

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE TRÁFEGO NA PREVISÃO DE ÁREA TRINCADA E DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS NACIONAIS

Anthony Belo Vasconcelos Santos¹

Jorge Barbosa Soares¹

Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos²

Universidade Federal do Ceará

¹: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes / Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste

²: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil

RESUMO

O novo método de dimensionamento mecanístico-empírico (MeDiNa) em desenvolvimento no Brasil exige uso de um sistema de análise estrutural e de predição de defeitos. Apesar de representar um claro avanço, devido ao comportamento de caráter viscoelástico dos materiais asfálticos, suspeita-se da necessidade de incorporação dos efeitos de temperatura e velocidade de tráfego nas análises estruturais. Neste trabalho, estuda-se o efeito dessas duas variáveis na previsão de área trincada em campo utilizando-se o programa CAP3D-D, de dimensionamento, e que permite considerar propriedades viscoelásticas por meio de análises elástica-lineares, calibrado com o mesmo banco de dados utilizado para o MeDiNa. Foi investigado o desempenho previsto de 4 misturas em 16 cenários diferentes. Os resultados confirmaram significativa sensibilidade da previsão de área trincada, com variações de 15 a 30% de %AT ao fim de 120 meses para velocidades de 10 a 120km/h, e de 20 a 60% para temperaturas de 10 a 30°C.

ABSTRACT

The new mechanistic-empirical pavement design method (MeDiNa) under development in Brazil brings an updated system of structural analyzes and cracking predictions. Despite of being an advance with respect to the former method, there may be a need to incorporate the effects of temperature and traffic speed into the structural analyzes, due to the surface course viscoelastic behavior. In this work it is studied the effect of considering temperature-frequency parameters in cracking prediction using the CAP3D-D software, which allows to consider material viscoelastic properties under a linear-elastic analysis, calibrated with the same database of the recently proposed Brazilian method. Four asphalt mixtures were tested in 16 different scenarios. The results point to a significant sensitivity of the predicted cracking results, with variations between 15 and 30% of cracking after 120 months for speeds between 10 and 120km/h, and 20 to 60% of cracking for 10 to 30°C temperature variations.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o recém desenvolvido método de dimensionamento de pavimentos (MeDiNa) adota uma abordagem mecanicista, que incorpora análise estrutural do pavimento e previsão da evolução de defeitos, como o trincamento por fadiga em revestimento asfáltico, para determinação das espessuras ideais de camadas do pavimento (DNIT, 2019).

Tratando-se da previsão da ocorrência do trincamento por fadiga, dados de campo observados em trechos experimentais foram utilizados para calibrar modelos a partir de ensaios de fadiga em laboratório (Nascimento, 2015; Fritzen, 2016; Santiago *et al.*, 2019). A esses modelos que relacionam defeitos em campo a aqueles observados em laboratório atribuem-se o nome de Funções de Transferência (FT). Essas funções são intimamente atreladas não somente ao conjunto de dados utilizados na calibração, mas também a todas as hipóteses simplificadoras e

modelos usados para estudo do comportamento dos materiais e das estruturas. São exemplos de FT a utilizada no MeDiNa (Fritzen, 2016), a utilizada no CAP3D-D (Santiago *et al.*, 2019) e a utilizada no sistema de dimensionamento conhecido como FlexPave (Eslaminia *et al.*, 2012).

As características viscoelásticas do ligante asfáltico trazem uma série de complexidades que poderiam ser incorporadas ao sistema de dimensionamento com vista a uma análise mais realista. É claro, porém, que há necessidade de simplificação do problema envolvendo a degradação do sistema de camadas em pavimentos, de maneira que um meio termo entre a realidade e a praticidade seja definido. Em princípio, tal definição deveria ser pautada menos pelo conforto dos definidores e mais pela objetividade do conhecimento científico disponível e estabelecido não apenas na literatura, mas na prática.

Entre os pontos de complexidade do comportamento dos materiais envolvidos no sistema de camadas, podem-se sublinhar a dependência da velocidade de passagem de veículos e da temperatura (Yoder e Witzack, 1975), efeitos de umidade (Bastos, 2013; Lucas Júnior *et al.*, 2019), auto-cicatrização (Ali Azhar Butt *et al.*, 2012), entre outros. Isso faz do comportamento do material asfáltico algo dependente de variáveis que o projetista pode controlar (como a velocidade de passagem de veículos e a temperatura), incluindo casos em que ainda há necessidade de avanço científico para adequada incorporação de efeitos em sistemas de dimensionamento (como é o caso dos efeitos da umidade e da auto-cicatrização de materiais). Ainda há lacunas do conhecimento quanto a quais são as variáveis de fato necessárias a serem consideradas nas previsões de desempenho dos pavimentos. Há também de se considerar sempre o aumento do esforço computacional e as incertezas acrescidas com a incorporação dos novos parâmetros.

