

Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos

Influence of temperature and traffic speed on asphalt pavement predicted cracked area

Anthony Belo Vasconcelos Santos¹, Jorge Barbosa Soares², Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos³

¹Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste, Universidade Federal do Ceará, anthonybe@outlook.com

²Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste, Universidade Federal do Ceará, jsoares@det.ufc.br

³Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, babadopulos@ufc.br

Recebido:

8 de junho de 2020

Aceito para publicação:

20 de outubro de 2020

Publicado:

16 de novembro de 2020

Editor de área:

Francisco Thiago Aragão

Palavras-chaves:

Pavimento Asfáltico.

Fadiga.

Área Trincada.

Dimensionamento mecanístico-empírico.

Keywords:

Asphalt Pavement.

Fatigue.

Cracked Area.

Mechanistic-empirical design.

DOI:10.14295/transportes.v28i4.2394

RESUMO

O Brasil passa por um importante momento na área da pavimentação asfáltica com a proposição de atualização do método de dimensionamento. Neste trabalho é investigada a importância das variáveis de temperatura e velocidade de tráfego na previsão de área trincada do revestimento asfáltico (%AT) no tempo por meio do programa CAP3D-D. Por meio de rotinas de análise mecanísticas aliadas a funções empíricas de previsão, foi investigado o desempenho de 4 misturas em 16 cenários diferentes, considerando a mesma estrutura de pavimento. Os resultados confirmam significativa sensibilidade de respostas de %AT, com variações de 6 a 40% ao fim de 120 meses em simulação entre temperaturas da Região Nordeste e Sul do Brasil, respectivamente, e de variações de até 33% para comparações entre 10 km/h e 90 km/h. Mostra-se que além dos diferentes resultados de trincamento, as misturas apresentaram diferentes níveis de sensibilidade às variações de clima e velocidade, evidenciando a importância de se considerar estes parâmetros nas previsões de %AT.

ABSTRACT

Brazil is going through an important moment in the pavement industry due to an ongoing development of a mechanistic-empirical pavement design method. In this paper, the importance of two variables in the prediction of cracked area over time, temperature and traffic speed, is investigated using the CAP3D-D software. A mechanistic analysis along with empirical transfer functions is used to analyze 4 Hot Mix Asphalt considering 16 different scenarios with the same pavement structure. The results confirm the significant sensitivity of the predicted cracked area to the variables investigated, with variations from 6 to 40% through a 120-month simulation between temperatures in the Northeast and South regions of Brazil, respectively, and variations of up to 33% for comparisons between 10 km/h and 90 km/h, respectively. It is shown that in addition to producing different cracking results, the mixtures showed different levels of sensitivity to temperature and vehicle speed variations, making it clear the importance of considering these parameters in pavement design.



1. INTRODUÇÃO

No Brasil, foi recentemente desenvolvido e disponibilizado um novo método de dimensionamento de pavimentos nacional (MeDiNa). O sistema adota uma abordagem mecanístico-empírica, que incorpora análise estrutural e previsão de defeitos, como o trincamento por fadiga em revestimento asfáltico, para determinação das espessuras de camadas do pavimento (Motta *et al.*, 2018).

Tratando-se da previsão da ocorrência do trincamento por fadiga, dados de campo levantados em trechos experimentais (observações empíricas) foram utilizados para calibrar modelos mecanicistas a partir de ensaios de fadiga em laboratório (Nascimento, 2015; Fritzen, 2016; Santiago *et al.*, 2019). A essas equações que relacionam defeitos em campo aqueles observados em laboratório através de simulação, atribui-se o nome de Funções de Transferência (FT), que correspondem à principal etapa de empirismo dos métodos mecanístico-empíricos em geral.

Essas funções são atreladas não somente ao conjunto de dados utilizados na calibração, mas a todas as hipóteses simplificadoras e modelos usados para o estudo do comportamento dos materiais e das estruturas. Em outras palavras, uma FT calibrada para um determinado conjunto de hipóteses simplificadoras só pode ser usada para prever um dado empírico de campo utilizando saídas de simulação obtidas com o conjunto de hipóteses simplificadoras adotado inicialmente. São exemplos de FT a utilizada no MeDiNa (Fritzen, 2016), a utilizada no CAP3D-D (Santiago *et al.*, 2019) e ainda a utilizada no sistema de dimensionamento conhecido como FlexPave (Nascimento, 2015), advindo do programa LVECD (Eslaminia *et al.*, 2012).

As características viscoelásticas do ligante asfáltico, que impactam diretamente o revestimento asfáltico, trazem uma série de complexidades que poderiam ser incorporadas ao sistema de dimensionamento com vistas 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 balanço entre a realidade e a simplicidade 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. Na terminologia usada em Soares (2020), um novo Programa de Pesquisa Científica estará em breve estruturado no Brasil, afinal não era de se esperar que fosse instantânea a superação do Programa anterior, de natureza empírica.

