

# UTILIZAÇÃO DO S-VECD PARA AVALIAÇÃO DO DANO POR FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM DIFERENTES CAPs BRASILEIROS

Evelyn Paniz Possebon<sup>1</sup>

Silvio Lisboa Schuster<sup>1</sup>

Chaveli Brondani<sup>1</sup>

Luciano Pivoto Specht<sup>1</sup>

Fernando Dekeper Boeira<sup>1</sup>

Deividi da Silva Pereira<sup>1</sup>

Luis Alberto H. do Nascimento<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria - Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária

<sup>2</sup>Centro de Pesquisa da Petrobras

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento ao dano por fadiga de misturas originadas a partir de cinco CAPs 50/70 que representam parcialmente a produção brasileira nas refinarias REFAP (RS), REPAR (PR), REGAP (MG), LUBNOR (CE) e REVAP (SP). As misturas foram produzidas com o mesmo esqueleto pétreo, conforme a Faixa C do DNIT, dosadas pela metodologia Superpave e foram submetidas ao ensaio de Fadiga à Tração-Compressão uniaxial para avaliar o dano considerando o modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*). Além da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler, o S-VECD foi utilizado como premissa de ensaio e análise dos resultados de fadiga tração-compressão. Para ranquear as misturas foram simulados cinco pavimentos no AEMC/SisPav, considerando as rigidezes de cada mistura na camada de revestimento para obter as deformações do pavimento. Desta forma foi possível retirar das curvas de número de ciclos (N) versus deformação os valores de N para cada deformação encontrada para o pavimento simulado. Assim, verificou-se que as misturas com CAPs 50/70 se dispõem em três patamares de resistência à fadiga, sendo a com CAP 50/70 da REFAP a mais resistente e as menos resistentes foram as misturas de CAP 50/70 da LUBNOR, REVAP e REGAP.

## ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the fatigue behavior of mixtures originated from five Petroleum asphalt cements (PACs) that partially represent Brazilian production, produced in refineries REFAP (RS), REPAR (PR), REGAP (MG), LUBNOR (CE) and REVAP (SP). The asphalt mixtures, produced from different PACs and the same aggregates (as DNIT C range), dosed by the Superpave methodology, were submitted to the Direct Tension Cyclic Fatigue test to evaluate the damage. In addition to the classical Wöhler curves approach, S-VECD was used as testing and analysis premise of Direct Tension Cyclic Fatigue test results. To rank the mixtures, five pavement structures were simulated in AEMC/SisPav, considering the stiffness of each mixture layer in the coating for the deformation. In this way, it was possible to remove the N values for each deformation found for the simulated pavement from the curves of number of cycles (N) versus deformation. Therefore, the five mixtures with 50/70 PACs are arranged in three resistance levels: the CAP 50/70 of REFAP being the strongest and the least resistant were the PAC 50/70 mixtures of LUBNOR, REVAP and REGAP.

## 1. INTRODUÇÃO

Primordiais no crescimento econômico e desenvolvimento social do país, as rodovias brasileiras têm como principal componente de seu revestimento o concreto asfáltico, sendo que esta malha rodoviária deve ser capaz de promover segurança, conforto, economia e facilitar os deslocamentos dos usuários. Em vista disso, um adequado projeto de pavimentação deve atender às demandas estruturais e funcionais às quais a estrutura será exposta.

Nascimento (2015) destaca que o trincamento por fadiga é o principal defeito dos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil. Segundo o autor este fenômeno se dá por carregamento repetitivo que incide sobre o pavimento se caracterizando por aparecimento de trincas na camada de revestimento.

A compreensão acerca do fenômeno de fadiga e do desempenho do pavimento passa pelo estudo do comportamento das misturas asfálticas quando expostas aos carregamentos repetitivos. Para avaliar o comportamento do concreto asfáltico é necessário levar em consideração todo o histórico de tensões ao qual o mesmo foi submetido, ou seja, deve-se analisar o intervalo de cargas aplicado, as diferentes temperaturas e tempos de aplicação, empregando para tal, o estudo a teoria da viscoelasticidade e análise do crescimento do dano no material.

Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP), essenciais na composição de adequadas misturas asfálticas, possuem uma gama bastante variável de constituição e propriedades químicas, isto resulta do fato de serem derivados de diferentes petróleos, mistura de petróleos e variadas rotas de produção. Atualmente os CAPs aplicados nos pavimentos brasileiros são produzidos e comercializados por nove refinarias da Petrobras. As refinarias estão localizadas em oito estados e são abastecidas por várias fontes de petróleo. Além da produção em cada refinaria possuir etapas distintas, a matriz do petróleo - que se trata de um material com estrutura química complexa - é diferente, conseqüentemente os CAPs que são produzidos nas nove refinarias brasileiras podem variar em suas características físicas, químicas e de comportamento quando aplicados na pavimentação.

Este trabalho tem como objetivo avaliar em laboratório a resistência ao dano por fadiga das misturas asfálticas e consolidar o protocolo S-VECD para a caracterização de misturas brasileiras. É importante caracterizar o dano por fadiga das misturas asfálticas, onde é necessário avaliar seu comportamento sob o estado de tensão para capturar as características fundamentais dos materiais.