A simplificação de modelos que interpretam o comportamento do material mantendo qualidade na predição de defeitos faz-se, portanto, conveniente, sobretudo reduzindo o esforço computacional e a carga de *inputs* necessários ao sistema. Há casos de fenômenos em que já há literatura estabelecida há bastante tempo sobre modelos de materiais e ensaios a serem aplicados, e que são de grande relevância para a compreensão do comportamento dos pavimentos. É o caso dos efeitos da temperatura e da velocidade de passagem de veículos (Yoder e Witzack, 1975; Huang, 1993). Suspeita-se que tal relevância da temperatura do ar e velocidade de tráfego se estenda da compreensão também para a previsão de desempenho e, conseqüentemente, tenha impacto na determinação das espessuras das camadas num processo de dimensionamento. Tendo isso em vista, faz-se um estudo de sensibilidade do parâmetro de %AT (percentual de área trincada) prevista correspondente a variações em temperaturas no pavimento e em velocidades de tráfego. Para tais análises, escolheu-se o software CAP3D-D, que já inclui a opção de consideração de tais variáveis. O software foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC) a partir do programa de análise por elementos finitos CAP3D (Holanda *et al.*, 2006). A letra “D” corresponde a Dimensionamento e foi adicionada após o nome original do programa, indicando que agora o programa considera a evolução de dano e fornece o dimensionamento de um sistema de camadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O dimensionamento adequado deve incorporar variáveis relevantes de forma a permitir um cálculo e uma confiança que garantam o bom desempenho da estrutura e economicidade do projeto, sem superestimar ou subestimar a ocorrência de defeitos (Huang, 1993). Dentre as variáveis de cálculo atualmente relevantes no dimensionamento de pavimentos tem-se, adotando-se o MeDiNa, o dano médio acumulado, parâmetros de vida de fadiga (N_f) a partir de

ensaios de Compressão Diametral (CD), ensaios de rigidez por Módulo de Resiliência (MR), parâmetros de carga e crescimento do tráfego, e as espessuras das camadas. Tratam-se de parâmetros importantes e de relativa fácil obtenção (Fritzen, 2016). Entretanto, parâmetros viscoelásticos não são considerados, apesar de serem necessários para se perceber as variações significativas de rigidez e de vida de fadiga observadas em materiais asfálticos em diferentes frequências de carregamento e temperaturas (Yoger e Witczak, 1975; Huang, 1993). Além disso, modelos de dano em meio viscoelástico mais realistas (Santiago *et al.*, 2018), além da utilização de ensaios com predominância de dano por fadiga em vez de dano por fluência excessiva (Babadopulos *et al.*, 2015), já são estabelecidos para incorporação em um sistema de dimensionamento.

2.1. Cálculo do Dano Médio na camada de revestimento do pavimento

Diversas são as definições de dano na literatura (Shah *et al.*, 1995; Lemaitre, 1996; Kim, 2009). A definição aqui utilizada para a associação entre a análise do pavimento com sua previsão de desempenho é baseada na Lei de Miner, interpretada, para um dado ponto no material, como um consumo percentual da vida de fadiga correspondente a uma dada amplitude de deformação (Nascimento, 2015). Sendo assim, tem-se o consumo de um número máximo de solicitações (N_{fi}) ao longo dos “ i ” períodos de carregamento até o esgotamento da capacidade de suporte do material, como demonstrado na Equação 1 (NCHRP, 2004).

$$\sum_{i=1}^T D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (1)$$

Seguindo esta analogia, o cálculo do dano acumulado é executado pela aplicação das deformações obtidas numa análise estrutural e pela comparação à vida de fadiga para tal amplitude de deformação. No fim, deve-se realizar uma média do dano calculado para cada ponto de uma malha analisada no pavimento, atribuindo-se ao resultado o nome de dano médio acumulado. Este é o parâmetro que se tenta relacionar com observações de campo de área trincada, após alguns demais tratamentos, como demonstrado posteriormente.

Para o uso do CAP3D-D, a obtenção do dano médio é relatada por Santiago *et al.* (2018). Dentre os fatores que influenciam a obtenção do dano médio, citam-se o tipo de ensaio de vida de fadiga usado e os ensaios de rigidez adotados, cujos resultados geram dados de entrada na análise (Nascimento, 2015; Santiago *et al.*, 2018). É desejável que as premissas sejam as que mais aproximam as hipóteses e as respostas do material viscoelástico testado, de maneira que o sistema de dimensionamento, que utiliza medições do comportamento do material em laboratório, possa utilizar essas informações para previsão de comportamento dos materiais em condições diferentes das testadas em laboratório.

2.2. Parâmetros de clima

O clima influencia diretamente na resposta do pavimento às solicitações impostas (Bernucci *et al.*, 2011; Medina e Motta, 2015). A temperatura é um fator crítico, dadas a viscoelasticidade e consequente suscetibilidade térmica do ligante asfáltico, que tende a se comportar com menor rigidez em temperaturas mais altas e com maior rigidez em temperaturas mais baixas (Goodrich, 1991; Fonseca, 1995). Outro parâmetro do clima a influenciar no comportamento é a umidade (Bernucci, 1995; Araújo, 2019), não tratada neste estudo, mas que é foco de trabalho de pesquisas em andamento. Ressalta-se a importância da umidade no comportamento das camadas granulares (Bastos, 2013) e no dano por umidade no revestimento asfáltico (Lucas Júnior *et al.*, 2019).