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 (Araújo, 2019), auto-cicatrização (Daniel e Kim, 2001; Oliveira, 2019a), entre outros. Isso faz do comportamento do material algo dependente de variáveis que o projetista não poderá controlar (como a velocidade de passagem de veículos e a temperatura), incluindo casos em que ainda há necessidade de avanço científico para a adequada incorporação de efeitos em sistemas de dimensionamento, como é o caso dos efeitos da umidade e da auto-cicatrização de materiais. Há também de se considerar 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 é, portanto, conveniente, sobretudo reduzindo o esforço computacional e a carga de dados de entrada necessários ao sistema. Há fenômenos sobre os quais já se encontra literatura estabelecida envolvendo modelos de materiais e ensaios, e que são relevantes para a compreensão do comportamento dos pavimentos. É o caso dos efeitos da temperatura e da velocidade de passagem de veículos na rigidez das misturas asfálticas (Yoder e Witzack, 1975; Huang, 2003). O modelo conhecido na literatura como *Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) model* (Schapery, 1990; Underwood *et al.*, 2012), por sua vez, permite a estimação da vida de fadiga da mistura asfáltica em diferentes temperaturas e frequências.

Suspeita-se que tal relevância da temperatura do ar (e, por consequência, do pavimento) e da velocidade de tráfego se estenda da compreensão dos fenômenos físicos para a previsão de

desempenho e, conseqüentemente, tenha impacto na determinação das espessuras das camadas num processo de dimensionamento. Para avaliar tais efeitos, escolheu-se o software CAP3D-D, que inclui a opção de consideração de tais variáveis (Santiago *et al.*, 2019), tendo sido desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC) a partir do programa de análise por elementos finitos CAP3D (Holanda *et al.*, 2006).

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo investigar a sensibilidade do percentual de área trincada (%AT) prevista, conforme variações em temperaturas no pavimento e em velocidades de tráfego.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dentre as variáveis de cálculo consideradas relevantes no dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa tem-se parâmetros de vida de fadiga (N_f) da mistura asfáltica a partir de ensaios de Compressão Diametral (CD), ensaios de rigidez de todas as camadas por Módulo de Resiliência (MR), parâmetros de carga, crescimento do tráfego e espessuras das camadas (Fritzen, 2016). Parâmetros viscoelásticos não são considerados, apesar de serem necessários para se perceber as variações de rigidez e de vida de fadiga observadas em materiais asfálticos em diferentes frequências de carregamento e temperaturas (Yoder e Witczak, 1975; Huang, 2003), e consideradas significativas e bem estabelecidas pela literatura. Além disso, modelos de dano em meio viscoelástico mais realistas (Underwood *et al.*, 2012), bem como ensaios com predominância de dano por fadiga (Tração-Compressão Direta, TD) em vez de dano por fluência excessiva, já são estabelecidos na literatura e podem ser incorporados em um sistema de dimensionamento (Babadopulos *et al.*, 2015).

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

Diversas são as definições de dano na literatura (Lemaitre, 1996; Kim *et al.*, 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 asfáltico, como um consumo relativo da vida de fadiga correspondente a uma dada amplitude de deformação (Nascimento, 2015). Assim, tem-se o consumo de um número máximo de solicitações, ou vida de fadiga (N_f), ao longo dos “ i ” períodos de carregamento até o esgotamento da capacidade de suporte do material, como demonstrado na Equação 1 (NCHRP, 2004). Onde n representa o número acumulado de solicitações de deformações ao elemento e D o Dano Acumulado.

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

Seguindo esta analogia, o cálculo do dano é executado considerando as deformações obtidas numa análise estrutural (elástica-linear ou viscoelástica-linear). Dentre as metodologias possíveis para determinação da vida de fadiga, cita-se a abordagem S-VECD, descrita em mais detalhe na seção 0.

Cada ponto no revestimento, então, está submetido a distintos níveis de danificação devido aos diferentes níveis de deformações correspondentes. Para se representar com um único indicador o nível de dano no revestimento, pode-se realizar uma média do dano calculado para cada ponto de uma malha analisada no pavimento, conforme Figura 1, atribuindo-se ao resultado o nome de dano médio. Este “macro-parâmetro” faz parte dos principais sistemas de dimensionamento mecânicos-empíricos estudados no Brasil (MeDiNa, CAP3D-D, FlexPave).

Dentre os fatores que influenciam a obtenção do dano médio, citam-se o tipo de ensaio de vida de fadiga e os ensaios de rigidez usados, cujos resultados geram dados de entrada na análise (Nascimento, 2015; Santiago *et al.*, 2018). É desejável que as premissas adotadas sejam as que melhor aproximam as hipóteses e as respostas do material testado.

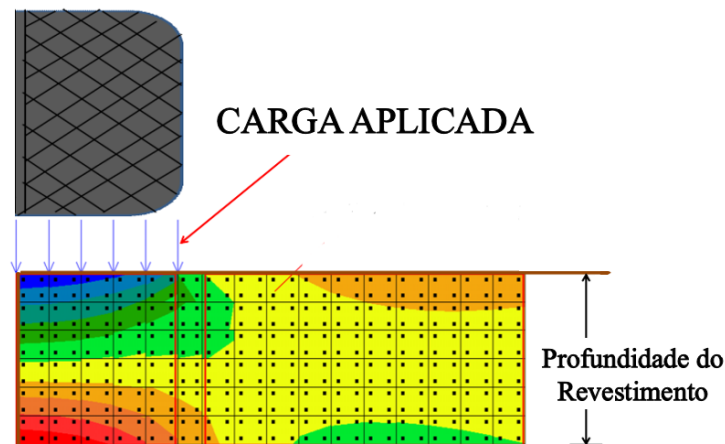


Figura 1. Malha de pontos para determinação do dano médio no CAP3D-D (Santiago, 2018)

2.2. Modelo S-VECD para estimativa do N_f em um dado ponto do revestimento

Dentre as diferentes abordagens de modelagem 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 TD (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 ou fenômenos que não são de dano, mas são 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, e é a adotada no CAP3D-D para previsão de desempenho.

