

Proposta de protocolo de ensaio para análise de regeneração em misturas asfálticas através do modelo S-VECD

Asphalt mixtures self-healing test protocol proposal based on the S-VECD model

Felipe do Canto Pivetta¹, Luis Alberto Herrmann do Nascimento², Lélío Antônio Teixeira Brito³

¹North Carolina State University, Carolina do Norte – Estados Unidos, fdpivett@ncsu.edu

²Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, Rio de Janeiro – Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul – Brasil, leliobrito@gmail.com

Recebido:

22 de abril de 2019

Aceito para publicação:

30 de outubro de 2019

Publicado:

16 de novembro de 2020

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chaves:

Regeneração de mistura asfáltica.

S-VECD.

Fadiga à tração direta,

Modelagem.

Keywords:

Asphalt, damage.

Healing.

Fatigue.

Modeling.

DOI:10.14295/transportes.v28i4.2028



RESUMO

Os fenômenos associados aos efeitos de fadiga e regeneração viscoelástica de materiais asfálticos têm sua importância já reconhecida em diversos trabalhos. O presente estudo aplica o modelo S-VECD para o ensaio de fadiga à tração direta em deformação controlada de misturas asfálticas, com a inserção de períodos de repouso com o objetivo de analisar a capacidade de regeneração do material. A partir dos dados obtidos em diferentes períodos de repouso, temperaturas de ensaio e níveis de integridade do material, apresenta-se uma variável de estado de regeneração (H) capaz de modelar estas condições em um parâmetro único. A inserção desta variável de estado em um modelo que quantifica a regeneração do material ($\%H_s$) no espaço da sua curva característica de dano – C versus S – fornece uma ferramenta que prevê com precisão o índice de regeneração da mistura avaliada.

ABSTRACT

The phenomena associated with fatigue and healing of asphalt materials have their importance already recognized in several works. The present study applies the S-VECD model for direct tensile fatigue test in controlled strain mode for asphalt mixtures, with the insertion of rest periods, aiming at evaluating material's self-healing (integrity recovery). From different rest periods, test temperature and material pseudo-stiffness levels, an internal state variable of healing (H) capable of modeling these conditions into a single parameter is proposed. The insertion of this internal state variable in a model that quantifies the material healing ($\%H_s$) in the characteristic damage curve space of the material - C versus S - provides a tool that accurately predicts the healing index of the evaluated mixture.

1. INTRODUÇÃO

O uso de concreto asfáltico como camada de revestimento em pavimentos rodoviários constitui uma das técnicas mais utilizadas no Brasil e no mundo, de forma que uma correta compreensão das respostas deste material quanto às solicitações de tráfego, constitui uma importante ferramenta na capacidade de otimização do seu uso. Dentre as principais causas de deterioração em pavimentos, destacam-se o fenômeno de deformação permanente e, no escopo deste trabalho, o trincamento por fadiga.

A fadiga em revestimentos asfálticos consiste no desenvolvimento de trincas de pequenas dimensões, ou micro-trincas, que se iniciam quando a estrutura se encontra sob carregamento e estendem-se por toda a vida útil deste pavimento enquanto houver solicitações. Conforme o carregamento é continuado, a quantidade de trincas aumenta de forma que, eventualmente, estas micro-trincas venham a coalescer em trincas de maiores dimensões, causando, em situações mais evoluídas, a falha estrutural e/ou funcional do material. Em camadas de revestimento asfáltico, este tipo de falha ou defeito é conhecido como “Couro de Jacaré” (Bernucci *et al.* 2008).

Alguns materiais, como polímeros e ligantes asfálticos, quando micro-trincados, apresentam uma resposta denominada regeneração ou, do inglês, *healing*, que pode ser considerada como o fenômeno inverso ao trincamento (Kim *et al.* 1997). A regeneração consiste em uma resposta intrínseca de fechamento de trincas de pequenas dimensões quando o material é submetido a períodos de carregamento nulo, denominados períodos de repouso. Este fenômeno se manifesta na forma de tendência a recuperar as propriedades que o material possuía quando em sua condição não danificada, sendo que em determinadas condições é suficientemente significativo para restaurar o material até seu estado inicial.

Uma das técnicas com crescente importância no cenário de análise do comportamento à fadiga de materiais viscoelásticos é o modelo Viscoelástico com Dano Contínuo Simplificado (“*Simplified-Viscoelastic Continuum Damage*” – S-VECD) apresentado por Underwood *et al.* (2010), baseado no modelo Viscoelástico com Dano Contínuo (“*Viscoelastic Continuum Damage*” – VECD) proposto por Kim e Little (1990). Esta técnica vem sendo cada vez mais utilizada nas últimas décadas e seus resultados têm provado sua eficiência e robustez (Ashouri, 2014; Kim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 1997; Mocelin, 2018; Nascimento, 2015; Palvadi *et al.*, 2012).

No Brasil, o modelo VECD vem sendo utilizado por instituições de pesquisa desde 2013 e avança dado sua robustez na descrição teórico-prática do comportamento intrínseco do material. Além do seu uso na caracterização de misturas asfálticas, o modelo foi implantado em *framework* computacional para a análise do dano em pavimentos, o qual encontra-se já validado e calibrado para as condições brasileiras (Nascimento, 2015).

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer um protocolo de ensaio uniaxial de tração direta para a caracterização do dano e da regeneração de misturas asfálticas, na expectativa de prever adequadamente o seu comportamento quando submetidas a carregamentos cíclicos sucedidos por períodos de repouso, em diferentes temperaturas, com uso do modelo S-VECD.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A regeneração de materiais viscoelásticos está intimamente vinculada a características como histórico de tensões, composição química, temperatura e estado de integridade do material. Durante situações de carregamento nestes materiais, períodos de solicitação nula (ou, simplesmente, períodos de repouso) servem como hiatos para rearranjo estrutural de forma a regenerar parte de sua capacidade de resistir à solicitações.

Diversos autores estudaram o efeito da inserção de períodos de repouso em meio a solicitações de ensaios tradicionais da análise de fadiga (Castro e Sánchez, 2006; Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003; Shen *et al.*, 2010; Palvadi *et al.*, 2012; Qiu *et al.*, 2012; Ashouri, 2014), como nos ensaios de flexão a três pontos (Castro e Sánchez, 2006), flexão a quatro pontos, no ensaio cíclico de cisalhamento por torsão (Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003; Shen *et al.*, 2010; Palvadi *et al.*, 2012) e no ensaio de tração direta (Qiu *et al.*, 2012; Ashouri, 2014). Embora estes autores

tenham, com êxito, identificado e descrito a capacidade de regeneração através de parâmetros como módulo dinâmico, energia dissipada e pseudo-rigidez (Kim *et al.*, 2002), este é um fenômeno de previsão complexa por envolver diversos fatores que atuam em conjunto modificando-o.