Até o presente momento, entretanto, não se conhece o real efeito da temperatura em território nacional na previsão da %AT ao longo do tempo. Além da temperatura, e pelo mesmo motivo do caráter viscoelástico do material asfáltico, a velocidade de tráfego pode afetar diretamente a análise estrutural e a predição da ocorrência de defeitos, também merecendo destaque em estudos para quantificar sua real importância.

Santiago *et al.* (2018) obtiveram valores de dano médio ao longo do tempo (ou da quantidade de passagem de eixos padrões N) para diferentes temperaturas e regiões do Brasil. Os resultados do referido estudo constam na Figura 1. Evidencia-se que o comportamento de um pavimento asfáltico construído, por exemplo, em local de clima como da região Nordeste se comporta quanto à evolução do dano de maneira bastante diferente de um pavimento construído em local de clima como o da região Sul. Sugere-se, portanto, que devem-se esperar estruturas diferentes para pavimentos construídos em locais diferentes no Brasil, mesmo considerando rigorosamente o mesmo tráfego.

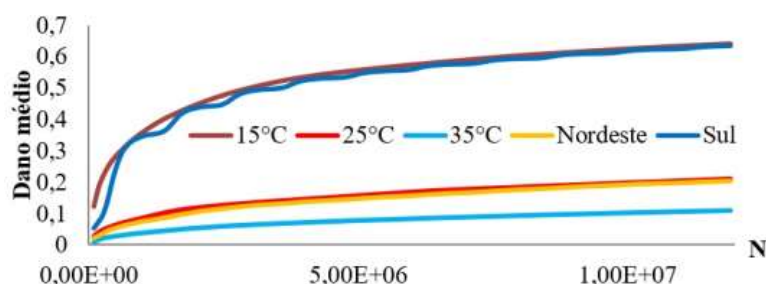


Figura 1. Dano médio em diferentes temperaturas obtida por Santiago *et al.* (2018).

2.3. Parâmetros de velocidade do tráfego

Velocidades mais altas impõem ao material asfáltico um comportamento mais rígido dado o seu caráter viscoelástico, enquanto velocidades mais baixas produzem resposta do material com menor rigidez (Francken e Partl, 1996). O descrito é consagrado na literatura, sendo facilmente observável em laboratório por ensaios de rigidez em diferentes temperaturas e velocidades de carregamento, inclusive utilizando-se ensaios de Módulo de Resiliência (Specht *et al.*, 2017).

Tratando-se de dimensionamento de pavimentos, costuma-se empregar como solicitações um tráfego de veículos, normalizando-os em quantidade de eixos simples de roda dupla (ESRD) padrão (ESAL – *Equivalent Single Axle Loads*) de 8,2tf e com 5,6kgf/cm² de pressão de pneus (Bernucci *et al.*, 2011). Alguns autores levantam questionamentos, por exemplo, quanto à conversão de eixos e carregamentos diversos em eixos padrões (Soares *et al.*, 2001). Levanta-se também o questionamento a respeito da variação no posicionamento transversal do tráfego em relação à trilha de roda, possivelmente também impactando na real quantificação de solicitações de tráfego. Entretanto, dada a ausência de parâmetro mais atual encontrado em literatura para fins de dimensionamento, utiliza-se comumente o ESAL em análises.

Santiago *et al.* (2018) também realizaram análises de dano médio para diferentes velocidades de tráfego. Os resultados constam na Figura 2, onde novamente se constata que a evolução de defeitos não é a mesma em função da velocidade de passagem dos veículos.

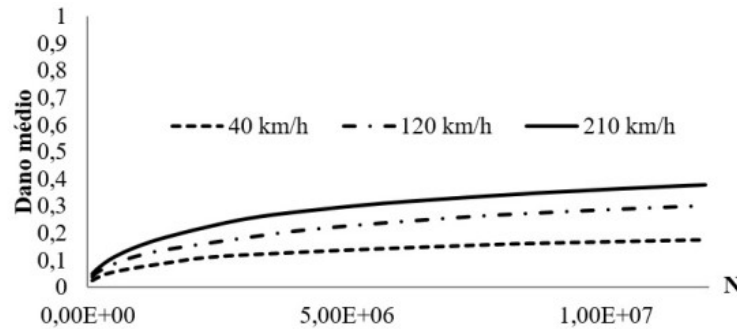


Figura 2. Obtenção do dano médio ao longo das passagens de eixo padrão para diferentes velocidades por Santiago *et al.* (2018).

2.4. Modelo S-VECD de dano para estimativa do N_f em um dado ponto do revestimento

Dentre as diferentes abordagens de modelagem possíveis para a interpretação da evolução do dano em material asfáltico, tem-se o modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*), ajustado para um dado material utilizando-se o ensaio de Tração-Compressão Direta (Underwood *et al.*, 2012). Diversos parâmetros atualmente não considerados na abordagem S-VECD podem impactar na qualidade dos resultados, como o efeito do envelhecimento da mistura testada em laboratório (Babadopulos *et al.*, 2014) ou fenômenos que não são de dano, mas capazes de produzir variação de rigidez ao longo de ensaios cíclicos (Babadopulos *et al.*, 2019). Porém, a abordagem mostra-se eficiente em considerar propriedades viscoelásticas do material à luz do dano contínuo (Nascimento, 2015).