A abordagem S-VECD está relacionada à análise da perda de rigidez que ocorre, para carregamento senoidal, continuamente no material testado até a falha por fadiga (ruptura) (Kim *et al.*, 2009). Portanto, a falha tem características inerentes ao material e às condições de carregamento. Quanto ao material, na modelagem S-VECD utiliza-se o parâmetro denominado integridade (C), obtido a partir da razão entre a tensão e a pseudo-deformação (ϵ^R), isto é, a deformação de uma análise viscoelástica transformada em correspondente elástica, para associação com a rigidez. É observado que C diminui com o decorrer dos ciclos de carregamento em ensaio. Além deste, a utilização de uma variável de estado interno, apresentada como S , que incorpora parâmetros advindos da teoria VECD e que está relacionada à perda de rigidez devido ao microdano, tende a aumentar com o decorrer do ensaio de fadiga, possibilitando a obtenção de uma relação tida como fundamental para o material asfáltico, $C(S)$, ou curva característica de dano. Diz-se fundamental por esta relação manter-se a mesma em diferentes modos de carregamento (tensão controlada, deslocamento do atuador do equipamento de ensaio controlado, ou deformação controlada), diferentes amplitudes de deformação e em diferentes temperaturas, desde que não seja presente em ensaio o fenômeno da viscoplasticidade (Nascimento, 2015). Para um

conhecimento mais aprofundado sobre a Modelagem S-VECD, o leitor é direcionado aos trabalhos de Schapery (1990) e Underwood *et al.* (2012).

Além da curva característica de dano, $C(S)$, o critério de falha $G^R(N_f)$ baseado na dissipação de energia de pseudo-deformação do material também é utilizado, e indica o momento da falha do material com base num critério de energia que pode ser calculado para qualquer carregamento (Sabouri e Kim, 2014). As duas curvas referidas são os dados de saída da caracterização de dano necessárias para a previsão de desempenho quanto à fadiga. Elas podem ser usadas para a construção das clássicas curvas de Wöhler, tal qual obtidas para outros tipos de ensaio como o de CD, mas oferecem a vantagem de poderem ser obtidas em diferentes temperaturas e frequências de carregamento sem ensaios adicionais.

No CAP3D-D, para representar as curvas $C(S)$ e $G^R(N_f)$, utiliza-se as Equações 2 e 3, respectivamente, enquanto as Equações 4, 5, 6 e 7 trazem o cálculo para obtenção do N_f .

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

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

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

Onde γ e δ são parâmetros de ajuste da curva $G^R(N_f)$.

$$N_f = \left(\frac{\delta}{\gamma \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{4+1-\frac{C_{12}}{p}}} \quad (4)$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{p(C_{11}C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} k_1}{f_{R2}^{2\alpha}} \right)^{\frac{C_{12}}{p}} \quad (5)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta+1}{2} ((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE}) \quad (7)$$

Onde ε_{TA}^R é a amplitude da pseudo-deformação, α a taxa de evolução do dano, k_1 o fator de forma de carga, f_{red} a frequência reduzida, $\varepsilon_{0,pp}$ a amplitude de deformação pico a pico, β a parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (valor usual adotado de -0,08); $|E^*|_{LVE}$ é o módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência em ensaio. A compreensão detalhada destas variáveis, inclusive com uma análise de sensibilidade, pode ser encontrada em Santos (2020). O referido autor incorporou atualizações nas rotinas do programa CAP3D-D no âmbito do cálculo de N_f , em particular nas Equações 4 e 5. A atualização é referente à sintaxe das equações, com ajustes para a implementação adequada das Equações 4 e 5.

Velocidades mais altas leva o material asfáltico a um comportamento mais rígido dado o seu caráter viscoelástico, enquanto velocidades mais baixas produzem resposta do material com menor rigidez (Lemaitre e Partl, 1996). Tal aspecto 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 MR (Specht *et al.*, 2017).

Tratando-se do 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. Apesar de questionamentos quanto à conversão de eixos e carregamentos diversos em eixos padrões (Soares *et al.*, 2001), dada a ausência de parâmetro mais atual na literatura para fins de dimensionamento, utiliza-se comumente o número de ESALs (ou simplesmente N) em análises.

2.3. Parâmetros de clima

O clima influencia diretamente a resposta do pavimento às solicitações impostas (Medina e Motta, 2015). A temperatura é um fator crítico, dadas a viscoelasticidade e a 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). Ressalta-se, também, a importância da umidade no comportamento das camadas granulares e no dano por umidade no revestimento asfáltico, assim como no comportamento do sistema de camadas (Araújo, 2019). Apesar dos avanços, à luz da literatura atual, a correta consideração dos efeitos de umidade se encontra ainda a um patamar de complexidade que desencoraja a incorporação prática em um sistema de dimensionamento de pavimentos.

Até o presente momento, entretanto, não se conhece através de observação direta o real efeito da temperatura no %AT ao longo do tempo em território nacional. Além da temperatura, e pelo mesmo motivo (caráter viscoelástico do material asfáltico), a velocidade de tráfego pode afetar diretamente os esforços estruturais e a ocorrência de defeitos, também merecendo destaque em estudos para quantificar a sua real importância.