2.1. Regeneração em misturas asfálticas

Autores como Ayar *et al.* (2016) mencionam que o fenômeno de regeneração está puramente relacionado ao efeito de fechamento de trincas de pequenas dimensões, operando de forma a se contrapor ao dano. Este processo de fechamento de trincas é descrito através de cinco etapas distintas (Wool, 2008) – Rearranjo Superficial, Aproximação Superficial, Umedecimento, Difusão e Aleatorização. O processo de regeneração inicia ativamente na etapa de umedecimento que, embora tenha resultados pouco significativos no ganho de rigidez (Wool, 2008), é responsável pela velocidade com que irá ocorrer o entrelaçamento de fibras do material na etapa de difusão, na qual o ganho de rigidez é muito mais significativo. Estas etapas são ilustradas na Figura 1.

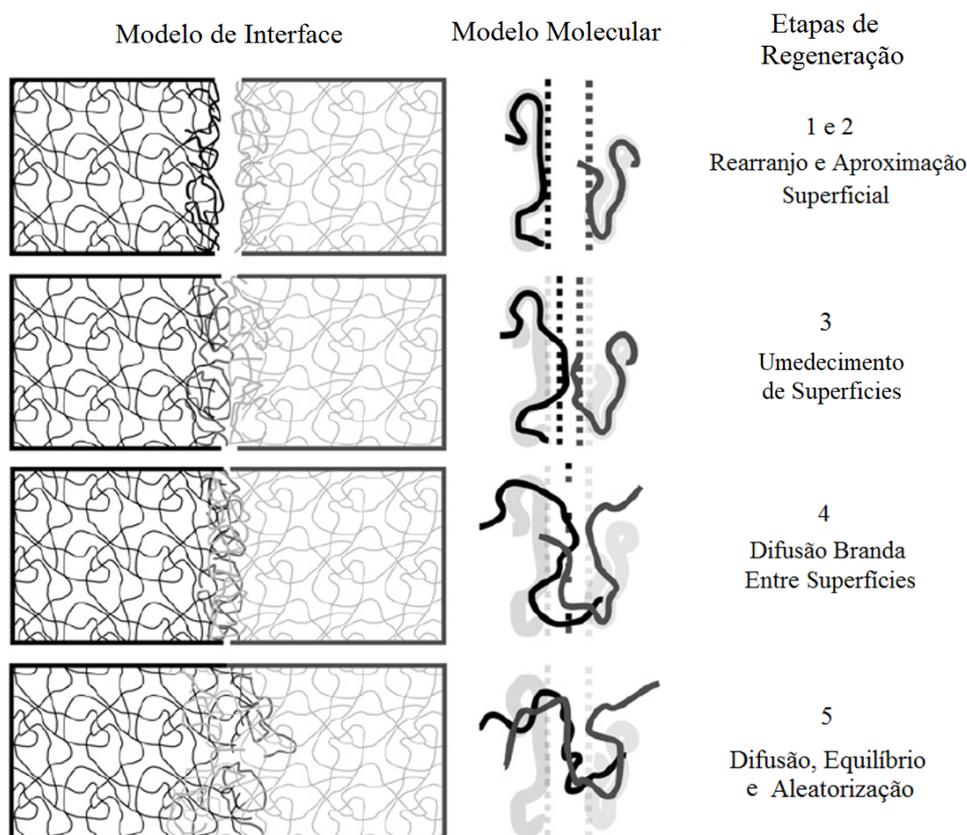


Figura 1. Etapas do processo de fechamento de trincas. (Qiu 2012, pg. 37)

Babadopolus (2017) investigou o efeito de fenômenos como tixotropia, viscoelasticidade não-linear e dissipação de energia por aquecimento, que alteram a rigidez do material de maneira reversível. Estes fenômenos não contribuem efetivamente para um prolongamento na vida de fadiga de misturas asfálticas, diferentemente da variação de módulo causada pelo fechamento de trincas. A Figura 2 apresenta esquematicamente a evolução destes efeitos que geram variações na rigidez do material durante períodos de carregamento e repouso.

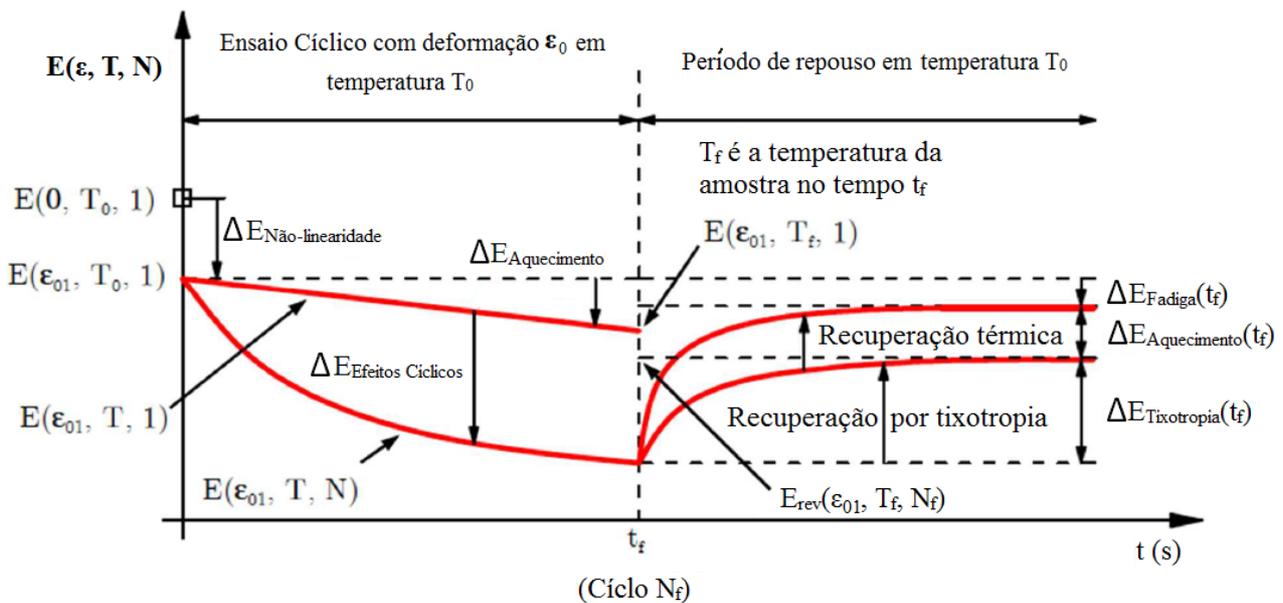


Figura 2. Representação dos efeitos de natureza dissipativa no módulo de misturas asfálticas. (Nguyen 2011, pg. 147)