A utilização dos *outputs* da abordagem S-VECD está relacionada à análise da perda de rigidez que ocorre, para carregamento senoidal, continuamente no material testado (Kim *et al.*, 2009). Tal perda é observada na curva C vs. S, onde “C” é a integridade do material e “S” uma variável de estado interno, como descrita por Nascimento (2015). Além da curva C(S), o critério de falha Gr vs. N_f baseado na dissipação de energia de pseudo-deformação do material (Sabouri e Kim, 2014) também é utilizado. Ambos os *outputs* em ensaios servem de *inputs* para análises estruturais em programas de análises viscoelásticas (como no LVECD) e elástico-lineares equivalente, em que o valor do módulo elástico é adotado como o módulo dinâmico na temperatura e velocidade consideradas na análise (como no CAP3D-D). As equações utilizadas em C(S) e $G^R(N_f)$ estão dispostas nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$C(S) = 1 - C_{11}(S)^{C_{12}} \quad (2)$$

Onde C_{11} e C_{12} são parâmetros de ajuste de curva C(S).

$$G^R = Y(N_f)^\delta \quad (3)$$

Onde Y e δ são parâmetros de ajuste de curva G^R vs. N_f .

2.5. Funções de Transferência

O caráter mecanístico de um método de dimensionamento consiste, simplificada, na inclusão de análise estrutural, que envolve o cálculo de parâmetros estruturais como tensões e deformações, e a quantificação de defeitos associados a esses parâmetros. No caso da fadiga, o parâmetro associado ao trincamento em campo é, nos casos do MeDiNa, CAP3D-D e FlexPave, o dano médio acumulado. O dano médio acumulado, antes da associação com o valor de área trincada em campo, é transformado em dano médio reduzido ($Dred_s$), que é resultante de um

método empírico de ajuste de dados (Nascimento, 2015) que envolve a característica de uma dada estrutura que começa a apresentar trincas para maior ou menor severidade de dano médio. O dano médio reduzido é, então, confrontado com observações de área trincada em trechos situados em rodovias em todo território nacional, de maneira a se obter uma equação empírica chamada de função de correspondência campo-laboratório, ou Função de Transferência (FT). A equação é ajustada com seus parâmetros de calibração, que no caso da apresentada na Equação 4 seriam C_1 e C_2 .

$$\%AT = C_1 \left(\frac{N}{N_f} red_s \right)^{C_2} \quad (4)$$

A elaboração de uma função que relacione dados de laboratório com o campo foi possível, no Brasil, graças à Rede Temática de Asfaltos (RTA) da Petrobras, que conglomerou diversos centros de pesquisa nacionais e trechos monitorados, abastecendo uma base de dados responsável por calibrar e validar as funções testadas para o MeDiNa e também para outros sistemas de dimensionamento como o CAP3D-D.

O MeDiNa, desenvolvido a partir do SisPav (Franco, 2007), proporcionou a combinação da análise estrutural com o cálculo do dano e confrontação com os dados de %AT até então observados. Na prática, o software atual tem uma FT que recebe os dados do dano médio e dano médio reduzidos advindos da análise estrutural e demais premissas adotadas, e fornece o %AT para aquela situação de dano médio estimada. A equação atual foi calibrada pelos trabalhos de Fritzen (2016), e já traz novos estudos voltados a sua atualização (Fritzen *et al.*, 2019).

As premissas do método atual não incorporam influências de temperatura e velocidade do tráfego na análise estrutural. Levanta-se, então, o questionamento quanto à real necessidade de tais variáveis no cálculo de uma FT. Há disponíveis *softwares* que já levam em consideração tais variáveis, como o LVECD (Eslaminia *et al.*, 2012) da *North Carolina State University* (NCSU) em nível de análise viscoelástica e o CAP3D-D da UFC em nível de análise elástico-linear equivalente que simula o efeito do caráter viscoelástico do material asfáltico no comportamento do pavimento (Santiago *et al.*, 2018).

3. METODOLOGIA

A análise neste trabalho consiste na avaliação de variações de %AT para variações de temperatura e velocidade. Para isso, foram fixados os demais parâmetros da estrutura e do carregamento, exceto ora a velocidade, ora a temperatura. Faz-se necessária a utilização de parâmetros relacionados à viscoelasticidade do material do revestimento, dada a sensibilidade à velocidade e à temperatura desejada, não sendo possível isso ser atendido por meio dos ensaios de rigidez por Módulo de Resiliência e de fadiga por Compressão Diametral considerados a uma temperatura única, usualmente 25°C. Portanto, os ensaios utilizados para parâmetros de rigidez foram os de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e para parâmetros de fadiga o de Tração-Compressão Direta (TD) com modelagem S-VECD, que incorporam efeitos da frequência e da temperatura no comportamento da mistura asfáltica (Nascimento, 2015).

3.1. Ferramenta de cálculo

O CAP3D-D torna possível a presente análise por permitir a incorporação de parâmetros de rigidez por meio do $|E^*|$ e de fadiga por meio do ensaio de TD, além de dados de entrada referentes à temperatura do ar e à velocidade de tráfego. O cálculo da %AT se dá por uma análise estrutural que leva em consideração a curva sigmoideal descrevendo o $|E^*|$ do material testado em função da frequência, assim como fatores de translação tempo-temperatura, levando

em consideração a importância tanto da temperatura quanto da frequência de carregamento. Uma tela do programa está disposta na Figura 3. Para mais informações, o leitor é referido a Santiago *et al.* (2018) e estudos associados.