## **2. METODOLOGIA**

Este item aborda o planejamento da pesquisa, características das misturas asfálticas e seus componentes (agregados e CAPs). Trata ainda dos procedimentos laboratoriais que serão empregados - de modo a alcançar o objetivo de avaliar as misturas quanto ao dano por fadiga.

### **2.1. Materiais utilizados**

Os agregados utilizados são provenientes do município de Itaara/RS, localizado na formação geológica do Planalto Basáltico, classificado como um riolito de origem vulcânica. Foram utilizadas as frações brita 3/4, brita 3/8, pó de pedra e cal. Realizaram-se ensaios de índice de forma (conforme DNER-ME 086/94, resultados para a brita 3/4": 0,94% e 3/8": 0,78%), índice de lamelaridade (a norma utilizada foi DAER/RS-EL 108/01, resultados para a brita 3/4": 9,20% e 3/8": 27,4%), sanidade (DNER-ME 089/94, resultado 0,44%), abrasão (DNER-ME 035/98, resultando 13%) e equivalente de areia (DNER-ME 054/97 com resultado de 80%). Ainda, foi realizado o ensaio de absorção conforme DNER-ME 195/97, cujo resultado encontrado foi de 2,93%, valor considerado alto para este tipo de agregados. A adesividade do agregado se mostrou satisfatória para todos os CAPs estudados. Foram realizados ensaios de textura dos agregados por AIMS, onde, de um modo geral os agregados são cúbicos (esfericidade alta), moderadamente rugosos e não alongados. Resultados detalhados dos agregados e da cal podem ser encontrados em Possebon (2018).

Para uma ampla amostragem dos CAPs brasileiros, foram coletados CAPs em diferentes refinarias do Brasil localizadas em cinco estados. Os cinco CAPs escolhidos para esta pesquisa representam uma parcela da produção brasileira de cimentos asfálticos convencionais em um dado momento. Os CAPs utilizados nesta pesquisa são: CAP 50/70 produzido na LUBNOR no

Ceará; CAP 50/70 produzido na REFAP no Rio Grande do Sul; CAP 50/70 produzido na REGAP em Minas Gerais; CAP 50/70 produzido na REPAR no Paraná; CAP 50/70 produzido na REVAP em São Paulo. As especificações dos CAPs constam na Tabela 1.

**Tabela 1: Resultados dos ensaios de especificação dos CAPs.**

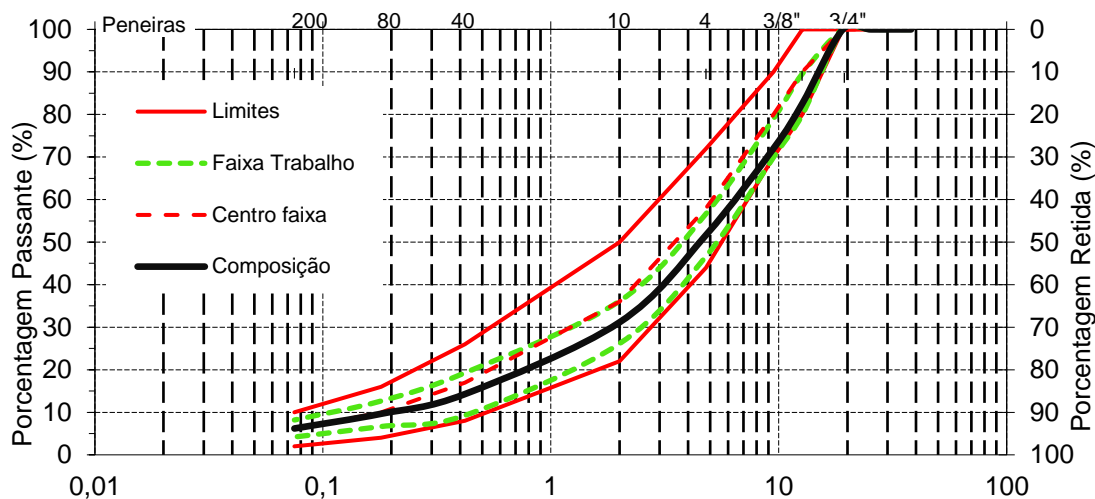
PROPRIEDADE/UNIDADE	MÉTODO	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
		LUBNOR	REFAP	REGAP	REPAR	REVAP
Penetração (0,1mm)	D 5	62	57	50	59	54
Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	48,2	48,6	50,2	48,1	49
Viscosidade Brookfield a 135°C	D 4402	369	300	315	314	392
Viscosidade Brookfield a 150°C	D 4402	181	156	169	160	193
Viscosidade Brookfield a 177°C	D 4402	67	60	64	59	74
RTFOT Penetração Retida (%)	D 5	74	65	55	70	63
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	3,2	4,8	4,8	2,3	4,2
RTFOT Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	>150	>147	>150	>100	>150
RTFOT Variação em % Massa (%)	D 2872	0,029	0,053	-0,121	-0,024	-0,1
Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	>150	>147	>150	>100	>150
Solubilidade no Tricloroetileno (% massa)	D 2042	100	100	99,9	99,9	100
Ponto de Fulgor (°C)	D 92	>300	>236	328	>235	264
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,2	-1,3	-1,1	-1,3	-1,3
Densidade relativa a 20/4 °C	D 70	1,000	1,000	1,011	1,013	1,019