Santiago *et al.* (2018) obtiveram valores de Dano Médio Acumulado (D_{acm}) para diferentes temperaturas e regiões do Brasil, constando na Figura 2 os seus resultados. Evidencia-se que o comportamento de um pavimento asfáltico construído, por exemplo, em local de clima como o 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 estruturas diferentes são necessárias para locais diferentes no Brasil, mesmo considerando rigorosamente o mesmo tráfego. Apesar do estudo apresentar os resultados em termos de D_{acm} , não foi encontrado, até o momento de produção deste trabalho, estudos de sensibilidade em termos de %AT.

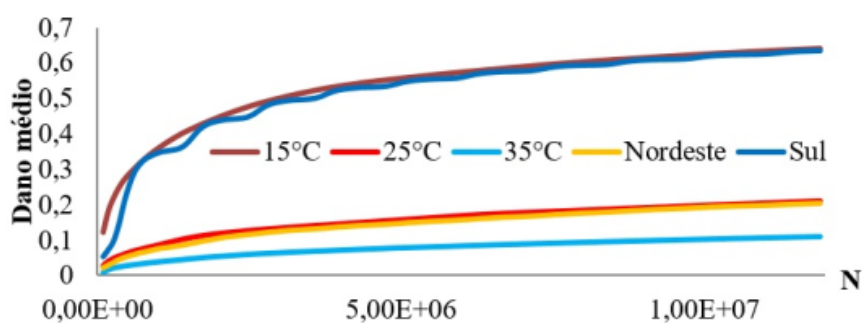


Figura 2. Dano médio em diferentes temperaturas (Santiago *et al.*, 2018)

2.4. Funções de Transferência

O caráter mecânico de um método de dimensionamento consiste, simplificadamente, na inclusão de análise estrutural, que envolve o cálculo de parâmetros como tensões e deformações.

As análises de dano por meio da vida de fadiga também estão inclusas na parte mecanicista das análises. Entretanto, não é possível a associação direta do dano, que ocorre em todo o volume do revestimento asfáltico, com um defeito em campo mensurável em sua superfície. Assim, é necessário que sejam feitas adaptações empíricas, explicadas em mais detalhes adiante.

O dano médio simulado para toda a vida do pavimento, ou seja, 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 ajuste empírico de dados previamente ao ajuste definitivo da função de transferência. O $Dred_s$ resulta da multiplicação do dano médio acumulado no pavimento por um fator de transladação, ou *shift factor* ($Dred_s = D_{médio} \cdot S$). O cálculo de S é advindo de uma equação linear de calibração (*Função S*), que, usualmente na abordagem S-VECD, tem como entrada o número do mês em que o revestimento tem o dano médio de 0,35 atingido ($T_{0,35}$). Este fator advém das análises de Nascimento (2015) e foi também utilizado por Santiago (2017) e Santos (2020). A Função S linear é demonstrado na Equação 8, onde A e B são parâmetros da calibração.

$$S = A(T_{0,35}) + B \quad (8)$$

O $Dred_s$ é, então, confrontado com observações de área trincada em trechos de rodovias em todo o território nacional, de maneira a se obter uma equação empírica chamada de função de correspondência campo-laboratório, ou Função de Transferência. A equação é ajustada com seus parâmetros de calibração (C_1 e C_2), conforme apresentado na Equação 9:

$$\%AT = C_1(Dred_s)^{C_2} \quad (9)$$

Para este trabalho, que se concentra no efeito da temperatura e da velocidade dos veículos na área trincada, não se utilizou uma função erro, que incorporaria o conceito de confiabilidade e a variabilidade dos dados de campo utilizados na calibração. A elaboração de uma função que relacione dados de laboratório com o campo foi possível graças à Rede de Tecnologia em Asfaltos (RTA) da Petrobras, que conglomerou centros de pesquisa nacionais e trechos monitorados, abastecendo uma base de dados responsável por calibrar e validar as funções testadas para sistemas de dimensionamento como o MeDiNa e o CAP3D-D.

O MeDiNa, desenvolvido a partir do SisPav (Franco, 2007), tem uma FT que recebe os dados do dano médio e $Dred_s$ 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), havendo novos estudos voltados à sua atualização (Fritzen *et al.*, 2019). As diferenças essenciais com relação ao CAP3D-D e o LVECD constam na Tabela 1. Recentemente foi proposta uma FT para o FlexPave (Wang *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Comparação entre sistemas de dimensionamento atualmente estudados no Brasil no tocante ao comportamento da mistura asfáltica do revestimento.

Sistema de Dimensionamento	Método de Análise	Rigidez	Fadiga	Varição da Temperatura	Velocidade de Tráfego
MeDiNa	Elástico-Linear	MR	CD	Constante	Constante
LVECD	Viscoelástico	$E(t)^1$	TD	Variável	Variável
CAP3D-D	Elástico-linear variado	$ E^* $	TD	Variável	Variável

¹Obtido a partir da modelagem viscoelástica-linear de resultados de ensaios de módulo complexo (E^*)

As premissas do MeDiNa 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 *softwares* disponíveis que já levam em consideração tais variáveis. Por exemplo o FlexPave da *North Carolina State University* (NCSU), desenvolvido a partir do LVECD, e cuja calibração para trechos nacionais foi apresentada por Nascimento (2015), emprega análise viscoelástica com a utilização de módulos de relaxação para rigidez advindos de dados experimentais do módulo complexo e ensaios de tração-compressão direta para fadiga.