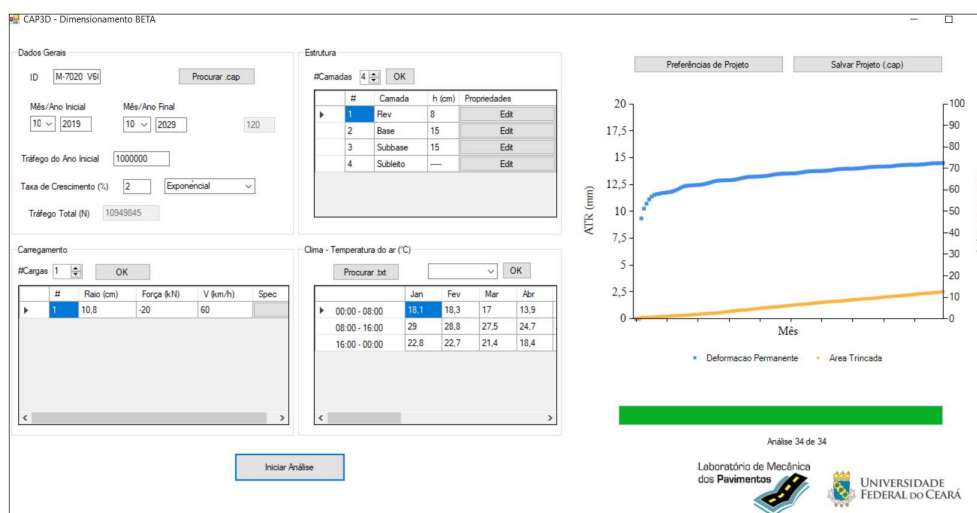


Figura 3. Framework do CAP3D-D.

A FT calibrada e validada para um conjunto de dados da Rede Temática de Asfalto, também utilizada na calibração e validação do MeDiNa, é apresentada por Santiago *et al.* (2019). A calibração da FT embutida no CAP3D-D é resultado do monitoramento de 44 trechos, dos quais 27 utilizados para calibração e 17 para validação. A FT calibrada está descrita na Equação 5.

$$\%AT = 721,96589 \left(N / N_f \text{ red}_s \right)^{3,76808} \quad (5)$$

É importante ter em mente que a FT é calibrada para os trechos até então monitorados, e que à medida que crescer a quantidade de dados disponíveis no Brasil, a FT deve ser devidamente atualizada.

3.2. Tráfego, estrutura do pavimento analisado e misturas investigadas

Os dados estruturais das camadas foram fixados em valores considerados pelos autores como condizentes com a realidade de projetos para um tráfego inicial de $N = 10^6$ (ESRD) em 1 ano. Admitiu-se um crescimento exponencial do tráfego por ano de 2,0%, e foram realizadas simulações para 120 meses de tráfego. Os dados estruturais estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1. Dados estruturais das camadas testadas

Camada/subleito	h (cm)	E (MPa)	v
Revestimento	8	E* (T,v)	0,30
Base	15	500	0,35
Sub-base	15	300	0,35
Subleito	---	100	0,40

Quatro misturas foram selecionadas para as análises, tendo sido ensaiadas pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez (Cenpes) da Petrobras. As misturas têm agregados de origem na pedra de Sepetiba, RJ. Os principais resultados referentes à caracterização dos agregados e ligantes estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de agregados e ligantes utilizados nas misturas analisadas

Mistura	Agregados			Ligantes		
	TMN (mm)	VAM (%)	RBV (%)	CAP	Teor (%)	Vv (%)
M1	19,0	13,86	70,84	50/70	5,0	4,0
M2	12,7	14,80	73,00	50/70	5,5	4,0
M3	12,7	14,80	73,00	30/45	5,5	4,0
M4	19,0	13,70	71,00	30/45	5,0	4,0

Os dados de modelagem S-VECD resumem-se aos da curva $C(S)$ e do parâmetro de falha G^R vs. N_f , além do parâmetro α (relacionado à capacidade de relaxação do material). Esses parâmetros estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de dano à luz do modelo S-VECD das misturas analisadas

Mistura	C(S)			G^R vs. N_f	
	C_{11}	C_{12}	α	Y	δ
M1	0,000154	0,757688	2,86	1587412,409	-1,214
M2	0,000129	0,745610	3,42	15159352,120	-1,417
M3	0,00016	0,727992	3,12	2323722,766	-1,255
M4	7,09E-05	0,811661	2,71	4673062,070	-1,348

Os dados de rigidez resumem-se aos parâmetros da curva sigmoidal obtida a partir de ensaios de $|E^*|$. Os valores de parâmetros de modelo polinomial de 2ª potência para obtenção de *Shift Factors* em função da temperatura para obtenção das frequências reduzidas também constam na Tabela 4.