Contudo, o presente trabalho assume que o efeito regenerativo estudado engloba os fenômenos que recuperam a rigidez do material alterada durante o carregamento cíclico, independentemente da origem desta variação – tixotropia, não-linearidade, aquecimento e dano. Esta abordagem é comum a outros trabalhos que realizaram estudos similares no espaço de C vs. S (Kim *et al*, 1997; Palvadi *et al.*, 2012; Ashouri, 2014).

2.2. Modelo VECD

Lee e Kim (1998) aplicam os princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis e da correspondência elástico-viscoelástico de Schapery para descrever o comportamento de misturas asfálticas em carregamentos cíclicos axiais, considerando a evolução de dano. Este estudo utiliza os princípios do modelo Viscoelástico de Dano Contínuo (VECD), que objetiva uma descrição macroscópica do comportamento do material ignorando alterações comportamentais em nível microscópico (Underwood *et al.*, 2010).

Uma revisão aprofundada da teoria e metodologia por trás da obtenção da curva característica de dano vai além do escopo deste trabalho, aconselhando-se um estudo dos trabalhos de Schapery (1984), Kim e Little (1990), Kim (1998), Daniel e Kim (2002), Chehab *et al.* (2003), Kim (2009), Morteza (2014), Nascimento (2015) e Mocelin (2018) para uma compreensão mais aprofundada sobre o tema. Entretanto, a formulação básica do modelo dado a partir do princípio da correspondência elástico-viscoelástico (Schapery, 1984), da Teoria do Trabalho Potencial (Schapery, 1990) e do princípio da Superposição tempo-temperatura (Chehab *et al.*, 2002), é apresentada na Tabela 1, onde as variáveis correspondem a: W^R , pseudo-energia dissipada; ϵ^R , pseudo-deformação; S , variável de estado interno de dano; σ , tensão; α , taxa de evolução do dano; E_R , módulo de referência (normalmente adotado como unitário); $E(t)$, módulo de relaxação viscoelástico linear; t , tempo físico; ϵ , deformação medida; ξ , tempo reduzido; e a_t , shift-factor para as condições de ensaio.

Tabela 1 – Equacionamento fundamental do modelo VECD

Origem	Equacionamento	Título
Teoria do trabalho Potencial	$W^R = f(\varepsilon^R, S)$	Função Energia de Pseudo-Deformação
	$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R}$	Relação Tensão – Pseudo-Deformação
	$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} \right)^\alpha$	Lei da Evolução do Dano
Correspondência Elástico-Viscoelástico	$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau$	Pseudo Deformação
Superposição Tempo-Temperatura	$\xi = \frac{t}{a_t}$	Tempo Reduzido

O VECD realiza a descrição do comportamento do material através da curva característica de dano, que define a integridade (*C*) em função da variável de estado interno de dano acumulado (*S*). Estes parâmetros são calculados a partir das Equações 1, 2 e 3.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \tag{1}$$

em que *C*: integridade [MPa];
 σ: tensão [MPa];
 ε^R: Pseudo-deformação.

$$\Delta S_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 \Delta C_i \right)^{1+\alpha} (\Delta \xi)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} \tag{2}$$

em que Δ*S*_{*i*}: *i*-ésimo incremento de dano.

$$\alpha = \frac{1}{m} + 1 \tag{3}$$

em que *m*: máxima inclinação do módulo de relaxação (E(t) vs t) na escala log-log.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Experimentos

Neste estudo, utilizou-se uma adaptação do ensaio de fadiga uniaxial à tração direta descrito por Nascimento (2015), com inserção de períodos de repouso em momentos específicos do carregamento, determinados a partir do atingimento de níveis relativos, pré-estabelecidos, do módulo inicial da mistura.

Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica universal servo-controlada, com carregamento cíclico senoidal de frequência 10 Hz. O carregamento é aplicado no modo deformação controlada “*on-specimen*”, onde a deformação axial é medida a partir de dois extensômetros do tipo “faca” com comprimento de haste de 100 mm, acoplados nas paredes axiais do corpo-de-prova formando, radialmente, um ângulo de 180º entre seus pontos de medição, conforme ilustra a Figura 3.c.

O critério de inserção de períodos de repouso é determinado pelo módulo dinâmico/rigidez, monitorando-se o mesmo em tempo real ao longo do ensaio. Os valores de integridade (*C*) de inserção de períodos de repouso foram de: 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2 e 0,1 para fins de verificação da abrangência do fenômeno em relação a diferentes níveis de dano. O valor inicial de módulo dinâmico, utilizado como referência, é determinado em um ensaio prévio de mesma

temperatura, no qual é aplicado um carregamento cíclico de frequência de 10 Hz, com deformação de 60 microstrains, baixa o suficiente para que não haja dano.

O procedimento experimental compôs um grupo de nove condições de ensaio, variando-se temperatura e período de repouso, conforme a Tabela 2. Os períodos de repouso foram escolhidos de forma que a aplicação da Superposição tempo-Temperatura gerasse um espectro amplo de períodos de repouso reduzidos, com sobreposição de valores nas extremidades.

Tabela 2 – Condições de temperatura e período de repouso

Temperatura (° C)	Período de Repouso (s)	Período de Repouso Reduzido (s)
15	10	1,9
	60	11,4
	270	51,2
20	10	9,9
	30	29,6
	270	266,1
30	10	219,1
	30	657,2
	270	5915,1

Como as análises do presente trabalho são baseadas no modelo de dano contínuo, é importante ressaltar o critério de restrição ao limite superior de temperatura. A validade das análises sobre a curva de dano característica está diretamente relacionada à validade do modelo adotado (S-VECD), que descreve com precisão o comportamento do material, frente ao trincamento, quando a parcela de acúmulo de deformação permanente é pouco representativa. Portanto, a fim de limitar os efeitos viscoplásticos experimentais, os ensaios foram realizados com deformação controlada (*“on-specimen”*) em um limite de 30° C, em que o trincamento é dominante frente à deformação permanente (Kim, 2009).