Enquanto isso, o CAP3D-D da UFC emprega análise elástico-linear equivalente, ou seja, simula o efeito da velocidade do tráfego e da temperatura no caráter viscoelástico do material asfáltico variando a rigidez da referida camada e como a mesma afeta o comportamento do pavimento. É importante ressaltar que as calibrações nacionais existentes são realizadas com a mesma base de dados da Rede de Tecnologia em Asfaltos.

3. METODOLOGIA

A análise neste trabalho consiste na avaliação de variações de %AT para variações de temperatura e de velocidade. Para isso, foram fixados os demais parâmetros da estrutura e do carregamento em cada análise. Faz-se necessária a utilização de parâmetros relacionados à viscoelasticidade do material do revestimento, dada a sensibilidade à velocidade e à temperatura, não sendo possível isso ser atendido por meio dos ensaios de rigidez por MR e de fadiga por CD, considerados a uma temperatura única, usualmente 25°C. Portanto, os ensaios usados para parâmetros de rigidez e de fadiga da mistura asfáltica foram, respectivamente, os seguintes: Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e Tração-Compressão Direta (TD) com modelagem S-VECD. Esta composição torna possível se incorporar os efeitos da frequência e da temperatura.

3.1. Ferramenta de cálculo

O CAP3D-D permite 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 (diretamente ligada à velocidade de tráfego). Uma tela de resultados de previsão de área trincada e de afundamento de trilha de roda do programa está disposta na Figura 3. Para mais informações de premissas do programa, o leitor é referido a Santiago *et al.* (2018). Apesar do presente estudo tratar apenas em resultados de fadiga (%AT), salienta-se que o programa já apresenta rotinas de previsão de deformação permanente em termos de afundamento de trilha de roda (ATR) para misturas asfálticas e camadas granulares (Vale, 2019). A versão utilizada para análise é a de Santos (2020).

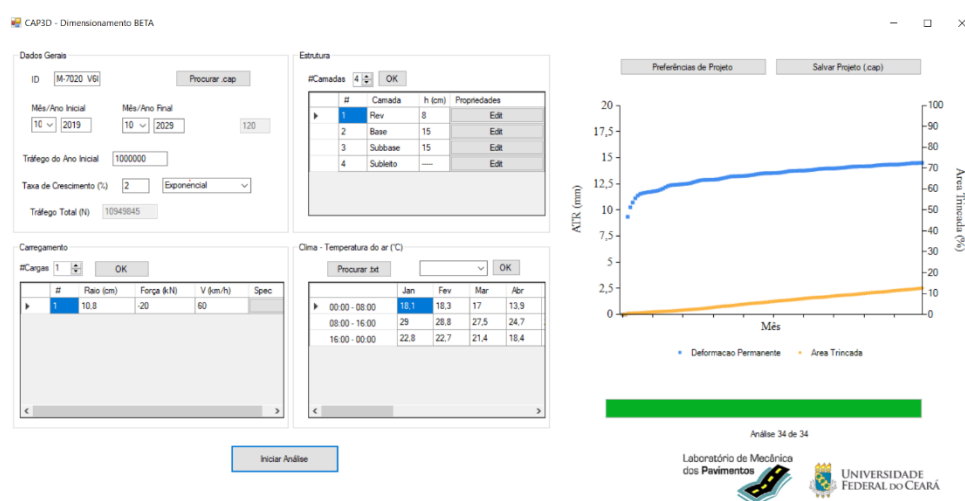


Figura 3. Framework do CAP3D-D

A Função S e a FT utilizadas no presente estudo foram calibradas por Santos (2020) a partir do monitoramento de 23 trechos nacionais da Rede de Tecnologia em Asfalto (RTA). Ambas as funções estão demonstradas nas Equações 10 e 11, respectivamente.

$$S = 0,00281(T_{0,35}) + 0,657 \quad (10)$$

$$\%AT = 17506,3 \left(\frac{N}{N_f red_s} \right)^5 \quad (11)$$

É importante notar que a FT é calibrada para os trechos até então monitorados no Brasil, e que à medida que crescer a quantidade de dados disponíveis, a FT deve ser devidamente atualizada. Igualmente, quando novas premissas e novos modelos de materiais e estrutura forem utilizados, a FT deverá também ser atualizada.

3.2. Tráfego, estrutura do pavimento analisado e misturas investigadas

Os dados estruturais das camadas são condizentes com a realidade de tráfego inicial de $N=10^6$ eixos padrões em 1 ano. Admitiu-se um crescimento exponencial do tráfego por ano de 2,0%, e foram realizadas simulações para 120 meses, resultando em um tráfego acumulado de $1,1 \cdot 10^7$. Os principais dados estruturais constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados estruturais das camadas testadas

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

Quatro misturas asfálticas foram selecionadas para as análises, tendo sido ensaiadas pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez (Cenpes) da Petrobras Módulo Dinâmico para rigidez e Tração-compressão Direta (TD) para fadiga. As misturas foram selecionadas segundo a metodologia utilizada por Oliveira (2019b), que estudou a vida de fadiga em diversas misturas à luz da modelagem S-VECD, e têm agregados de mesma origem (Sepetiba, RJ). Os principais resultados referentes à caracterização dos agregados e ligantes estão dispostos na Tabela . Os dados de modelagem S-VECD aplicada aos ensaios de fadiga realizados nesses materiais são apresentados na

Tabela, e os resultados de N_f calculados conforme Equação 4 para uma frequência de 10Hz, diferentes temperaturas, e deformação de 150 *micro-strains*, além dos valores de k_1 e k_2 para a clássica equação de ajuste das curvas de Wöhler $N_f = k_1 \cdot \epsilon_{o,pp}^{k_2}$, onde $\epsilon_{o,pp}$ é a amplitude de deformação (pico-a-pico), constam na

Tabela .