Tabela 4. Dados de rigidez por Módulo Dinâmico das misturas testadas

Mistura	Parâmetros curva sigmoidal				<i>Shift Factor</i> t-T		
	a	b	d	g	a1	a2	a3
M1	1,41E-05	4,48	1,67	0,54	9,81E-05	-0,173	3,06
M2	1,41E-05	4,55	1,66	0,44	8,65E-05	-0,175	3,15
M3	1,41E-05	4,53	1,62	0,42	7,77E-05	-0,183	3,35
M4	1,41E-05	4,48	2,07	0,49	9,01E-05	-0,179	3,21

Os parâmetros a , b , d e g são obtidos a partir do ensaio $|E^*|$ e são obtidos da Equação 6.

$$\text{Log}|E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(f_r)}}} \quad (6)$$

Onde f_r é a frequência reduzida, obtida da aplicação dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 , como demonstrado na Equação 7 polinomial, em que “x” é a temperatura do material em graus Celsius.

$$\text{Log}(f_r) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (7)$$

3.3. Temperaturas e velocidades

As temperaturas testadas foram ora com valores fixos de 10, 20 e 30°C, durante todo o tempo de análise, ora variadas. As temperaturas variadas foram referentes à cidade de Fortaleza e para Região Sul do Brasil, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o

ano de 2019, considerando os turnos de 00:00 às 08:00, de 08:00 às 16:00 e de 16:00 às 00:00, como demonstrado na Tabela 5. Escolheu-se a cidade de Fortaleza por sediar a UFC, enquanto a região Sul foi escolhida por generalizar uma localidade de temperaturas relativamente mais baixas. Foram escolhidas as velocidades de 10, 35, 60, 90 e 120 km/h para as análises quanto ao efeito da velocidade.

Tabela 5. Dados climáticos para a cidade de Fortaleza e para a região Sul do Brasil por turno.

	Turno	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Fortaleza	0h - 8h	27	27	25	25	24	25	24	25	25	26	26	27
	8h - 16h	31	30	29	29	29	29	30	27	30	30	30	31
	16h - 0h	28	28	25	27	26	27	27	26	26	27	27	27
Região Sul	0h - 8h	18	18	17	14	11	9	9	10	12	13	15	17
	8h - 16h	29	29	28	25	22	20	20	21	22	24	26	28
	16h - 0h	23	23	21	18	16	14	14	15	16	18	20	22

São dois os efeitos apresentados em literatura do aumento da temperatura sobre o comportamento do pavimento asfáltico quanto ao trincamento: (i) aumento do número de ciclos requeridos para a ruptura de um ponto do material a uma dada amplitude de deformação (tendência de aumento de vida de fadiga); (ii) aumento das amplitudes de deformação no revestimento (tendência de diminuição de vida de fadiga). Esses efeitos são opostos quanto ao resultado de trincamento do revestimento. A depender da mistura asfáltica empregada e das condições avaliadas, um dos dois efeitos pode se sobrepor ao outro. Pelo princípio da superposição tempo-temperatura, os efeitos da velocidade de passagem de veículos são semelhantes aos efeitos da temperatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise em diferentes velocidades para cenários de temperaturas constantes

Os cenários de diferentes velocidades (eixo x) expostos às temperaturas constantes de 10, 20, 30°C, e para os cenários representantes de uma cidade hipotética na Região Sul (média anual de 19,5°C) e para a cidade de Fortaleza (média anual de 26,7°C), durante todo o período de análise para as misturas M1, M2, M3 e M4 estão dispostos na Figura 4. No eixo y, apresentam-se os resultados de %AT previstos para o final de 120 meses.

Percebe-se uma tendência de ocorrência de maiores %AT para temperaturas mais amenas (Região Sul). A mistura M4 se comportou de modo inesperado, com valores de %AT maiores para a cidade de Fortaleza em baixas velocidades. De maneira geral, os valores comportam-se como esperado, com crescimento da %AT com o aumento de velocidade e diminuição da temperatura para as temperaturas variadas das regiões escolhidas. Conforme discutido na Seção 3.3., o efeito do aumento do número de ciclos para a fadiga do material a uma dada amplitude de deformação parece ter competido com o efeito da diminuição das deformações no pavimento, de maneira que ora houve prevalência de um, ora do outro. Para as demais temperaturas, observou-se um aumento da %AT, com níveis entre 5% e 12% para a temperatura de 20°C e valores abaixo de 5% para a temperatura de 30°C, porém nos dois casos %AT inferior ao caso de 10°C. Para 20°C e 30°C prevaleceu o efeito do aumento do número de ciclos para a fadiga a uma dada amplitude de deformação.