3.2. Características da Mistura Asfáltica

Os corpos de prova utilizados neste experimento foram de mistura asfáltica densa, com agregados da pedra Sepetiba, de tamanho nominal máximo de 19 mm e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) do tipo 30/45. A dosagem foi realizada segundo metodologia AASHTO M-323, com compactador giratório e número de giros de projeto de 100. As características volumétricas da mistura são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características da mistura asfáltica

Teor de ligante (%)	Volume de Vazios de Projeto* (%)	Volume de Vazios do agregado Mineral (%)	Relação betume vazios (%)	Construction densification index - CDI	G _{mm} no N _{ini} ** (%)
4,5	4,0	12,5	67,9	37	88,6

*Teor de vazios de ensaio = 5,5%

**N_{ini} = 8 giros.

Os corpos de prova têm diâmetro de 100 mm e são moldados com uma altura de 170 mm, dos quais retiram-se por corte 20 mm do topo e da base afim de homogeneizar o volume de vazios nas regiões de extremidade e planificar as faces, deixando-os com 130 mm de altura. Após o corte, os corpos de prova são colados aos pratos de ensaio com o uso de cola epóxi de

alta resistência conforme Figura 3.a. A conexão à prensa hidráulica é realizada através do acoplamento de uma rótula rígida de tração no prato superior e de três parafusos, afastados em ângulos de 120°, no prato inferior.

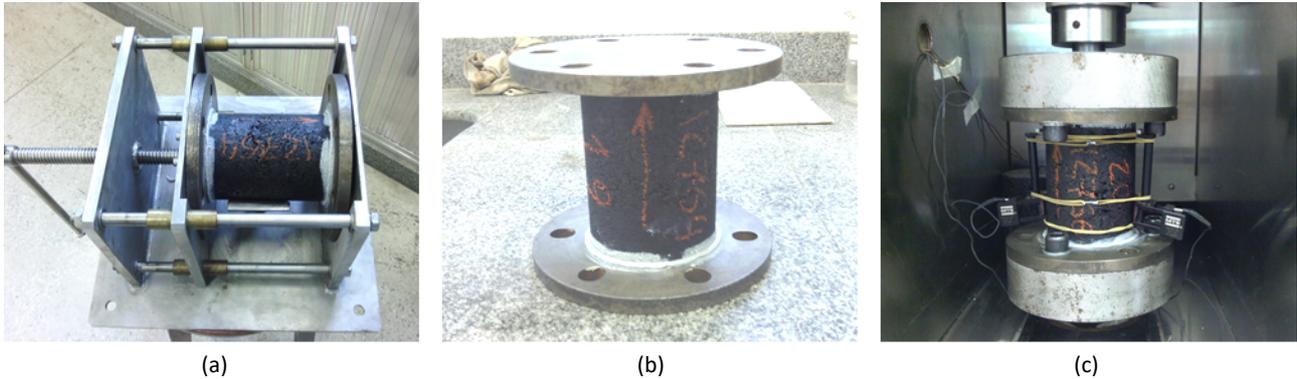


Figura 3. a) Colagem de pratos ao corpo de prova; b) Conjunto pratos e corpo de prova; c) Conjunto acoplado à prensa hidráulica, com extensômetros vinculados ao corpo de prova.

3.3. Determinação da curva característica de dano

Neste estudo, utiliza-se o modelo S-VECD proposto por Underwood *et al.* (2010), que modifica o procedimento analítico até então utilizado na caracterização do modelo VECD, simplificando o processo de caracterização de amostras em carregamento cíclico contínuo.

As adaptações propostas por Underwood *et al.* (2010) assumem que, ao longo de ensaios cíclicos uniaxiais de tração direta, o dano ocorre somente nas solicitações de tração. Dessa forma, insere-se no equacionamento S-VECD o fator de forma (β) que avalia quanto do carregamento aplicado que se encontra sob tração. O parâmetro β é definido pela Equação 4.

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (4)$$

em que β : fator de forma;
 σ_{pico} : valor máximo de tensão no ciclo avaliado [MPa];
 σ_{vale} : valor mínimo de tensão no ciclo avaliado [MPa].

Esta alteração permite a simplificação apresentada na Equação 5,

$$\varepsilon_{ta}^R = \frac{\beta + 1}{2E_R} \left((\varepsilon_{pp}) \left| E^* \right|_{LVE} \right) \quad (5)$$

em que ε_{ta}^R : amplitude da pseudo-deformação de tensão;
 E_R : módulo de referência [MPa];
 ε_{pp} : magnitude de deformação pico-a-pico;
 $|E^*|_{LVE}$: módulo dinâmico viscoelástico linear [MPa].

Conforme mencionado, o dano ocorre somente em solicitações de tração. Entretanto, este dano acontece apenas durante uma fração destes ciclos. Para lidar com esta condição, insere-se o fator K_1 , determinado a partir da Equação 6.

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (q(\xi))^{2\alpha} d\xi \quad (6)$$

em que K_1 : fator de ajuste;
 $q(t)$: histórico de carregamento.

$$\xi_i = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \tag{7}$$

em que ξ_i : tempo reduzido de início do dano no ciclo [s];
 f : frequência de oscilação do carregamento [Hz].

$$\xi_f = \frac{1}{f} - \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \tag{8}$$

em que ξ_f : tempo reduzido de parada do dano no ciclo [s].

Estas simplificações são aplicadas quando o comportamento do material entra em regime permanente. Sendo assim, para o primeiro ciclo de carregamento calcula-se a pseudo-deformação através da integral de convolução apresentada na Tabela 1. Para os ciclos subsequentes, pode-se utilizar a Equação 5, de maneira que a evolução de dano passa a ser determinada através da Equação 9.

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\epsilon_{ta}^R)_i^2 \Delta C_i^* \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi_p)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} (K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \tag{9}$$

em que C^* : integridade de carregamento cíclico;
 ξ_p : intervalo de tempo reduzido do pulso de carga [s].