Tabela 3 – Dados de agregados e ligantes utilizados nas misturas analisadas

Mistura	Agregados			Ligantes		
	TMN (mm)	VAM (%)	RBV (%)	CAP	Teor (%)	Vv (%)
M1	19,0	13,9	70,8	50/70	5,0	4,0
M2	12,7	14,8	73,0	50/70	5,5	4,0
M3	12,7	14,8	73,0	30/45	5,5	4,0
M4	19,0	13,7	71,0	30/45	5,0	4,0

Os dados de rigidez se resumem aos parâmetros da curva sigmoideal 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 . Os parâmetros a , b , d e g são obtidos a partir do ensaio de $|E^*|$ e obtidos pela Equação 12: f_r é a frequência reduzida, obtida da aplicação dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 , como demonstrado na Equação 13 (polinomial), em que “ x ” é a temperatura do material em graus Celsius. Os valores de módulo obtidos em 19°C e 25°C a uma frequência de 10Hz também são apresentados na referida Tabela.

Tabela 4 – Parâmetros de dano à luz do modelo S-VECD das misturas analisadas

Mistura	C(S)			Gr(N _f)	
	C ₁₁	C ₁₂	α	γ	δ
M1	0,00015	0,757688	2,86	1,59E+06	-1,214
M2	0,00013	0,745610	3,42	15,16E+06	-1,417
M3	0,00016	0,727992	3,12	2,32E+06	-1,255
M4	0,00007	0,811661	2,71	4.67E+06	-1,348

Tabela 5 – Parâmetros de vida de fadiga ($N_f = k_1 \cdot \epsilon_{o,pp}^{k_2}$) a 10 Hz em diferentes temperaturas , além do valor de N_f para $\epsilon_{o,pp}=150$ micro-strains

Mistura	15°C		N _f @19°C		N _f @25°C		N _f @30°C		
	k ₁	N _f	k ₁	N _f	k ₁	N _f	k ₁	N _f	k ₂
M1	4060	4,79E+04	596	6,02E+04	785	8,01E+05	1597	1,20E+07	-0,145
M2	803	1,67E+04	818	1,85E+04	1085	9,55E+04	1518	6,69E+05	-0,173
M3	842	1,41E+05	928	2,74E+05	1431	5,36E+06	2310	1,44E+08	-0,146
M4	899	2,40E+04	923	2,07E+04	1160	8,52E+04	1616	5,35E+05	-0,180

Tabela 6 – Dados de rigidez dados pelo Módulo Dinâmico das misturas testadas

Mistura	Parâmetros curva sigmoideal				Shift Factor t-T			$ E^* (MPa) $	$ E^* (MPa) $
	a	b	d	g	a1	a2	a3	@19°C;10Hz	@25°C;10Hz
M1	1,306	3,048	0,878	0,731	9,81E-05	-0,173	3,06	12315	8220
M2	0,260	4,206	1,341	0,480	8,65E-04	-0,175	3,15	12354	7886
M3	0,320	4,089	1,698	0,584	7,77E-05	-0,183	3,35	10938	6878
M4	0,409	4,113	1,077	0,458	9,01E-05	-0,179	3,21	15492	11601

$$\text{Log}|E^*| = a + \frac{b}{1 + e^{d+g \cdot \log(f_r)}} \quad (12)$$

$$\text{Log}(f_r) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (13)$$

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 conforme o clima da região investigada. As temperaturas variadas foram referentes as Regiões Nordeste e Sul do Brasil. Foram usados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para temperaturas médias compensadas da série histórica entre 1989 e 2010, 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 7. Escolheu-se as duas regiões do Brasil por apresentarem grande variação em latitude, o que permite uma diferenciação entre as temperaturas médias. Foram escolhidas as velocidades de 10, 35, 60, 90km/h para as análises. A velocidade de 10km/h repre-

senta um trecho urbano de rodovia em lentidão, enquanto a velocidade de 90km/h o limite máximo permitido por lei para veículos de carga em rodovias de pista dupla.

Tabela 7 – Dados climáticos para diferentes regiões do Brasil por turno.

