

INFLUÊNCIA DE SOBRECARGAS NA ANÁLISE E NA PREVISÃO DE DESEMPENHO QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Anthony Belo Vasconcelos Santos

Juceline Batista dos Santos Bastos

Jorge Soares Barbosa

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia de Transportes / Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

RESUMO

A deformação permanente em revestimentos asfálticos é um defeito recorrente no cenário nacional, apresentando-se, muitas vezes, após a liberação para o tráfego em rodovias recém-construídas. A sobrecarga veicular tem impacto no surgimento deste tipo de defeito. Nesta pesquisa são analisadas estruturas do revestimento em situações de sobrecarga do eixo simples de roda dupla e são previstos afundamentos no pavimento utilizando-se o *Shift Model*, considerando variações de sobrecargas do eixo simples de roda dupla e do eixo tandem duplo. Os resultados apontam para um incremento significativo das tensões desvio no ponto crítico de deformações para as sobrecargas impostas, bem como um aumento significativo dos valores de afundamentos simulados nas camadas de um pavimento.

ABSTRACT

Rutting in asphaltic surface courses is a common distress in national highways, and it can be detected in the first weeks or months after traffic opening in newly constructed roadways. Vehicle overload has an impact on such early pavement distresses. On this study, structural analyzes are performed on surface courses in situations of overloading. An analysis is also performed with the Shift Model to predict rutting from simulations of overloads of the dual tire single and tandem axle. The results show a significant increase of deviator stresses at the critical point of deformation for the investigated overloads, as well as an increase at the final rutting values for each pavement layer.

1. INTRODUÇÃO

Diferentemente das trincas por fadiga, que geralmente surgem ao final da vida útil do pavimento, as deformações permanentes tendem a aparecer nos primeiros anos de serviço da rodovia, ou até nas primeiras semanas, evidenciando uma ocorrência prematura e duradoura em toda a vida útil do pavimento (Nascimento, 2008).

No Brasil, a resistência à deformação permanente em misturas asfálticas é comumente determinada laboratorialmente por meio do parâmetro *FN* (*Flow Number*, ou número de fluxo), com procedimento regido pela NBR 16505 (ABNT, 2016). O ensaio permite qualificar a mistura asfáltica quanto à resistência ao cisalhamento a volume constante (ruptura plástica, ou deformação permanente). Pela Mecânica dos Pavimentos, as previsões das deformações dependem tanto das características da estrutura do pavimento como das solicitações as quais o mesmo estará sujeito, realizadas a partir de análises mecânicas utilizando-se modelos estabelecidos. A partir de ensaios triaxiais de varredura de tensões (*TSS*) (Choi, 2013), dados de rigidez das misturas e monitoramento em trechos de rodovias, é possível obter parâmetros de previsão de desempenho das deformações por meio do *Shift Model*, incorporado ao FlexPave, que utiliza a abordagem *LVECD* (*Layered Viscoelastic Continuum Damage*).

Uma dificuldade para a aplicação do modelo, porém, está na adequada previsão do tráfego ao qual o pavimento estará sujeito: sobrecargas em rodovias nacionais são fatores recorrentes e que influenciam nos resultados de análises. Outra dificuldade é a calibração do modelo para misturas asfálticas nacionais, dada a necessidade de dados de monitoramentos de trechos e ensaios triaxiais exigidos (Bastos *et al.*, 2015).

No cenário nacional, a sobrecarga veicular tem favorecido o surgimento de defeitos precoces em rodovias (Albano, 1998). O excesso de carga faz com que maiores valores de tensões sejam transmitidos ao pavimento, fazendo com que parâmetros de projeto inicialmente considerados sejam extrapolados e, por conseguinte, atinja-se prematuramente o número de solicitações para o qual o pavimento foi projetado (Soares e Motta, 2001; Fontenele *et al.*, 2014).