Como o procedimento de ensaio envolve períodos que interrompem os efeitos que definem um estado de regime permanente, a caracterização da curva de dano para cada etapa pós-reposo assume que o primeiro ciclo tem comportamento transitório com grande acúmulo de dano (Underwood *et al.*, 2010). Desta forma, o cálculo das pseudo-deformações é realizado pela integral de convolução no ciclo inicial e então, assumindo um novo estado de regime permanente, aplicam-se as simplificações comentadas anteriormente para os ciclos subsequentes, até que se inicie o próximo período de reposo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Curva característica de dano com períodos de reposo

A modificação do protocolo de análise de fadiga em tração direta para inserção de períodos de reposo gera descontinuidade no comportamento do módulo dinâmico e do ângulo de fase, como mostra a Figura 4 para o caso do ensaio realizado a 30° C com 10 s de período de reposo.

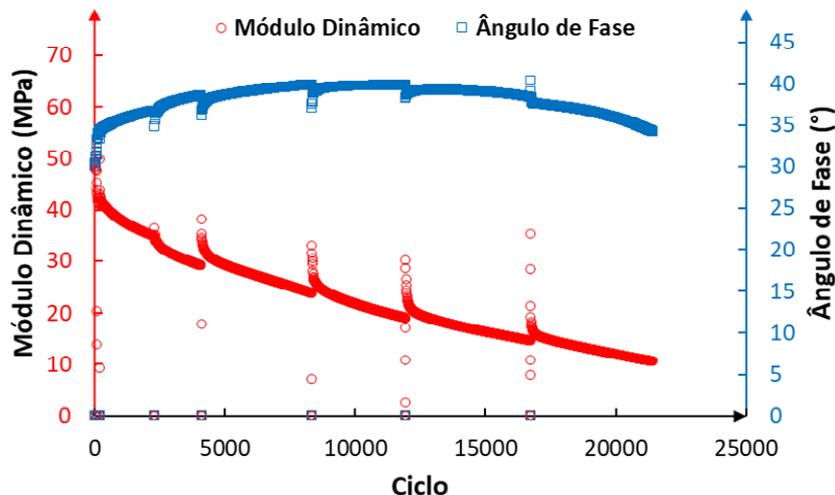


Figura 4. Exemplo de dados coletados de módulo dinâmico e ângulo de fase para um ensaio de fadiga em tração direta com períodos de reposo

Esta transformação dos dados de tensão e deformação em curva característica de dano (C vs. S), com a inclusão dos períodos de repouso, através da metodologia descrita na sessão anterior, gera, por sua vez, curvas também descontínuas com formatos similares ao apresentado na Figura 5. A Figura 5 apresenta os resultados para o ensaio realizado nas condições de 30° C com 270 segundos de período de repouso, situação em que a capacidade de regeneração da mistura, teoricamente, apresenta os melhores resultados dentre as condições avaliadas, indicando-se o número de ciclos (N) para cada par de pontos de repouso e de retorno à integridade de repouso.

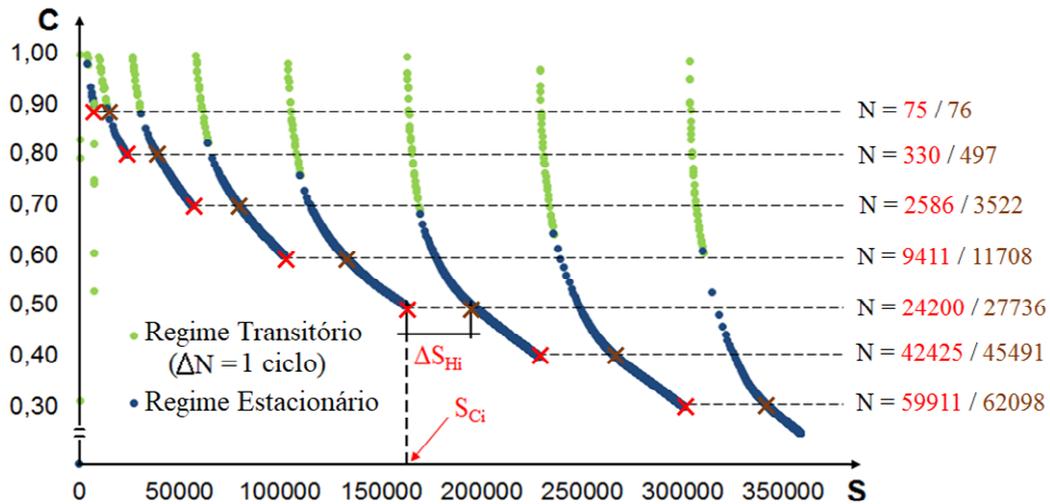


Figura 1. Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 s, na temperatura de 30° C

Destaca-se, nesta etapa, o ganho de integridade imediatamente após o repouso, ilustrando as consequências dos períodos de repouso no espaço C vs. S . Embora a integridade seja recuperada a valores bastante elevados, a alta inclinação do conjunto de pontos correspondentes ao primeiro ciclo indicam um comportamento transitório bastante instável, dissipando rapidamente estas elevadas variações de C . Os altos valores de integridade calculados no período transitório, ilustrados na Figura 5, não influenciam nos resultados de índice de healing ($\%H_s$ - Equação 10), uma vez que este é calculado a partir de variações no espaço de dano (S).

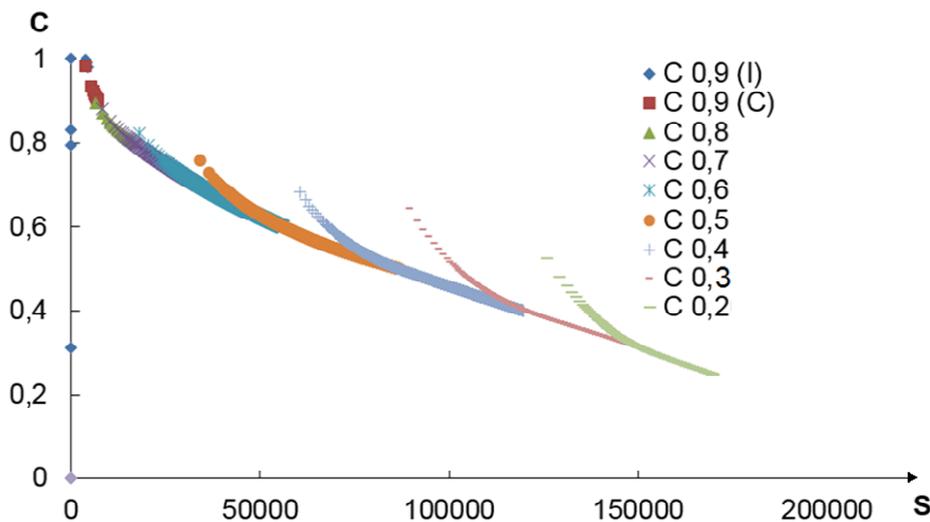


Figura 6. Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 s, na temperatura de 30° C

Observa-se que os valores de ΔS_{Hi} são progressivamente maiores, conforme S_{Ci} aumenta. Uma vez que o material atinja o valor de integridade prévio ao repouso, a trajetória da integridade em função do dano volta a seguir o comportamento da curva C vs. S sem períodos de repouso, modificada apenas por um deslocamento ΔS_{Hi} no eixo S . Este efeito pode ser observado na Figura 6, que apresenta a correção dos espaçamentos em S da Figura 5.