As misturas asfálticas desta pesquisa foram moldadas com os cinco CAPs diferentes, todas com o mesmo esqueleto pétreo e 2% de cal (valor comumente adotado nos projetos de pavimentos no RS). O teor de CAP de projeto foi definido pela metodologia Superpave (SHRP, 1994), utilizando o Compactador Giratório Superpave.

A composição granulométrica da mistura foi estudada e definida para se adequar aos limites da Faixa C do DNIT ES-031/2006. A mistura é considerada miúda conforme o *Asphalt Institute* (2011) pois 51,7% do material é passante na peneira 4,75mm (peneira de controle para este TMN). Privilegiou-se o melhor ajuste granulométrico, o método Bailey e FAD foram utilizados como parâmetros adicionais. Para mistura foi definida a proporção de agregados de: 29% de brita 3/4”, 23% de brita 3/8”, 46% de pó de pedra e 2% de cal. A curva de composição granulométrica da mistura está apresentada na Figura 1 onde é possível visualizar o encaixe da curva de composição das misturas (preta) entre as curvas de limites da Faixa C do DNIT (vermelhas) e também o ajuste entre a faixa de trabalho (curvas verdes). A forma de escolha da granulometria da mistura de agregados na metodologia Superpave inclui os conceitos de pontos de controle conforme SHRP (1994). Esta composição granulométrica respeita os pontos de controle mínimos e máximos da metodologia de dosagem Superpave, conforme Possebon (2018).

Para este trabalho a dosagem das misturas asfálticas foi especialmente importante, tendo em vista que a única variação controlada entre as misturas é o tipo de CAP e seu teor. Foram considerados os limites dos valores de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e da Relação Betume Vazios (RBV). Os resultados de teor de ligante foram fixados para o Volume de vazios (VV) de 4% (teor de ligante de projeto) em todas as misturas e constam na Tabela 2, bem como os valores calculados de teor de ligante absorvido e efetivo, VAM, RBV, Massa Específica aparente (MEA) e Faixa de Agregados Dominante (FAD) para estes teores.

Todos os teores de projeto ficaram próximos de 5,60%. Não se esperava grande discrepância destes valores, pois a metodologia de moldagem e a composição granulométrica dos agregados foi a mesma para todas as misturas, variando apenas as temperaturas de usinagem e compactação conforme as viscosidades dos CAPs. A variação de 0,30% do valor absoluto no teor de ligante entre as misturas com teor mais baixo e alto é considerada muito pequena, dentro da margem de erro da faixa de tolerância de produção.



**Figura 1:** Curva da composição granulométrica - Faixa C DNIT ES 031/2006.

**Tabela 1:** Resultado do teor de ligante de projeto, VAM, RBV, MEA e FAD.

Mistura	Teor de ligante de projeto (%)	Teor de ligante absorvido (%)	Teor de ligante efetivo (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade FAD (%)
50/70 LUBNOR	5,42	0,41	5,40	17,75	77,59	2,28	36,1
50/70 REFAP	5,72	0,41	5,70	17,64	77,36	2,27	36,3
50/70 REGAP	5,55	0,41	5,53	17,62	77,32	2,27	36,2
50/70 REPAR	5,85	0,41	5,83	17,75	77,67	2,27	36,4
50/70 REVAP	5,66	0,41	5,64	17,73	77,47	2,27	36,3

## 2.2. Método de ensaio

O ensaio fadiga tração-compressão uniaxial consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação cíclica senoidal até que ocorra a ruptura ou a queda do ângulo de fase. São coletados e monitorados a deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico durante a realização do ensaio.

A norma da AASHTO TP 107-14 (*Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*) é responsável por detalhar os métodos de ensaio, mostrado na Figura 2. As amostras das misturas foram moldadas no compactador giratório do Superpave (CGS) com os teores de projeto nas dimensões de 10x16cm e volume de vazios de 5,5% ± 0,5%. Após a retificação nas superfícies, suas dimensões finais ficaram iguais a 10x13cm. Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C variando a amplitude de deformação. Foram utilizadas quatro amostras por mistura, uma para cada nível diferente de deformação (cerca de 125, 150, 200 e 250µS). As deformações utilizadas nas análises são as deformações de ensaio, ou seja, as medidas pelos LVDTs. Para selecionar os valores de deformação e gerar as curvas

de Wöhler e a análise pelas equações de Nascimento (2016), foi calculada a média de todas as deformações do ensaio até a ruptura do CP.