Dessa forma, é necessário investigar os efeitos dos incrementos de tensões, tendo em vista as sobrecargas veiculares, na previsão de defeitos como a evolução da deformação permanente de pavimentos asfálticos. O presente trabalho tem como objetivo determinar a relação entre as sobrecargas veiculares e seus efeitos na estrutura do pavimento, especificamente na alteração das tensões e evolução das deformações permanentes com o tempo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Deformação permanente em revestimentos asfálticos

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material e do dano neste material, apresentando-se, predominantemente, de duas maneiras: densificação (afundamento por consolidação) e deformação lateral por cisalhamento (afundamento plástico).

Tanto a qualidade de projeto e execução da mistura (dosagem, mistura e compactação) quanto efeitos externos (clima e tráfego) podem influenciar no surgimento de afundamentos em revestimentos asfálticos. Dentre os fatores relacionados a agentes externos, podem-se citar: excesso de carga, sendo este recorrente no cenário nacional e responsável também por afundamentos das camadas granulares e do subleito (Albano, 1998; Fontenele *et al.*, 2014); e o efeito de altas temperaturas, já que a falha ocorre devido a fluxos do material (viscoplástico), sobretudo em temperaturas superiores a 60°C (Medina e Motta, 2015).

2.2. Caracterização de misturas asfálticas quanto a deformação permanente

A caracterização de misturas asfálticas quanto à deformação permanente tem sido estudada nacionalmente há bastante tempo (Motta *et al.*, 1996; Nascimento, 2008; Onofre, 2012; Bastos, 2016b). Nascimento (2008) apresentou o ensaio uniaxial de carga repetida, com procedimento originalmente desenvolvido nos Estados Unidos e apresentado no relatório 465 do NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) (Witczak *et al.*, 2002). De acordo com o referido relatório, o *FN* é o parâmetro que melhor relaciona dados do ensaio uniaxial de carga repetida com dados de deformações permanente em campo, apresentando correlações, definidas pelo coeficiente R^2 , na ordem de 0,90 ou superiores. A Tabela 1 expõe faixas de valor do *FN* adequadas para cada tipo de tráfego (Bastos *et al.*, 2017a).

Tabela 1: Critérios de *FN* para diferentes níveis de tráfego

Pesquisas / Níveis de Tráfego (Número N)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
				$3 \cdot 10^6$	$[3 \cdot 10^6; 1 \cdot 10^7]$	$[1 \cdot 10^7; 3 \cdot 10^7]$	$> 3 \cdot 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	--	300	750	--
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600	--	53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
Bastos <i>et al.</i> (2017)	5,0 a 7,5	60,0	204	--	100	300	> 1000

Nota-se diferença nas tensões desvio entre os protocolos de ensaio apresentados. O valor de 204kPa na tensão do ensaio uniaxial de carga repetida proposto por Nascimento (2008) foi resultado de testes experimentais com 16 misturas asfálticas nacionais à temperatura de 60°C, e não a 54,4°C como proposto por Witczak *et al.* (2002), justificando a redução de tensão no

ensaio quando comparado ao 600kPa proposto em outros protocolos. A NBR 16505 (ABNT, 2016) traz o valor de 204kPa como tensão axial de ensaio. Witczak *et al.* (2002) recomendam a utilização da tensão desvio de valores entre 69kPa e 204kPa no *creep* estático sem confinamento. Ressalta-se a necessidade de entendimento das tensões desvio e temperaturas aplicadas no ensaio e seus verdadeiros impactos nas qualidades dos resultados.

Bastos *et al.* (2016b) comentam sobre o ensaio triaxial de varredura de tensões, atualmente não protocolado no Brasil. O *TSS* é um ensaio de carga de compressão cíclica com capacidade de obtenção de parâmetros de deformabilidade da mistura úteis como *inputs* em modelos de predição de afundamentos em campo, como o *Shift Model*. A dificuldade de execução de ensaio e a necessidade de obtenção de dados de campo (monitoramento de trechos) ainda limita sua aplicabilidade e difusão em meio nacional.