4.2. Capacidade de regeneração

A inserção dos períodos de repouso pode ter seu efeito avaliado através do número de ciclos até ruptura (N_f). A Figura 7 apresenta resultados da vida de fadiga para ensaios com períodos de repouso de um conjunto de 9 corpos de prova, necessários para o protocolo então apresentado. Observa-se a influência deste efeito que, dependendo das condições de temperatura e período de repouso, pode promover um significativo prolongamento na vida de fadiga (25% para 30° C e 270 s). Os valores de N_f apresentados para a condição sem períodos de repouso são obtidos a partir do deslocamento da curva C vs. N de cada corpo de prova. Este procedimento encontra-se descrito em detalhe no trabalho de Underwood et al. (2012), que apresenta um método para a conversão de ΔS em ΔN .

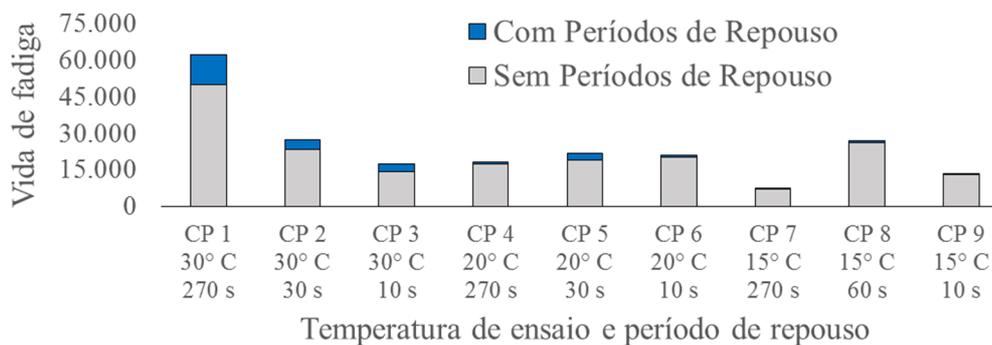


Figura 7. Resultados dos ensaios cíclicos: prolongamento na vida de fadiga com e sem períodos de repouso para as condições do protocolo apresentado

Ashouri (2014) apresenta possíveis índices para medir a capacidade de regeneração no espaço C vs. S , um dos quais, adequado para este estudo é dado pela Equação 10:

$$\%H_s = \frac{\Delta S_{Hi}}{S_{Ci}} \times 100 \tag{10}$$

- em que $\%H_s$: índice de regeneração;
- ΔS_{Hi} : variação de dano entre pontos de mesma integridade;
- S_{Ci} : dano na integridade de repouso;

Estes índices, calculados para a curva apresentada na Figura 5 são dados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de índice de regeneração para 30° C e 270 s de repouso

C	S_{Ci}	S_{Cf}	ΔS	$\%H_s$
0,90	7206	13938	6731	93,4
0,80	23362	38585	15222	65,2
0,70	55583	79056	23473	42,2
0,60	101680	131374	29693	29,2
0,50	161947	195179	33232	20,5
0,40	228118	266311	38192	16,7
0,30	300170	342322	42151	14,0

A Figura 8.a apresenta o comportamento do índice de regeneração em função da integridade para as temperaturas avaliadas, no período de repouso em que os efeitos são mais significativos – 270 s. A aproximação exponencial ilustrada apresenta uma boa correlação com a tendência dos pontos experimentais. De interesse em uma curva unívoca e contínua representativa do índice de regeneração, deslocam-se as integridades das temperaturas de 30° e 15° C em torno da temperatura de 20° C (tomada como referência). Esta relação é apresentada na Figura 8.b, com coeficientes multiplicadores de C de 1,42 e 0,85 para 30° e 15° C, respectivamente, resultando na alta correlação observada.

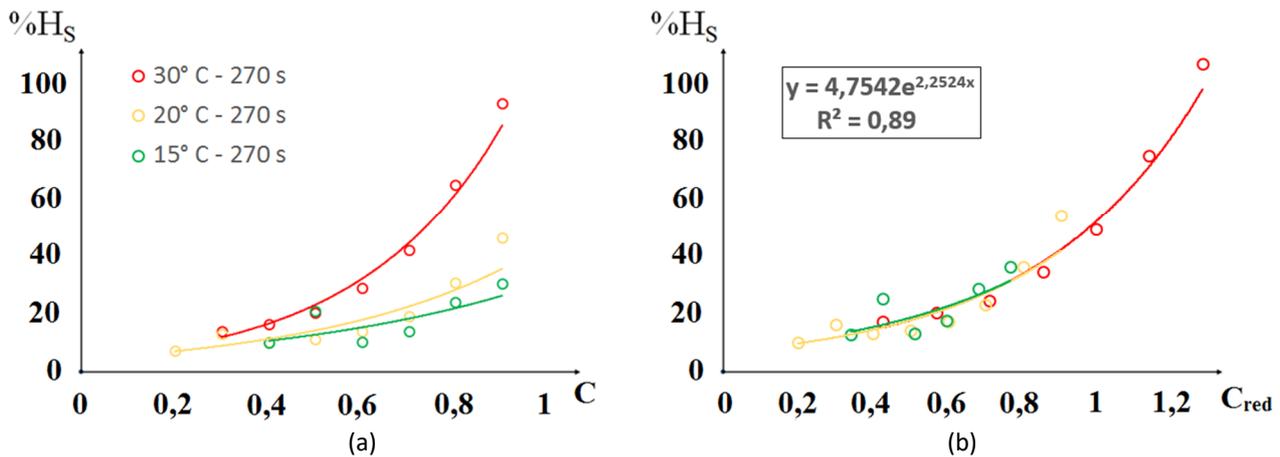


Figura 8. a) Potencial de healing em função da integridade; b) Curva mestra unívoca de %H_s

Na expectativa de descrever os fatores de deslocamento aplicados no processo de construção da curva mestra de %H_s em função do período de repouso reduzido, modela-se uma função de formato exponencial que relaciona o fator de deslocamento de integridade com período de repouso reduzido daquela condição. Esta relação é expressa na Figura 9, que permite a previsão do fator de deslocamento de integridade e, conseqüentemente a variável de estado %H_s para qualquer condição de repouso e temperatura a partir dos *shift-factors* obtidos no módulo dinâmico. Esta abordagem, embora baseada no bem estabelecido princípio da superposição tempo-temperatura, não possui validação além das boas correlações apresentadas que a sugerem.