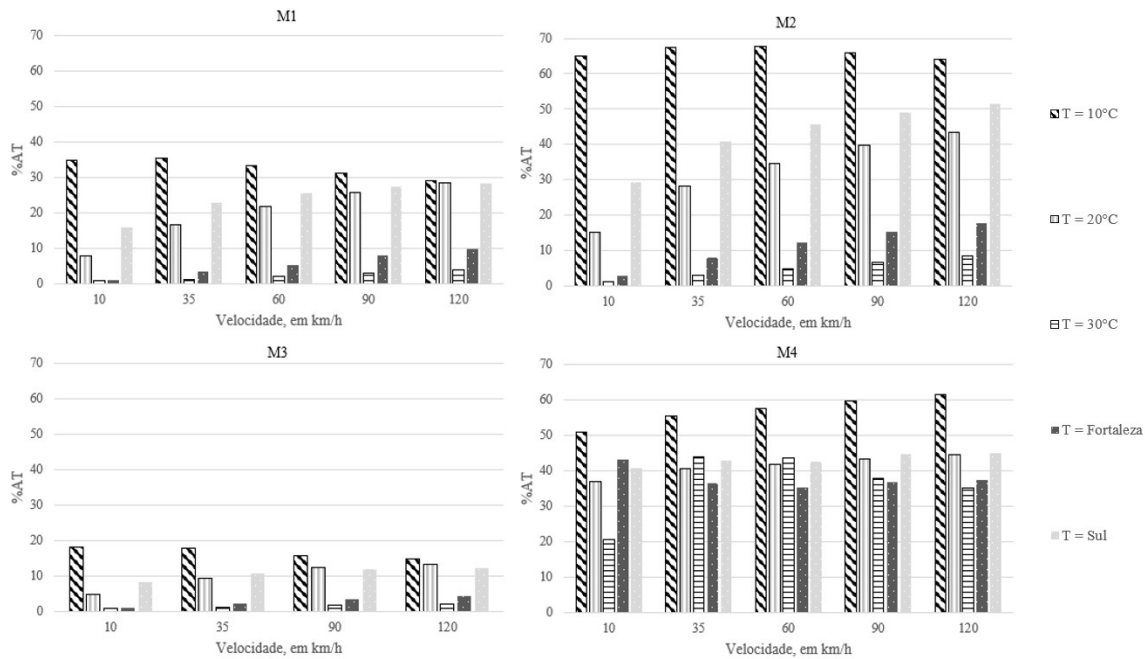


Figura 4. Resultados de %AT para distintos cenários de temperaturas e velocidades.

Para variações de temperatura de 10 a 30°C, o efeito pode em alguns casos ser pequeno (variações de apenas 30% no caso da M4 a 60 km/h, até casos de áreas trincadas dezenas de vezes superiores como no caso da M1 em que variou-se de 1% a 65% a área trincada prevista a 10 km/h). Enquanto a mistura M4 apresentou previsões de área trincada semelhantes tanto em Fortaleza quanto na região Sul, as misturas M1, M2 e M3 se danificam mais de 3 vezes mais rapidamente na região Sul do que em Fortaleza. Observou-se também como relevante o efeito da velocidade de passagem de veículos, que pode triplicar a área trincada ao fim de 120 meses, quando se varia de 10 km/h (velocidade média de uma grande capital) para 90 km/h (velocidade compatível com uma rodovia não urbana), a depender da mistura.

De um modo geral, percebe-se para temperaturas mais elevadas uma redução de %AT ao fim de 120 meses para as velocidades testadas. O fato é evidenciado pelas análises nas misturas M1, M2 e M3. A análise é semelhante a obtida por Santiago *et al.* (2018) para os dados de dano médio em diferentes cenários de temperatura e velocidade para uma mesma mistura. Conforme discutido na Seção 3.3., o efeito do aumento do número de ciclos para a fadiga do material a uma dada amplitude de deformação parece ter prevalecido nesses casos sobre o efeito da diminuição das amplitudes de deformação no pavimento. Em outros casos (como a 10°C em torno dos 35 km/h para as misturas asfálticas M1, M2 e M3), há competição entre os dois efeitos sem prevalência absoluta de um sobre o outro.

Como demonstrado por Santiago *et al.* (2019), os trechos usados para calibração da FT utilizada neste estudo não apresentaram elevados valores de %AT, o que geraria também uma incerteza para a validação em patamares elevados da ocorrência deste defeito, como em alguns casos observados para as misturas investigadas na estrutura e com o tráfego considerado.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a temperatura e a velocidade de passagem de veículos têm relevância na previsão de área trincada em pavimentos. Essa influência depende da mistura asfáltica investigada. Para as aparentes anomalias observadas na evolução do trincamento com a