2.3. Situação de sobrecarga veicular no Brasil

Uma das dificuldades de utilização de modelos de previsão de defeitos em campo, seja para determinação da área trincada ou afundamentos de trilha de roda, é a real quantificação das solicitações de tráfego às quais o pavimento estará sujeito durante sua vida útil. A incorporação de dados reais de carregamento é fundamental para a correta realização de análises, sejam estruturais ou de dimensionamento.

O cenário de sobrecarga veicular nacional é preocupante. Soares e Motta (2001) apresentam dados que demonstram excesso de peso em 20,8% entre caminhões médios, 16,3% entre caminhões pesados e 49,1% em reboques para amostragens aleatórias realizadas na região Nordeste do país. Os autores também apontam uma sobrecarga de 7,8% em 17,3% dos veículos pesados no estado do Ceará. Os valores condizem com outro estudo que aponta para um valor de sobrecarga de caminhões em rodovias no Brasil entre 10% e 30% (Fernandes Jr., 1994). Um estudo recente realizado no Paraná, especificamente na rodovia BR 153 no trecho do quilômetro 5 e BR 369 no trecho do km 10, Fontenele *et al.* (2014) apresentam dados de pesagem, analisando os veículos com excesso de peso. Foi detectado um sobrepeso de 16% em carretas, 12% em caminhões e ônibus e 11% em veículos especiais.

Recentemente o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) publicou uma nova resolução alterando os limites de tolerância de carregamento de veículos comerciais de carga no Brasil. A nova tolerância é 10% acima do valor limite de carregamento do eixo (BRASIL, 2015). Assim, o ESRD, por exemplo, passa a ter limite tolerável de 11tf (10tf + 10% de tolerância). Anteriormente à resolução o limite era de 7,5%. A alteração do limite da tolerância aumenta a relevância do entendimento dos efeitos das sobrecargas na estrutura de um pavimento, dada a maior margem de carregamento disponível aos transportadores.

2.4. Análise estrutural e modelos de previsão da deformação permanente

Com o avanço do novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos no Brasil, fica mais evidente a necessidade de entendimento das sobrecargas a partir de análises estruturais de tensões e deformações em modelos computacionais mais sofisticados. As análises de tensões nas camadas do pavimento podem ser calculadas a partir de programas computacionais com modelos consagrados já incorporados, como, por exemplo, a ferramenta AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) do software SisPav.

De acordo com Gibson e Schwartz (2006), as deformações permanentes no revestimento são máximas no chamado ponto crítico de deformações viscoplásticas, localizado próximo às bordas dos pneus a uma profundidade de aproximadamente metade da espessura total do revestimento (Figura 1).

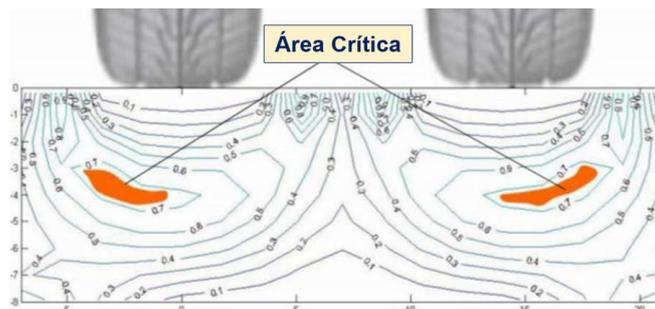


Figura 1: Área crítica de deformações no revestimento.

Objetivando a análise das tensões verticais no ponto crítico é possível a realização do cálculo da tensão desvio (σ_d), associada às deformações plásticas verticais no revestimento, a partir de equações que incorporam o estado de tensões do material viscoelástico. O estado de tensões pode fornecer também os valores das tensões confinantes no material asfáltico (Choi, 2013). Para o cálculo das tensões desvio e confinante são utilizadas as Equações 1 e 2 apresentadas por Perzyna (1966).

$$\sigma_c = \frac{I_1}{3} + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_d = \frac{1}{\sqrt{2}} + \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

Em que σ_c : Tensão confinante;
 I_1 : Primeiro invariante de tensões;
 σ_1, σ_2 e σ_3 : Tensões principais;
 σ_d : Tensão desvio com valor igual a $(3/\sqrt{2})\tau_{oc}$.

A tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oc}) pode ser escrita em função do segundo invariante de tensões (J_2 , $\tau_{oc} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2}$). J_2 , por sua vez, pode ser calculado como demonstrado na Equação 3.

$$J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2. \quad (3)$$

A obtenção da tensão desvio e de confinamento no ponto crítico de deformações pode levar a análises críticas quanto às tensões desvio e confinante aplicadas em ensaios triaxiais em misturas asfálticas, por exemplo. As análises estruturais contribuem também para o melhor entendimento do comportamento do material em campo e podem levar a estudos de fatores campo-laboratório mais acurados. Podem levar ainda ao melhor entendimento da discrepância das tensões desvio em protocolos internacionais da realização do ensaio uniaxial de carga repetida (Tabela 1).

No âmbito da previsão da deformação permanente em campo, o *Shift Model* (Equações 4, 5 e 6), derivado do modelo incremental viscoplástico (Subramanian, 2011; Choi, 2013), é incorporado em programas computacionais, como o FlexPave 1.0. O principal objetivo de utilização do *Shift Model* é prever a deformação permanente a partir de propriedades viscoelásticas do material. O ensaio *TSS*, utilizado para a aplicação do modelo, é realizado em duas etapas: um ensaio de referência (*TRLPD*) e um ensaio de varredura de múltiplas tensões (*MSS*). A primeira etapa objetiva identificar a curva de referência de deformação axial por número de ciclos de carregamento, e a segunda etapa objetiva a obtenção dos parâmetros de deformação, como a curva mestra de deformações viscoplásticas.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 N_{red}}{(N_1 + N_{red})^\beta} \quad (4)$$

$$a_{\varepsilon p} = p_1 \log(\xi_p) + p_2 \quad (5)$$

$$a_{\sigma p} = d_1 \left(\frac{\sigma_v}{Pa} \right)^{d_2} \quad (6)$$

Em que ε_0 , N_1 e β :	Coefficientes da curva mestra de deformação viscoplástica;
N_{red} :	Número reduzido de ciclos para um dado histórico de carregamento e igual ao número de ciclos físicos (N) do teste de referência;
$a_{\varepsilon v}$:	Função de transferência do tempo reduzido de carregamentos;
$a_{\sigma v}$:	Função de transferência da tensão vertical;
ξ_p :	Tempo de carga reduzida (em segundos);
p_1 e p_2 :	Parâmetros de ajuste da função de tempo reduzido de carregamento;
σ_v :	Tensão vertical ($\sigma_d + \sigma_c$, do ensaio <i>TSS</i>);
Pa :	Pressão atmosférica;
d_1 e d_2 :	Parâmetros de ajuste da função de tensões verticais.

Para melhor entendimento dos parâmetros do *Shift Model*, recomenda-se a leitura do trabalho de Choi e Kim (2014). Bastos *et al.* (2015) comentam sobre a necessidade de calibração do *Shift Model* para misturas asfálticas de diversas regiões do Brasil, sendo algo perseguindo hoje em projetos de pesquisa nacionais.

Programas de análise da evolução de danos utilizam, dentro outros métodos, elementos finitos 3D para a realização de análises estruturais do pavimento sob cargas em movimento ou estáticas. O MEF 3D do FlexPave leva em consideração propriedades viscoelásticas não lineares das camadas do pavimento sob cargas dinâmicas. Os efeitos do clima são incorporados a partir do *Enhanced Integrated Climatic Model (EICM)*. A ferramenta apresenta elevado potencial de predição e é utilizado por órgãos norte-americanos, como a *Federal Highway Administration (FHWA)* (Bastos *et al.*, 2017b).

3. METODOLOGIA

3.1. Análises de tensões no ponto crítico de deformação do revestimento

Utilizou-se a ferramenta AEMC do SisPav (versão de 2007) para análises de tensões. Foi testada a sobrecarga veicular com o eixo simples de rodas duplas (ESRD), nas situações de carregamento padrão (8,2tf), de carga máxima de acordo com a lei da balança (10tf) e com o valor de sobrecarga comum encontrada no país (12tf) (Soares e Motta, 2001).