	Turno	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Nordeste (média de 25,4°C)	0h - 8h	21,2	21,5	21,1	21,3	20,5	19,4	18,8	18,9	19,7	20,9	21,1	21,5
	8h - 16h	31,4	31,0	30,3	30,2	29,8	29,2	29,2	30,3	31,4	32,1	32,1	31,8
	16h - 0h	25,7	25,5	25,3	25,0	24,3	23,5	23,1	23,7	24,8	25,7	25,6	25,9
Sul (média de 18,8°C)	0h - 8h	18,1	18,3	17,0	13,9	11,2	9,3	9,3	10,0	11,7	13,4	14,9	16,6
	8h - 16h	29,0	28,8	27,5	24,7	22,0	19,7	19,9	20,9	22,3	24,3	25,9	27,5
	16h - 0h	22,8	22,7	21,4	18,4	15,8	13,7	13,8	14,7	16,3	18,2	20,2	21,9

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise em diferentes velocidades para cenários de temperaturas constantes. Cenários de diferentes velocidades (eixo x) em 5 condições de temperatura durante todo o período de análise, i.e., constantes de 10, 20 e 30°C, bem como representantes das Regiões Sul e Nordeste, para as misturas M1, M2, M3 e M4, constam na Figura 4. No eixo y, apresentam-se os resultados de %AT para o final de 120 meses, com confiabilidade de 50%, ou seja, a média esperada de área trincada, sem considerar as variabilidades encontradas durante a calibração dos modelos utilizados.

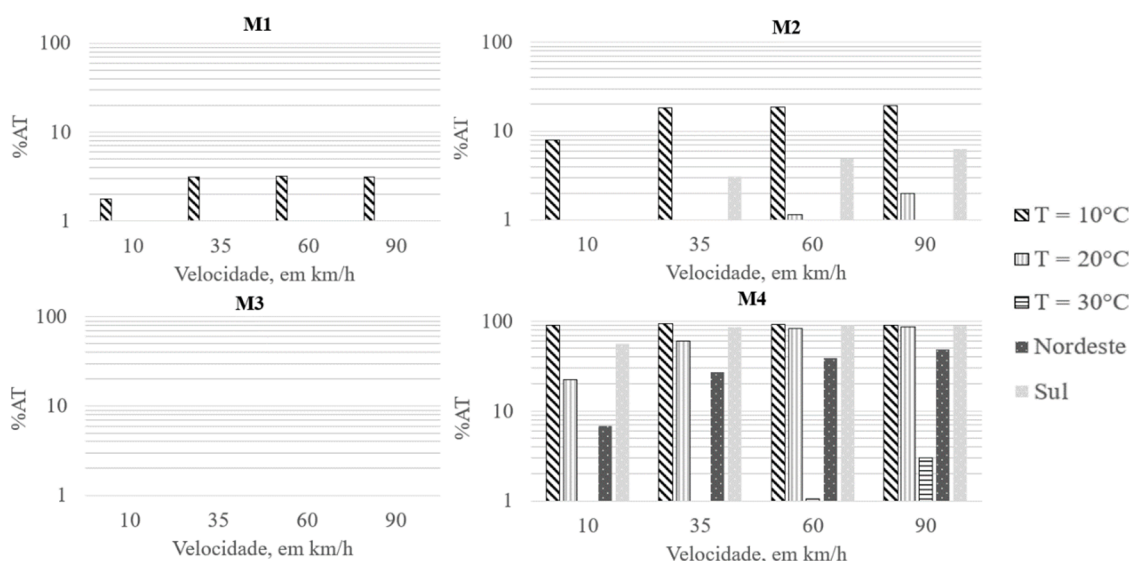


Figura 4. Resultados de %AT ao fim de 120 meses de tráfego para cenários de temperaturas e velocidades variadas

A mistura M3 demonstrou pequenos valores de %AT, ao passo que M4 apresentou elevados níveis desse parâmetro. De maneira geral, as misturas tenderam a apresentar maior trincamento em cenários de menor temperatura e maior velocidade. Observando apenas cenários de temperaturas distintas em mesma velocidade, a variação é de 9 vezes entre a mistura menos sensível (M3) a 90 vezes na mistura mais sensível (M4) para variações entre 30°C e 10°C. Fazendo uma comparação entre as temperaturas das regiões Nordeste e Sul na mistura medianamente sensível (M2), a variação de %AT final é de 4 vezes para a velocidade de 10km/h e 15 vezes para 90km/h, sempre com a Região Sul apresentando maiores níveis de trincamento.

Para uma comparação entre as velocidades em uma mesma temperatura, tem-se variações entre 1,6 vez a 6 vezes, variando de 10 a 90 km/h, nas misturas menos e mais sensíveis, respectivamente (M4 e M2). Dentro do cenário estudado, é evidenciada uma sensibilidade maior à variação de temperatura do que de velocidade, apesar de em alguns casos, como observados na M4, a variação de velocidade entre 10 e 90km/h ter proporcionado efeitos semelhantes entre a troca da Região entre Nordeste e Sudeste.