**Figura 2:** Realização do ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial

Conforme Mangiafico (2014), durante o ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial, as misturas sofrem deterioração progressiva. Esse fenômeno, juntamente com falha prematura, é considerado efeito das cargas repetidas. Especificamente, à medida que o número de ciclos aumenta, o valor do módulo dinâmico diminui enquanto o valor de o ângulo de fase aumenta. Portanto, durante testes controlados por tensão, a deformação medida aumenta com o número de ciclos até a falha da amostra. Pelo contrário, durante os testes controlados por deformação, a tensão diminui com o aumento do número de ciclos para valores idealmente próximos de zero ou até a falha da amostra.

O critério de ruptura adotado nesta pesquisa para os ensaios de fadiga foi proposto por Kim et al. (2003) e consiste em identificar o ponto de inflexão na curva de Ângulo de fase versus número de ciclos. O ponto de inflexão correspondente ao pico do ângulo de fase e é considerado como representativo de uma mudança do comportamento mecânico do material, devido ao acúmulo de danos por fadiga. Por este motivo, o número de ciclos correspondente ao pico do ângulo de fase é tido como a vida de fadiga  $N_f$ .

Para a realização de cada ensaio, que segue os protocolos S-VECD desenvolvido por Daniel & Kim (2002), Kim & Chehab (2004), Underwood & Kim (2009) e Underwood et al. (2012), é feito primeiramente o ensaio de módulo complexo de curta duração em tensão-compressão (*fingerprint*). Esses ensaios de módulo complexo consistem em determinações com pequenas deformações (50 a 70 $\mu$ m) realizadas para capturar variações de amostra-a-amostra. Para as leituras foram utilizados os mesmos LVDTs dos ensaios de módulo complexo.

Para Nascimento et al. (2014), uma das principais vantagens do S-VECD é a obtenção da propriedade de dano das misturas, independentemente das condições de ensaio (temperatura, amplitude e se a forma de controle é por tensão ou deformação). Assim, ensaios feitos em uma condição específica, permitem a obtenção do comportamento do material em diversas outras

condições, reduzindo o número de amostras e conseqüentemente o trabalho. Babadopulos (2014) explica de forma prática a aplicação do S-VECD em misturas asfálticas, nos mesmos moldes em que foi aplicado nesta pesquisa.

De forma a analisar os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão, foram utilizadas duas equações para ranquear as misturas: As equações das curvas de Wöhler e as equações propostas por Nascimento (2016).

O software de análise mecanicista empírica AEMC-Sispav foi utilizado para compreender os resultados de fadiga e ser possível comparar as misturas. Sucedeu-se da seguinte forma: Todas as misturas foram simuladas com a mesma espessura de camadas e valores de módulos, exceto o valor do módulo do revestimento asfáltico que mudou conforme o CAP utilizado na mistura. Para a entrada de dados no *Software* AEMC-Sispav, considerou-se as camadas do pavimento como sendo não aderidas entre si, carga de eixo duplo igual a 8200 Kgf e pressão de inflação dos pneus igual 0,56MPa e raio do carregamento de 10,79m. O pavimento proposto possui 4 camadas, sendo que o revestimento asfáltico tem 10cm de espessura, a base considerada de brita graduada simples (BGS) 15cm, a sub-base de macadame seco (MS) 20cm e o subleito de solo considerado infinito. Os valores dos módulos da camada superior utilizados foram os Módulos dinâmicos ( $|E^*|$ ), a 19°C e 10Hz, de cada mistura obtidos pelos ensaios de Módulo Complexo realizados por Possebon (2018). Os valores de MR adotados para as camadas de base, sub-base e subleito foram amplamente pesquisados e são a média dos resultados encontrados por Ribas (2014), sendo respectivamente iguais a 202MPa, 197MPa e 84MPa. O valor de módulo do subleito adotado foi encontrado por Santos (2015) para os solos da região central do Rio Grande do Sul. Adotou-se para o coeficiente de Poisson os valores sugeridos por Balbo (2007), sendo estes: 0,35 para o revestimento; 0,30 para a camada de base (BGS); 0,42 para a camada de sub-base (Macadame seco); 0,45 para o subleito.

Os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento com os valores de  $|E^*|$  utilizados para simular cada mistura estão na Tabela 3. O valor escolhido dentre os três pontos analisados foi o que teve o maior valor negativo (maior tensão de tração  $\epsilon_t$ ) e, para todas as misturas simuladas, os maiores valores negativos de tensão foram encontrados no ponto imediatamente abaixo da roda (cr).

**Tabela 3:** Resultados de  $\epsilon_t$  ( $\mu S$ ) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC com os  $|E^*|$  das misturas

MISTURA	$ E^* $ @ 19°C e 10Hz (MPa)	$\epsilon_t$ no fundo do revestimento ( $\mu S$ )
CAP 50/70 LUBNOR	6463	-253
CAP 50/70 REFAP	7074	-238
CAP 50/70 REGAP	6914	-241
CAP 50/70 REPAR	5964	-267
CAP 50/70 REVAP	6949	-241

Outra análise realizada com os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão foi utilizando a Equação 1, desenvolvida por Nascimento (2016). A equação proposta por Nascimento (2016) abrange mais parâmetros obtidos nos resultados dos ensaios e, dessa forma, o  $N_f$  encontrado é considerado mais próximo da realidade do ensaio quando comparado às curvas de Whöhler. Os dados de entrada para o conjunto de Equações de 1 a 5 são retirados dos resultados dos ensaios.