Foram necessárias adaptações quanto aos dados de pressão de enchimento dos pneus inseridos no programa, considerada 0,56MPa como padrão, pois a área de contato pneu-pavimento obtida pelo software não era correspondente com a área de contato obtida em experimentos reais (Albano, 1998). Observou-se também que para um determinado carregamento e pressão de inflação o programa define uma área de contato circular que proporciona uma tensão (carregamento da roda dividido pela área de contato) equivalente a mesma pressão de inflação inserida. Essa premissa admite que a tensão de contato pneu-pavimento é igual à pressão de inflação do pneu, e não representa a situação em campo (Kim *et al.*, 1988), consistindo em uma aproximação. O valor da pressão de enchimento a ser inserida no AEMC, portanto, foi definido

de acordo com o valor que correspondesse à área de contato proveniente dos experimentos de Albano (1998), utilizando dados reais de área de contato em campo para diversos carregamentos do ESRD (Tabela 2).

Tabela 2: Adaptações à área de contato roda-pavimento no programa AEMC

Carregamento (tf)	Pressão de enchimento inserida no AEMC (MPa)	Área de contato antes do ajuste, com pressão de inflação de 0,56MPa (cm ²)	Área de contato após ajuste (cm ²)
8,2	0,51154	366,07	400,75
10	0,57814	446,43	432,42
12	0,64099	535,71	468,02

A comparação entre a área de contato pneu-pavimento real e a que pode ser considerada como padrão em softwares de dimensionamento atuais enaltecem a necessidade de avaliação, por parte do projetista, quanto aos parâmetros de entrada de pressão a serem utilizados para fins de análises estruturais e de dimensionamento.

Os parâmetros de rigidez, as espessuras e os coeficientes de Poisson das camadas inseridos no programa estão dispostos na Tabela 3. Os valores dos módulos de resiliência, espessuras e coeficientes de Poisson da base, sub-base e subleito são definidos a partir de estudo desenvolvido por Bastos *et al.* (2016a) no programa CAP3D (Holanda *et al.*, 2006).

Tabela 3: Parâmetros de rigidez das camadas inseridos no AEMC

Propriedades e parâmetros das camadas no AEMC			
Camada	Coefficiente de Poisson	MR (MPa)	Espessura (cm)
Revestimento	0,30	4.000	5,0
Base	0,35	500	15,0
Sub-base	0,35	300	15,0
Subleito	0,40	150	--

Foram calculadas as tensões na direção x, y e z e nos planos xy, xz e yz (Figura 2). São inseridos 1530 pontos no programa, discretizados ao longo de 60cm na direção x e 40cm na direção y. A malha no plano citado varia em pontos afastados de 5 em 5cm. A profundidade z é analisada variando de 0,5 em 0,5cm.

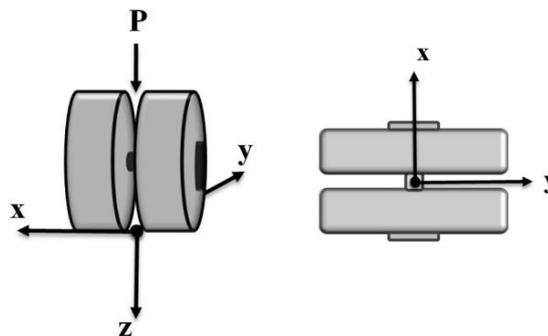


Figura 2: Orientação dos eixos x, y e z no programa.

Ao final, é obtido o estado de tensões no ponto crítico de deformações viscoplásticas do revestimento, aproximadamente no meio da camada de revestimento e próximo à borda do pneu (Gibson e Schwartz, 2006), nas direções x, y e z, e nos planos xy, xz e yz. Com o estado de tensões obtido, é calculada a tensão desvio, associada às deformações plásticas verticais, por meio das equações 1 e 2.