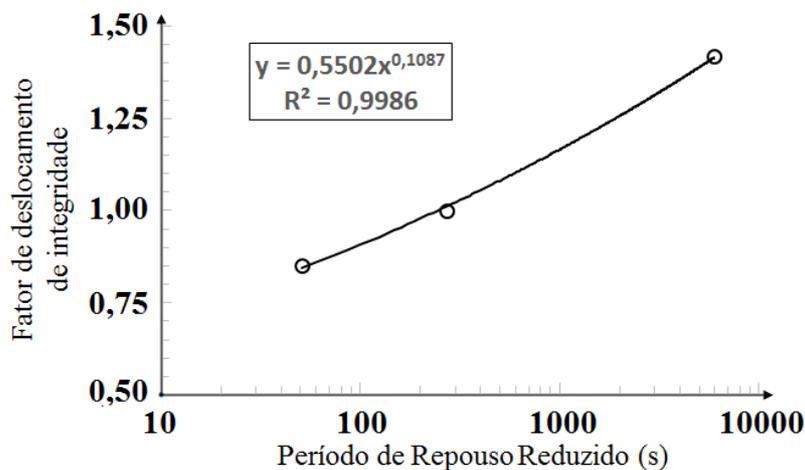


Figura 9. Fator de deslocamento período de repouso reduzido em 20° C

4.3. Modelo de previsão de *healing* proposto

A partir das operações apresentadas anteriormente, propõe-se uma variável de estado de regeneração (H), relacionando a temperatura, o período de repouso e a integridade em um parâmetro único, permitindo a descrição do comportamento regenerativo de cada mistura asfáltica. Esta variável de estado é apresentada na Equação 11.

$$H = a \left(\frac{PR}{a_T} \right)^b C \quad (11)$$

em que H : variável de estado de *healing*;
 C : Integridade do material para o estado de Healing;
 a, b : constantes de calibração do modelo;
 PR : período de repouso [s].

Esta variável de estado, H , é introduzida em um modelo de aproximação de formato exponencial, dado pela Equação 12, que prevê o índice de regeneração para as condições de interesse.

$$\%H_s = \alpha e^{\beta H} \quad (12)$$

em que α, β : constantes de calibração do modelo.

Neste ponto, remarca-se que o modelo prevê maiores tendências de recuperação de módulo para situações de maior integridade, dada a proporcionalidade entre H e C . A partir dessa observação, espera-se que ao longo da vida de fadiga de uma determinada amostra o fenômeno torne-se gradativamente menos significativo, majoritariamente em valores intermediários dentro de sua capacidade total.

Aplicando-se o modelo ora proposto à mistura avaliada neste trabalho, pode-se verificar o potencial de previsão do protocolo, comparando os resultados teóricos ao modelo calibrado. A calibração dos parâmetros de modelagem foi realizada através da minimização do erro quadrático. O resultado desta modelagem é apresentado na Figura 10.

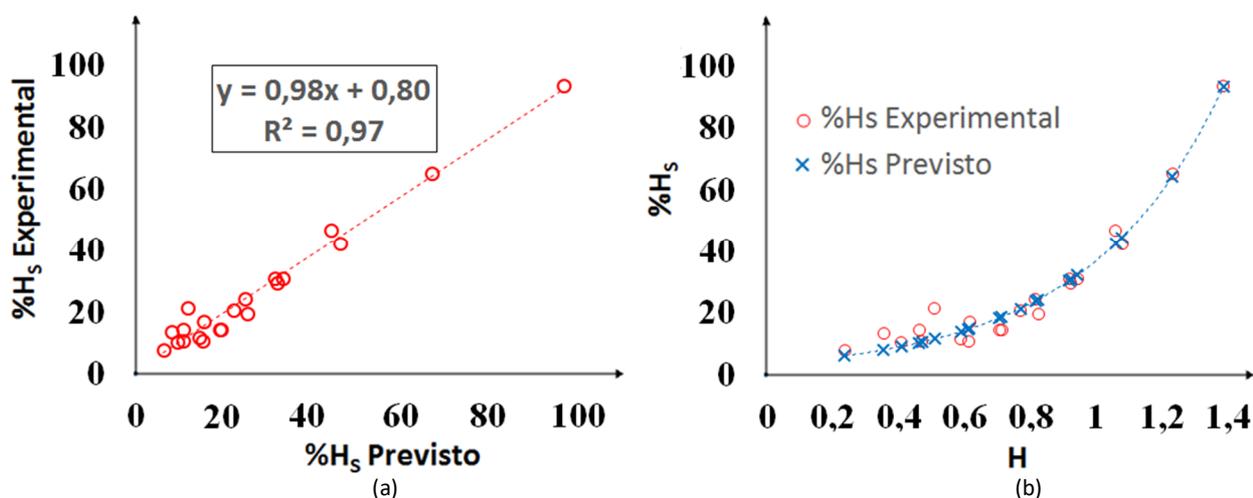


Figura 10. a) Comparação entre índice de regeneração previsto e experimental; b) Índices de regeneração experimental e previsto em função da variável de estado H

5. CONCLUSÕES

A abordagem do efeito de regeneração utilizada neste trabalho, através do modelo S-VECD, propôs uma metodologia adaptada ao ensaio de fadiga à tração direta, simplificando a morosa tarefa de inclusão de períodos de repouso para a caracterização de *healing*. A partir dos resultados obtidos e das operações realizadas, destacam-se as seguintes observações:

- A utilização da metodologia proposta se mostra adequada em termos de utilização de tempo, visto que para cada par período-de-reposo/temperatura ensaiado, são inseridos no máximo nove intervalos durante o ensaio, gerando uma pequena extensão de duração do experimento quando comparada com metodologias que trabalham com períodos de repouso intermitentes a cada ciclo de carregamento;
- As modelagens realizadas apresentam altos valores de coeficientes de determinação com os efeitos avaliados, indicando aproximações matemáticas adequadas e tendências confiáveis para análises intermediárias aos pontos experimentais (interpolações). Tais observações indicam, também, uma baixa variabilidade dos resultados de *healing* entre as amostras. Contudo, extrapolações usando o modelo ora apresentado devem ser feitas com cuidado, pois este é baseado em funções matemáticas clássicas e sem validação física das mesmas;
- A variável de estado de *healing* (H), ora apresentada, se mostrou compatível com a análise desenvolvida, traduzindo os efeitos de temperatura, período de repouso e nível de dano em um parâmetro único;
- O modelo proposto e utilizado para modelagem do índice de regeneração ($\%H_s$) descreve de maneira confiável e precisa os dados experimentais, através da variável de estado H , indicando potencial para ser incorporado a previsões que envolvam efeitos regenerativos de misturas asfálticas;
- Mesmo com poucos períodos de repouso aplicados durante o ensaio (poucos, quando compara-se com uma situação realística em que cada ciclo é sucedido por um período de repouso), os efeitos no prolongamento da vida de fadiga foram significativos, particularmente para períodos de repouso reduzido mais elevados. Esta observação sugere que em condições de serviço, em que os períodos de repouso estão presentes em muito maior número, os efeitos serão ainda mais importantes;
- As temperaturas de 15º e 20º C conduzem a resultados bastante próximos entre si e até sobrepostos em algumas das análises, sugerindo que estas temperaturas podem ser reestudadas ou redefinidas em uma futura adaptação deste ensaio. Como os pontos foram escolhidos com base na dispersão dos períodos de repouso reduzido, uma redução na redundância destes seria uma possível forma de reduzir o número de amostras necessárias, selecionando as temperaturas e períodos de repouso de forma a construir um espectro amplo e eficiente em termos de períodos de repouso reduzido e número de amostras;
- Observando a Figura 8.b, percebe-se uma maior concentração de pontos na região de menor integridade reduzida. Em base disso e, a fim de melhor caracterizar a capacidade de regeneração na região em que esta é mais significativa, i.e., maiores valores de $\%H_s$, considera-se uma reestruturação do protocolo proposto para obtenção de mais pontos nesta região, sugerindo-se maior número de repousos aplicados em integridades elevadas.

Estes resultados fazem parte de um estudo ainda em desenvolvimento, onde as próximas etapas contam com a incorporação dos efeitos de regeneração em soluções analíticas; redução do número de corpos de prova necessários para descrição do efeito e caracterização do modelo proposto; aplicação dos resultados em misturas com diferentes tipos de ligante, agregado mineral e composição granulométrica; e avaliação do efeito do *healing* em análises de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER) pelo apoio; ao corpo técnico e estrutura do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES - PETROBRAS); ao corpo técnico e estrutura do Laboratório de Pavimentação (LAPAV - UFRGS).

REFERÊNCIAS

- Ashouri, M. (2014) Modeling Microdamage Healing in Asphalt Pavements Using Continuum Damage Theory. Tese de Doutorado, North Carolina State University.
- Ayar, P., Moreno-Navarro, F., e Rubio-Gámez, M. C. (2016) The Healing Capability Of Asphalt Pavements: A State Of The Art Review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 28–40.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.034
- Babadopulos, L. (2017) Phenomena occurring during cyclic loading and fatigue tests on bituminous materials : Identification and quantification. Tese de Doutorado, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Bernucci, L. B., Goretti da Motta, L., Augusto Pereira Ceratti, J., e Barbosa Soares, J. (2008) Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. (1a ed.). Rio de Janeiro.
- Castro, M., e Sánchez, J. A. (2006) Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue Curves. *Journal of Transportation Engineering*, 132(2), 168–174.
DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(168).
- Chehab, G. R., Kim, Y. R., Schapery, R. A., Witczak, M. W., e Bonaquist, R. (2002) Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state. *Asphalt Paving Technology*, 71, 559–593.
- Kim, Y.R. (2009) Modeling of Asphalt Concrete. Mc Graw Hill.
- Kim, Y.R., Little, D. N., e Lytton, R. L. (2003) Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 75–83.
DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(75).
- Kim, Y. R., Daniel, J. S., e Wen, H. (2002) Fatigue Performance Evaluation of Westrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach.
- Kim, Y.R., Lee, H.J. e Little D.N. (1997) Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66, 520–569.
- Kim, Y.R., e Little, D. N. (1990) One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 116(4), 751–772.
- Lee, H.J., e Kim, Y. R. (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(1), 32–40.
- Mocelin, D. M. (2018) Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Através do Modelo de Dano Contínuo Viscoelástico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nascimento, L. A. H. (2015) Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Tese de Doutorado, North Carolina State University.
- Nguyen, Q. T. (2011) Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux sous sollicitations cycliques dans les domaines linéaire et non-linéaire. Tese de Doutorado, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Palvadi, N. S., Bhasin, A., e Little, D. N. (2012) Method to Quantify Healing in Asphalt Composites by Continuum Damage Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296(1), 86–96.
DOI: 10.3141/2296-09
- Qiu, J., van de Ven, M., Wu, S., Yu, J., e Molenaar, A. (2012) Evaluating Self Healing Capability of Bituminous Mastics. *Experimental Mechanics*, 52(8), 1163–1171.
DOI: 10.1007/s11340-011-9573-1
- Schapery, R. A. (1990) A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 38(2), 215–253.
- Schapery, R. A. (1984) Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *International Journal of Fracture*, 25(3), 195–223.
- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H., e Huang, H. (2013) Road Materials and Pavement Design A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 37–41.
DOI: 10.1080/14680629.2006.9690026
- Shen, S., Chiu, H.-M., e Huang, H. (2010) Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), 846–852.

DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000080

Underwood, B. S., Kim, Y. R., e Guddati, M. N. (2010) Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 459-476.

DOI: 10.1080/10298430903398088

Underwood, B. S., Baek, C. e Kim, Y. R. (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

Wool, R. P. (2008) Self-healing materials: a review. *Soft Matter*, 4(3), 400-418.

DOI: 10.1039/b711716g