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

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon^R_{TA})^2 C_{11} \left( \frac{(p(C_{11} C_{12})^\alpha (\varepsilon^R_{TA})^{2\alpha})}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\left( \frac{C_{12}}{p} \right)} \quad (2)$$

$$\varepsilon^R_{TA} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left( (\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (3)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (4)$$

$$Gr = Y(Nf)^\Delta \quad (5)$$

Todas as variáveis são encontradas nos resultados dos ensaios após as rotinas de cálculo:  $\varepsilon^R_{TA}$  é a amplitude da pseudo-deformação;  $\alpha$  é a taxa de evolução do dano;  $C_{11}$  e  $C_{12}$  são os coeficientes da curva C vs S média das amostras;  $f_R$  é a frequência reduzida; Gr é a taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio; Nf é o número de ciclos até a falha; Y são os coeficientes do critério de ruptura da curva Gr versus Nf;  $\Delta$  é o expoente da equação Y; C(S) é a integridade do material ou a pseudo rigidez; S é o parâmetro de dano;  $\varepsilon_{0,pp}$  é a amplitude de deformação pico a pico;  $\beta$  é a parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração;  $|E^*|_{LVE}$  é o módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência do ensaio.

Após a rotina de cálculo de Nf pelas equações de Nascimento (2016), têm-se os valores de Nf para cada mistura. Com esses valores, foi possível montar uma curva de Nf versus as deformações encontradas no AEMC para ranquear as misturas quanto à fadiga.

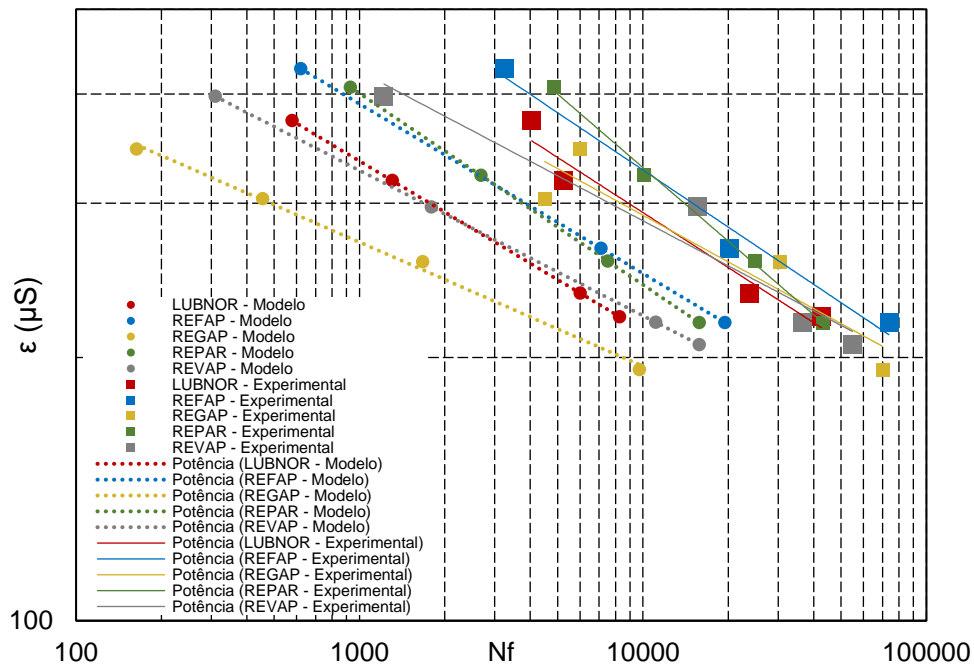
### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados de fadiga das diferentes misturas são descritos e comparados neste tópico. Os resultados foram analisados por meio da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler. O modelo S-VECD foi ajustado aos resultados dos testes cíclicos de fadiga tração-compressão uniaxial realizados com as amostras das misturas. O procedimento utilizado para o processamento de dados foi apresentado pelos autores Nascimento (2015), Babadopulos (2014), Possebon (2018) e Boeira (2018).

As curvas de Wöhler propõem uma relação entre o desempenho à fadiga de um material e o tipo de sollicitação, podendo assim, serem utilizadas para calcular outras deformações desejadas pela equação potencial que representa a ligação dos pontos. O critério de ruptura utilizado é o proposto por Kim et al. (2003) e consiste em identificar o ponto do pico do ângulo de fase que é considerado como representativo de uma mudança do comportamento mecânico do material, devido ao acúmulo de danos por fadiga. O número de ciclos correspondente ao pico do ângulo de fase é tido como a vida de fadiga Nf (ruptura).