3.2. Análise da evolução da deformação permanente

A evolução da deformação permanente no pavimento submetido a diversos carregamentos foi avaliada por meio do *Shift Model* incorporado no programa FlexPave em sua versão 1.0. A interface do programa é mostrada na Figura 3.

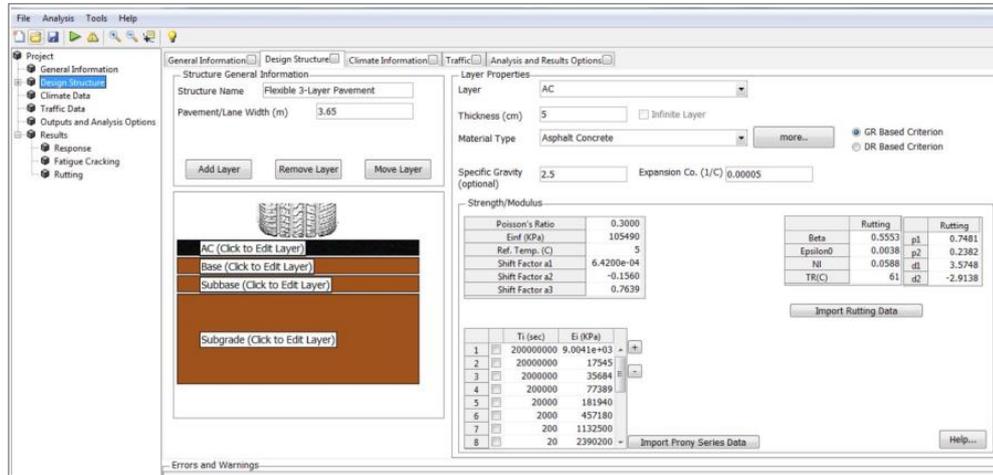


Figura 3: Interface do FlexPave 1.0.

Foi realizada a simulação de 10 anos de tráfego em pavimento de 3,65m de largura, com camadas de mesma espessura das utilizadas no programa AEMC (ver Tabela 3). O tráfego corresponde a passagem diária de 700 ESRD com incremento linear anual de 3%. Dois tipos de eixo foram testados: ESRD e tandem duplo. O ESRD foi submetido às cargas de 8,2tf, 10tf (limite na lei da balança), 12tf e 13tf. O eixo tandem duplo foi submetido às cargas de 17tf (limite na lei da balança) e 19,9tf (17% de sobrecarga). Os valores de carregamento acima do limite foram definidos conforme levantamento de valores de sobrecarga praticados no Brasil para esses tipos de eixo (Soares e Motta, 2001 e Fontenele *et al.*, 2011).

Os parâmetros de rigidez e do *Shift Model* da mistura asfáltica usados tiveram valores correspondentes ao *default* disponibilizado no programa, advindo de experimentos em misturas asfálticas norte-americanas. Os parâmetros de rigidez das demais camadas e subleito foram inseridos conforme valores utilizados no AEMC (MR e Poisson, ver Tabela 3). Os valores dos parâmetros do *Shift Model* e de rigidez (curva mestra) da mistura asfáltica estão dispostos na Figura 4.