A análise vai na mesma direção da obtida por Santiago *et al.* (2018) para os dados de Dano Médio em diferentes cenários de temperatura e velocidade para uma mesma mistura. Os resultados em %AT transmitem a importância de se levar em consideração tais parâmetros em análises, visto que o defeito em termos de %AT é o balizador do sistema de dimensionamento atual. Ressalta-se, todavia, como demonstrado por Santos (2020), que os trechos utilizados para calibração da FT usada neste estudo não apresentaram elevados valores de %AT. Assim, resultados de %AT muito altos podem estar fora do domínio de trechos para o qual a FT foi calibrada, podendo gerar incertezas de modelagem. Entretanto, mesmo nas misturas que não apresentaram demasiado trincamento (M1, M2 e M3), os efeitos das variações de velocidade e de temperatura na %AT final são evidentes. É importante ter em mente, também, que o cenário de temperatura constante de 10°C, testado em análises durante todo o ano, é um extremo para a realidade brasileira, que tende a variar durante todo o ano em amplitudes de até 25°C, e que a FT pode não se adequar, dada a ausência de trechos experimentais reais para a calibração nessas condições apenas teóricas de temperatura constante.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a temperatura e a velocidade de passagem de veículos têm relevância na previsão de área trincada em pavimentos asfálticos. Elas demonstram que um pavimento aparentemente bem dimensionado para um clima pode trincar precocemente em outro. Além disso, diferentes misturas apresentaram diferentes níveis de trincamento previstos, bem como diferentes sensibilidades às variações de temperatura e velocidade. Essas diferenças se dão através do impacto da temperatura e da velocidade de tráfego em duas propriedades no revestimento asfáltico (rigidez e resistência à fadiga). Apesar de ser possível uma comparação normalizada entre a contribuição da fadiga ou da rigidez no trincamento do pavimento, separadamente, outros fatores como estrutura do pavimento como um todo e níveis de tráfego podem afetar a análise, tornando complexa esse tipo de checagem. Faz-se a recomendação do estudo detalhado da separação dessas contribuições em trabalhos futuros.

Foi observado que um mesmo pavimento, mantendo-se rigorosamente os demais parâmetros de simulação – rigidez, fadiga, espessuras das camadas e tráfego – foi sensivelmente afetado em termos de trincamento pela simples mudança de região (Nordeste ou Sul), reforçando a importância de se levar em consideração esse tipo de variável em um sistema de dimensionamento de âmbito nacional. Ressalta-se a importância da incorporação de ensaios que possibilitem a inclusão de análises viscoelásticas, característica intrínseca do ligante asfáltico que se manifesta fortemente no pavimento, como demonstrado tanto em análise mecanicista de tensões e deformações, como num dimensionamento mecanístico-empírico. Sugere-se, por fim, que além do incremento da base de dados envolvendo trechos, faça-se o acompanhamento de dados de clima e de velocidade operacional dos veículos. Isso eventualmente proporcionará múltiplas FTs calibradas e validadas para diversas situações de clima e tráfego específicas, o que pode contribuir

na capacidade de predição dos modelos adotados no Brasil. A análise sobre as FTs mais apropriadas, como em vários casos do avanço do conhecimento, será possível apenas retrospectivamente. Porém, é essencial que as previsões abram novos caminhos para a pesquisa. Aí reside parte da importância de se implantar um método mecanístico-empírico.

REFERÊNCIAS

- Araújo, C.B.C. (2019) Gestão Integrada de Infraestrutura Civil em Ambiente Urbano. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- 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 pp. 85-94. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.898
- 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, pp. 303-314. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.008
- 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*, Vol. 4: pp. 497-506. DOI: 10.1007/978-94-007-4566-7_48
- 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, RJ.
- 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, RJ.
- 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. ISSN: 0270-2932
- 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. (2003) *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2019) Normais climatológicas. 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. (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*.
- Lemaitre, J. (1996) *A course on damage mechanics*, 2nd edition. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-18255-6
- Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos pavimentos*. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ. ISBN: 9788571933668
- Motta, L.M.G.; Leite, L.F.M.; Franco, F.A.C.P.; Silva, C.F.S.C.; Medina, J. (2018) Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Convênio UFRJ/DNIT.
- Nascimento, L. A. H. (2015) Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. *Tese (Doutorado Civil Engineering)*. North Carolina State University. Raleigh-USA.
- Nascimento, L. A. H. (2016) Apresentação realizada no Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- 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-USA.
- Oliveira, L. S. de (2019) Efeito dos Períodos de Repouso no Ensaio de Fadiga em Misturas Asfálticas e em Ligantes. *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Oliveira, J. A. (2019) Avaliação do Impacto da Metodologia FAD-CI de Seleção Granulométrica na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- 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*. DOI: 10.31141/2447-13

- 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. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1446
- Santos, A. B. V (2020) Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Schapery, R. A. (1990) A Theory of Mechanical Behavior of Elastic Media with Growing Damage and Other Changes in Structure. *Journal of Mechanics of Physical Solids*, Vol. 38, pp. 215-253. DOI: 10.1016/0022-5096(90)90035-3
- Wang, Y. D.; Underwood, B. S.; Kim, Y. R. (2020) Development of preliminary transfer functions for performance prediction in FlexPAVE. *Construction and Building Materials*, v. 266, parte B. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121182
- Soares, J.B.; Motta, L.M. (2001) Considerações sobre a Determinação do Fator de Veículo no Cálculo do Número N. *Congresso de Ensino e Pesquisa e Ensino em Transportes*, 15. 2001. Campinas, SP p. 381-389.
- Soares, J. B. (2020) Reflexões sobre um Programa de Pesquisa Científica para a Infraestrutura Viária do Brasil. *Aceito para publicação na Revista Transportes*.
- Specht, L. P.; Babadopulos, L. F. A. L.; Benedetto, H. Di; Sauzéat, C.; e Soares, J. S. (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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037
- Underwood, B.S.; Baek, C.; Kim, Y.R. (2012) Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. *Transportation Research Record*. DOI: 10.3141/2296-04
- Vale, A. C. F. (2019) Analysis of the evolution of permanent deformation of asphalt mixtures using the Stress Sweep Rutting (SSR) test methodology. *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Yoder, E.J.; Witczak M.W. (1975) *Principles of Pavement Design*, 2nd Edition, Wiley. ISBN: 9780471977803