Os resultados experimentais de deformação e Nf foram utilizados para gerar as curvas de Wöhler. As curvas de Nf em função da deformação específica de tração média dos ensaios se encontram na Figura 3, junto com as curvas geradas pelas equações de Nascimento (2016)

considerando o S-VECD. As linhas cheias do gráfico representam as curvas de Wöhler, ou seja, as curvas com os  $N_f$  experimentais versus as deformações do experimento. É possível observar que tanto para as curvas de Wöhler como para as curvas de Nascimento, o ranking das misturas é similar. As equações de Nascimento (2016) assumem o ensaio perfeito, logo, se o *input* da equação de Nascimento for o mesmo das curvas de Wöhler, todas as curvas estariam sobrepostas. A Figura 3 mostra as curvas de Wöhler e as geradas pelas equações considerando a deformação média durante o ensaio, por isso a diferença entre elas.



**Figura 3:** Curvas geradas pela união dos pontos (modelo) de  $N_f$  gerados pela equação de Nascimento (2016) e as curvas de Wöhler (experimental)

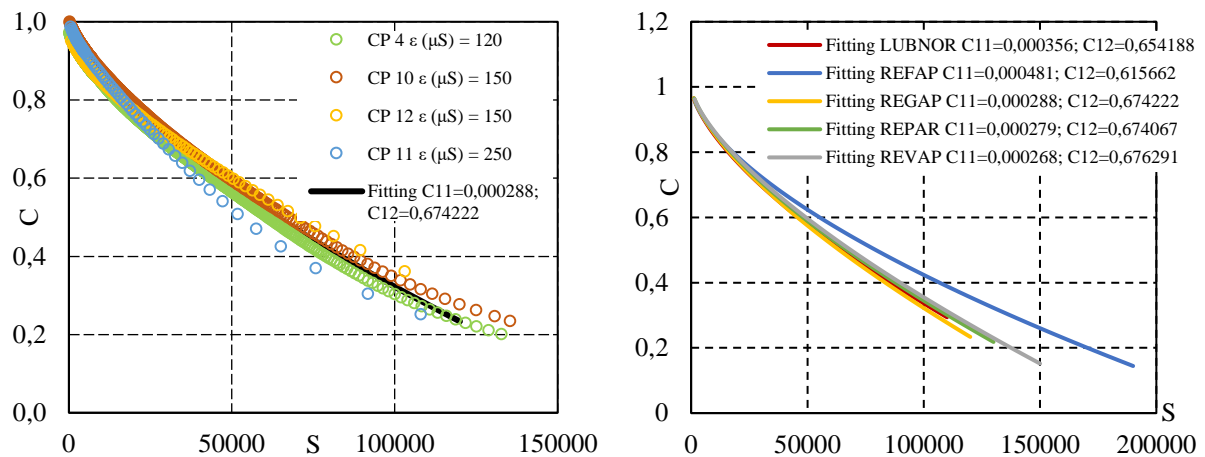
Para considerar o S-VECD, foram geradas curvas de módulo dinâmico e ângulo de fase versus o número de ciclos para cada amostra, de modo a verificar no seu ponto de ruptura ( $N_f$ , ou pico do ângulo de fase) o decréscimo destes parâmetros. O módulo dinâmico cai constantemente enquanto o ângulo de fase sobe até o pico, onde ocorre uma queda súbita que caracteriza a ruptura. O número de ciclos no pico do ângulo de fase é o valor de  $N_f$ .

Os valores de integridade do material ( $C$ ) versus acúmulo de dano ( $S$ ) são resultantes da rotina matemática com os dados resultantes do ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial e representam a característica do material quanto ao dano. 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, conforme Daniel & Kim (2002). Isto se observa para todas as misturas desta pesquisa. O gráfico da Figura 4(a) mostra o exemplo para as quatro amostras ensaiadas da mistura com CAP 50/70 da REGAP. Para o conjunto de curvas de cada mistura foi feito um *fitting*, para obter a curva característica da mistura. A equação da *Power Law* (ou curva *fitting* característica do material) deve ser do tipo:  $C = 1 - C_{11} * S^{C_{12}}$ , onde  $C_{11}$  e  $C_{12}$  são as constantes. As constantes  $C_{11}$  e  $C_{12}$  de cada mistura para o modelo de fadiga também estão apresentadas no gráfico da Figura 4(b) e são utilizadas, assim como os outros parâmetros descritos na metodologia, para calcular resultado de  $N_{fN}$  com o modelo proposto por Nascimento (2016). Observa-se que os resultados apresentados foram



obtidos em diferentes amplitudes de carga, indicadas pela amplitude de deformação inicial ( $\epsilon$ ) medida com os LVDTs. A evolução da integridade do material e o dano acumulado em relação ao tempo reduzido (após a aplicação do princípio de superposição tempo-temperatura) são diferentes para os quatro testes.