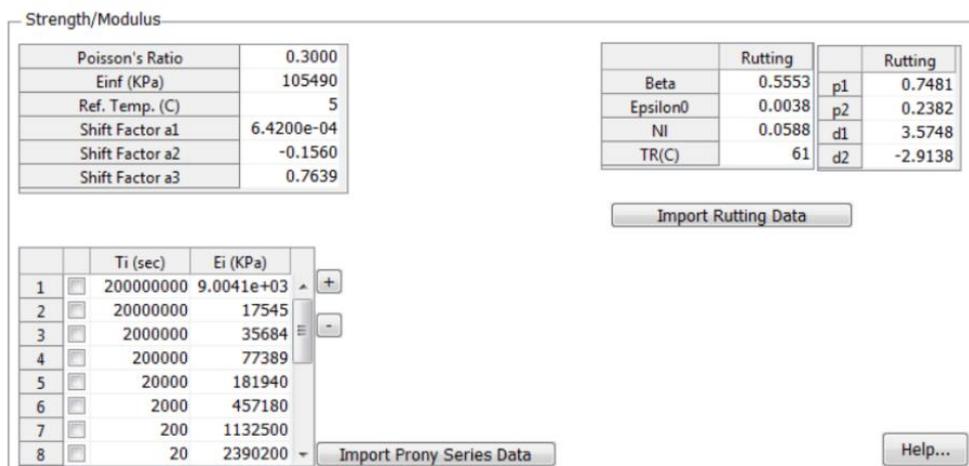


Figura 4: Parâmetros de rigidez e do *Shift Model* inseridos no FlexPave.

O clima simulado foi o correspondente à cidade de Miami, Estados Unidos, com dados disponibilizados no *default* do programa. A escolha da cidade justifica-se pela ausência de modelos de temperatura para cidades brasileiras e pela melhor aproximação aos climas brasileiros, dentre as cidades norte-americanas testadas. Os valores de temperatura por profundidade do pavimento para diferentes horários do dia estão dispostos na Figura 5.

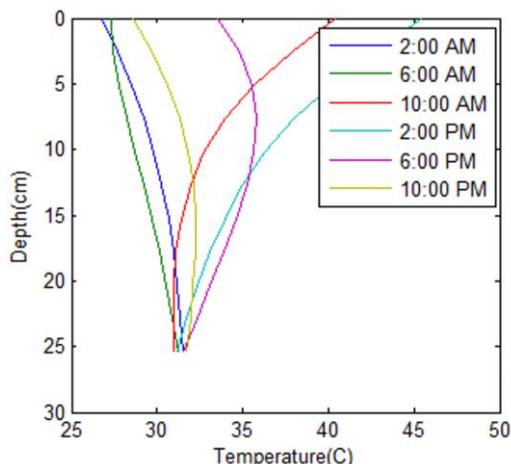


Figura 5: Variação da temperatura por profundidade no pavimento.

Mostra-se interessante o desenvolvimento, no Brasil, de um banco de dados com as temperaturas no interior de revestimentos asfálticos nas principais regiões brasileiras, como demonstrado na ferramenta *EICM*, do FlexPave, para cidades norte-americanas. A existência de tal banco facilitaria contribuições científicas a partir de análises como a aqui realizada, em cenário nacional, proporcionando resultados mais condizentes com as variações climáticas do país.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise estrutural no revestimento submetido às sobrecargas veiculares

Os resultados das tensões desvio máximas absolutas no revestimento, analisando tridimensionalmente os 1530 pontos, no AEMC, bem como as tensões desvio máximas no ponto crítico de deformações, estão dispostos na Figura 6. Os dados são correspondentes aos carregamentos de 8,2tf, 10tf e 12tf do ESRD.

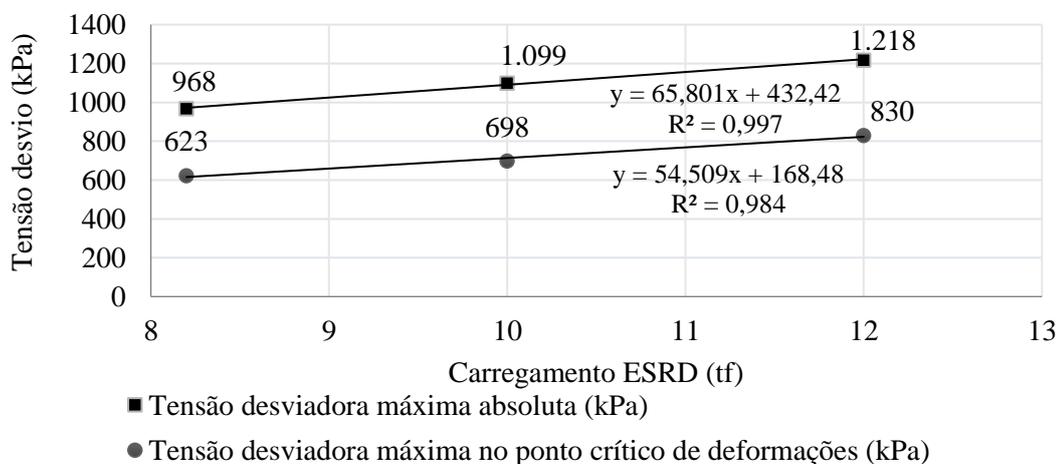


Figura 6: Tensões desvio máximas no revestimento para variações do carregamento do ESRD no AEMC.