temperatura e com a velocidade de passagem dos veículos (como o aumento de %AT para diminuição de velocidades e aumento de temperaturas), formulou-se a hipótese de que, para algumas misturas e em alguns cenários específicos de carregamento, há um limite de transição entre a prevalência do efeito de menores amplitudes de deformação devido a ganhos de rigidez a temperaturas inferiores sobre o efeito de maiores vidas de fadiga do material a mais altas temperaturas. É importante também ter em mente que o cenário de temperatura constante de 10°C é um valor extremo para a situação de clima brasileiro, e que a FT pode não se adequar dada a ausência de trechos experimentais nessas condições para calibração. Sugere-se, por fim, que além do incremento da base de dados envolvendo trechos, o acompanhamento de dados de clima e velocidade operacional dos veículos. Isso eventualmente proporcionará FTs calibradas e validadas para diversas situações de clima e tráfego, o que tende a melhorar a capacidade de predição dos modelos adotados no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali Azhar Butt; Birgisson B.; Kringos N. (2012) Optimizing the Highway Lifetime by Improving the Self-Healing Capacity of Asphalt. *Procedia – Social and Behavioral Science*. v. 48, p. 2190-2200.
- Araújo, C. B. C. (2019) Gestão Integrada de Infraestrutura Civil em Ambiente Urbano. *Qualificação de Doutorado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Babadopulos, L.F.A.L.; Soares, J.B., Castelo Branco, V. T. (2014) Aging and constitutive modeling of asphalt mixtures: Research developments in Brazil. *Asphalt Pavements*. Kim Edition. CRC Press. p. 1059 – 1068.
- Babadopulos, L.F.A.L.; Soares, J.B.; Castelo Branco, V.T. (2015) Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Revista Transportes*. v. 23, n. 2 p. 85-94
- Babadopulos, L.F.A.L.; Orozco, G.; Sauzéat, C.; Di Benedetto, H. (2019) Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. *International Journal of Fatigue*, v. 124, p. 303-314.
- Bernucci, L.L.B. (1995) Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Bernucci, L.L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.; Soares, J.B. (2010) *Pavimentação Asfáltica*. Petrobrás Asfaltos, Rio de Janeiro.
- Bastos, J.B.S. (2013) Influência da Variação da Umidade no Comportamento de Pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- Christensen, D.W.; R. Bonaquist (2005) Practical Application of Continuum Damage Theory to Fatigue Phenomena in Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 74, p. 963-1002.
- DNIT (2019) *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*. Departamento de Infraestrutura dos Transportes. Acessado em <http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa> em março de 2019.
- Eslaminia M. S.; Thirunavukkarasu S.; Guddati M. N.; Kim Y. R. (2012) Accelerated Pavement Performance Modeling Using Layered Viscoelastic Analysis. *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, v. 4: p. 497-506.
- Fonseca, O. A. (1995) Development of a time-dependent model for the dynamic modulus of asphalt mixes. *Tese de Doutorado – College Park, MD, USA*.
- Francken, L.; Partl, M. (1996) Technical Committee on Bitumen and Asphalt Testing. Complex modulus testing of asphaltic concrete: RILEM interlaboratory test program. *Transportation Research Record*, n. 1.545, p. 133-42.
- Franco, F.A.C.P. (2007) Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fritzen, M.A. (2016) Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão de Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fritzen, M.A.; Franco, F.A.C.P.; Motta, L.M.G.; Ubaldo, M.O. (2019) Atualização da Função de Transferência do Dano de Fadiga para a Área Trincado do Programa Medina. Centro Rodoviário Português. *Anais do 9º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa, Portugal.
- Goodrich, J.L. (1991) Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 60, p. 80-120.

- Holanda, A. S.; Parente Jr. E.; Melo, T. D. B.; Evangelista Jr. F., Soares, J. B. (2006) Finite Element of Flexible Pavements. *XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*. Belém, PA.
- Huang, Y. H., (1993). *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- INMET (2019) - *Normais climatológicas* - Instituto Nacional de Meteorologia. Acessado em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> em março de 2019.
- Kim, Y.R.; M. N. Guddati; B. S. Underwood; T. Y. Yun; V. Subramanian; S. Savadatti; S. Thirunavukkarasu (2009) Development of a Multiaxial Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for Asphalt Mixtures. *Publication FHWA-HRT-08-073, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration*. McLean, VA, USA.
- Lemaitre, J. (1996) *A course on damage mechanics*, 2nd edition. Springer, Berlin, Alemanha.
- Lucas Júnior, J. O.; Babadopulos, L. F. A. L.; Soares, J. B. (2019) Moisture-induced damage resistance, stiffness and fatigue life of asphalt mixtures with different aggregate-binder adhesion proprieties. *Construction and Building Materials*, v. 216, p. 166-175.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos pavimentos*. 3ª Ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Motta, L. M. G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NCHRP (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. Part 3: Design Analysis. Chapter 3: Design of new and reconstructed flexible pavement*. National Cooperative Highway Research Program –NCHRP. Illinois, IL, USA.
- Sabouri, M. A.; Kim, Y. R. (2014) Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. v. 2447, p. 117 – 125.
- Santiago, L. S.; Torquato e Silva, S. A.; Soares, J. B. (2018) Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. *Revista Transportes*. v. 26, n. 2, p. 31-43.
- Santiago, L. S.; Babadopulos, L. F. A. L.; Soares, J. B (2019) Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. *Artigo aceito para publicação na Revista Transportes*.
- Shah, S.P.; Swartz, S.E.; Ouyang, C. (1995) *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*. Ed. Wiley Interscience. New York, NY, USA.
- Soares, J. B.; Motta, L. M. (2001) Considerações sobre a Determinação do Fator de Veículo no Cálculo do Número N. *Anais do XV Congresso de Ensino e Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas*, v. 1, p. 381-389.
- Specht, L.P.; L.F.A.L. Babadopulos; H. Di Benedetto; C. Sauzéat; J.B. Soares (2017) Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 648-658.
- Underwood B. S.; Baek C.; Kim Y. R. (2012) Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. *Transportation Research Record*, v. 2296(4): p. 36-45.
- Yoder E. J.; Witczak M. W. (1975) *Principles of Pavement Design*, 2ª ed. Wiley. Toronto, Canada.

Anthony Belo Vasconcelos Santos (anthonybe@outlook.com)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (babadopulos@ufc.br)

Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste, Universidade Federal do Ceará.

Av. Mister Hull s/n, Centro de Tecnologia-UFC, Campus do Pici, Bloco 734, Fortaleza, Ceará.