Com os resultados obtidos no ensaio foi realizada uma rotina de cálculo para obter os parâmetros de fadiga de cada corpo de prova. Os valores  $Y$  e  $\Delta$  são coeficientes da curva  $Gr$  (taxa de variação média de energia de pseudo-deformação liberada por ciclo de ensaio) versus  $N_f$  (Pico do ângulo de Fase). Além de  $Gr$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $N_f$  também foram obtidas as deformações pico a pico, o  $|E^*|_{ve}$  (módulo dinâmico viscoelástico linear obtido no ensaio *finger print*),  $\alpha$  (taxa de evolução do dano), entre outros parâmetros que são resultantes da rotina de cálculo dos resultados de módulo *finger print* e fadiga. A versatilidade do modelo S-VECD permite o uso desses parâmetros para obter a curva característica de dano e também critérios de falha para estimar o comportamento de fadiga do material testado em várias condições de carregamento.



**Figura 4:** (a) Curvas de integridade do material ( $C$ ) versus acúmulo de dano ( $S$ ) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da REGAP (b) Curvas *fitting* das 5 misturas de integridade do material ( $C$ ) versus acúmulo de dano ( $S$ )

Os parâmetros  $C11$ ,  $C12$  (retirados do *fitting* das curvas  $C \times S$ ),  $Y$ ,  $\Delta$  (índices da curva  $Gr$  versus  $N_f$ ),  $\alpha$  e  $|E^*|_{ve}$  que foram utilizados para calcular o  $N_{fN}$  (pela Equação 1) de cada mistura estão na Tabela 4. O valor de  $\beta$  utilizado foi 0,8.

**Tabela 4:** Parâmetros  $C11$ ,  $C12$ ,  $Y$ ,  $\Delta$ ,  $\alpha$  e  $|E^*|_{ve}$  utilizados para calcular  $N_{fN}$  pela equação de Nascimento (2016)

Mistura	Fitting curvas $C \times S$		Índices curvas $Gr \times N_f$		$\alpha$	$ E^* _{ve}$ (kPa)
	$C11$	$C12$	$Y$	$\Delta$		
CAP 50/70 LUBNOR	0,0003555	0,654188	30000000	-1,449	3,075648	9862292
CAP 50/70 REFAP	0,0004812	0,615662	60000000	-1,462	3,277240	9906669
CAP 50/70 REGAP	0,0002884	0,674222	2000000	-1,178	3,032501	10654435
CAP 50/70 REPAR	0,0002792	0,674067	80000000	-1,550	3,046101	9179502
CAP 50/70 REVAP	0,0002679	0,676291	10000000	-1,350	3,169320	9236525

Após a aplicação das equações de Nascimento (2016), têm-se os valores de  $N_{fN}$  calculados para cada mistura. Os  $N_{fN}$  calculados constam na Tabela 5. As linhas pontilhadas do gráfico da Figura 3 representam o modelo proposto pelo autor, que pela aplicação dos parâmetros de ensaio na Equação 1 prevê o  $N_{fN}$  para cada deformação de ensaio.

Utilizando as equações potenciais das curvas de Wöhler das misturas desta pesquisa foi possível calcular o  $Nf_w$  para um tráfego simulado no AEMC conforme descrito na metodologia. Para os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento obtidos nas simulações de pavimento proposto com cada mistura (AEMC), foram aplicadas as equações das curvas de Wöhler e encontrados os  $Nf_w$  da Tabela 5.

Conforme a análise pelo ranking das curvas de Wöhler aplicadas ao pavimento simulado, a mistura que se evidencia quanto sua resistência ao dano por fadiga é mistura com CAP 50/70 da REFAP. As misturas com o pior comportamento de fadiga são as de CAP 50/70 da LUBNOR e da REPAR. A mistura com CAP 50/70 da REFAP tem valor de  $Nf_w$  33% maior que a segunda mistura do ranking, a com CAP 50/70 da REGAP. As misturas com CAP 50/70 da LUBNOR e da REPAR são as com menores valores, em torno de 50% do valor encontrado para a mistura com CAP 50/70 da REFAP. Com isto, pode-se perceber que existem três patamares de misturas quanto à resistência ao dano por fadiga: No primeiro, encontra-se a mistura com CAP 50/70 da REFAP, no segundo a mistura com CAP 50/70 da REGAP e REVAP, no terceiro as misturas com CAP 50/70 da LUBNOR e REPAR. Destaca-se que para definir o  $Nf$  de campo é necessário que exista um fator de calibração campo-laboratório que correlacione os resultados obtidos de  $Nf_w$  com o efetivo desempenho da mistura em campo.

Utilizando a Equação 1 proposta por Nascimento (2016) foi possível calcular o  $Nf_N$  para um tráfego simulado no AEMC conforme descrito na metodologia. Para os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento obtidos nas simulações de pavimento proposto com cada mistura, foram aplicadas as equações e encontrados os  $Nf_N$  da Tabela 5, possibilitando fazer outro ranking das misturas onde percebe-se novamente a proeminência do valor para a mistura de CAP 50/70 da REFAP. Ainda se verifica que o ranking muda pouco quando comparado ao ranking encontrado pelas curvas de Wöhler.

