anterior ao final de suas vidas de projeto. Já a Mistura 1, que apresentou dano acumulado muito pequeno, também não apresentou trincamento ao longo dos dez anos simulados pelo LVECD e pela utilização da função de transferência.

5 CONCLUSÕES

Foi possível observar que o protocolo metodológico, passando pela caracterização linear viscoelástica, pelas curvas características de dano e pelas envoltórias de ruptura, ambas obtidas pelo modelo S-VECD, e o software computacional LVECD formam uma ferramenta consistente de análise de fadiga em misturas asfálticas. Podendo ainda ser expandida com a utilização de função de transferência para a visualização de área trincada em pista.

Verificou-se também, que misturas com CAP 50/70 podem oferecer tanto bom como ruim desempenho frente à fadiga, levando a conclusão que são muitos os fatores atrelados as respostas do comportamento das misturas, sendo necessários mais estudos acerca do tema resistência à fadiga.

AGRADECIMENTOS

À ANP/PETROBRAS e CAPES pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM; ao Professor Dr. Richard Kim e a North Carolina State University-NSCU pela licença do LVECD.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). T 342/11: **Standard Method of Test for Determining**

Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington (EUA), 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). TP 107/14: **Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests.** Washington (EUA), 2014

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.

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.

HUANG, Y.H., **“Pavement Analysis and Design.”** 2nd edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 2004.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N. **One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete.** In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 4, pp.

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.

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.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica do dano contínuo.** 270 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2018.

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.

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