**Tabela 5:** Resultados de  $Nf$  utilizando as equações das curvas geradas pelos pontos de  $Nf$  calculados por Nascimento (2016) para simulações de pavimentos de cada mistura

Mistura	$\sigma_t$ AEMC ( $\mu S$ )	$Nf_w$	Porcentagem em relação ao primeiro do ranking (Wöhler)	$Nf_N$ (calculado pela Equação 1)	Porcentagem em relação ao primeiro do ranking (Equação 1)
CAP 50/70 LUBNOR	253	20171	46%	4272	34%
CAP 50/70 REFAP	238	43726	100%	12723	100%
CAP 50/70 REGAP	241	29259	67%	1746	14%
CAP 50/70 REPAR	267	21445	49%	6394	50%
CAP 50/70 REVAP	241	27602	63%	6301	50%

Os valores absolutos de  $Nf$  calculados pela equação de Nascimento (2016) são diferentes dos valores encontrados pelas equações das curvas de Wöhler, no entanto a inclinação das curvas e o ranking das misturas simuladas se mantêm parecidos onde a mistura com o melhor comportamento frente ao dano por fadiga é a com CAP 50/70 da REFAP. As misturas LUBNOR, REPAR e REVAP tiveram os menores valores nos dois rankings e têm valores próximos, o que as deixa no mesmo patamar de resistência ao dano por fadiga.

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo da influência dos ligantes asfálticos nas misturas asfálticas é recorrente em pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo. A presente pesquisa pretende colaborar para o avanço do

conhecimento das misturas e suas características atribuídas por CAPs produzidos em refinarias brasileiras. Além disto, o trabalho visa contribuir com dados e avaliações sob o ponto de vista do comportamento das misturas asfálticas frente aos danos por fadiga.

Realizar o ensaio de fadiga tração-compressão pelo método S-VECD é uma inovação no país e os resultados obtidos nesta pesquisa serão alvo de avaliações criteriosas. Além da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler, o S-VECD foi utilizado como premissa de análise dos resultados de fadiga tração-compressão, onde as misturas com CAPs 50/70 se dispõem em três patamares de resistência, sendo a com CAP 50/70 da REFAP a mais resistente ao dano por fadiga.

Com relação às conclusões práticas, é possível afirmar que considerando os resultados de ensaios laboratoriais de dano realizados nesta pesquisa, o CAP 50/70 da REFAP (o mais utilizado no Rio Grande do Sul) não é inferior aos outros CAPs brasileiros com relação ao trincamento por fadiga.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem as seguintes instituições, que financiaram ou auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa: Petrobras, Laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), CAPES, CNPq e Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. AASHTO MP-2-01 (2001) *Standard Specifications for Superpave volumetric mix design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO TP 107-14 (2016). *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.
- BABADOPULOS, L. F. A. L. (2014) *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.
- BOEIRA, F. D. (2018) *Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- DI BENEDETTO, H., GABET, T., GRENFELL, J., PERRATON, D., SAUZÉAT, C., & BODIN, D. (2003) *Mechanical testing of bituminous mixtures*. In M. N. Partl, H. U. Bahia, F. Canestrari, C. de la Roche, H. Di Benedetto, H. Piber, & D. Sybilski (Eds.), *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB Series* (pp. 143-256). Dordrecht: Springer.
- DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. (2004) *Fatigue of Bituminous Mixtures*. *Materials and Structures*, v. 37, p. 202-216.
- DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. (2004) *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).
- KIM, Y. R. (2009) *Modeling of asphalt concrete*. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1ª Ed.
- KIM, Richard; Wen & Y Haifang. (2002). *Fracture Energy from Indirect Tension Testing*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71. 779-793.
- KIM, Y.-R., Little, D. N., & Song, I. (2003). *Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanistic evaluation*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832, 1-8. DOI: 10.3141/1832-01.
- MANGIAFICO, S. (2014) *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.

- NASCIMENTO, L. A. H. (2015) *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.
- NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N., NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R., CHACUR, M., MARTINS, A. T. (2014) *Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras*. 21º Encontro de Asfalto do IBP.
- NASCIMENTO, L. A.. (2016) *Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga*. Curso. Universidade Federal de Santa Maria.
- POSSEBON, P. É. (2018) *Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil*. Dissertação de Mestrado. UFSM – Santa Maria.
- RIBAS, J. (2014) *Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício*. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria.
- SANTOS, T. A. (2016) *Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no Estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SHRP-A-410. (1994) *Strategic Highway Research Program. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research Program*. Washington, DC.
- UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. (2009). *Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete*. In: 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos.
- UNDERWOOD, B., Baek, C., and Kim, Y., (2012). *Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2296, 36–45. doi:10.3141/2296-04.

---

Évelyn Paniz Possebon (evelyn.paniz@gmail.com)

Silvio Lisboa Schuster (silviolschuster@gmail.com)

Chaveli Brondani (chavelibrondani@hotmail.com)

Luciano Pivoto Specht (luspecht@ufsm.br)

Fernando Dekeper Boeira (fernando.d.boeira@gmail.com)

Deividi da Silva Pereira (dsp@ufsm.br)

Luis Alberto H. do Nascimento (luisnascimento@petrobras.com.br)

Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária, Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - Av. Roraima, 1000 - 7 – Camobi - Santa Maria, RS, Brasil