Observou-se o valor máximo de tensão desvio na profundidade de 4,5cm de revestimento e nas posições correspondentes às bordas do pneu (em relação ao plano xy, rever Figura 2 para melhor orientação). Foi observado que os valores de tensão máxima ocorrem a uma posição de coordenadas (x; y), em cm, de: (-0,25; -0,05); (-0,25; 0,05); (0,25; -0,05) e (0,25; 0,05) para todas as profundidades. As coordenadas representam aproximadamente as posições relativas às bordas do pneu, esta correspondente ao ponto (-0,23; 0,0) e (0,23; 0,0).

O valor encontrado na tensão desvio máxima no ponto crítico de deformações viscoplásticas no revestimento, para carregamento padrão do ESRD (8,2tf), aproxima-se do valor de 600kPa encontrado por Bastos (2016a) em revestimento e análise semelhante. O valor também se aproxima da tensão desvio proposto por Witczak *et al.* (2002) no protocolo de ensaio uniaxial de carga repetida à 54,4°C, bem como valor de pressão utilizado no Compactador Giratório Superpave (CGS) (Bernucci *et al.*, 2010).

4.2. Análise da evolução da deformação permanente

O FlexPave fornece dados dos valores das deformações permanentes separadamente para cada camada do pavimento e apresenta gráficos com a evolução destas deformações com o tempo. Como exemplo, a Figura 7 ilustra o gráfico de evolução da deformação, em mm, por camada e subleito do pavimento para o carregamento de 17tf (limite por lei) do eixo tandem duplo.

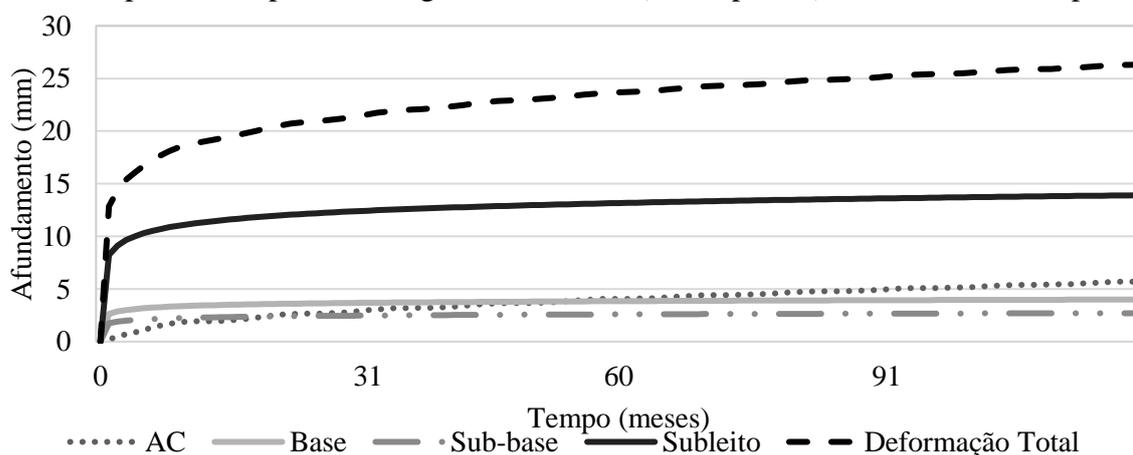


Figura 7: Evolução do afundamento de trilha de roda ao longo dos meses.

Observa-se a parcela maior de contribuição no afundamento dada ao subleito. O fato é observado também para demais carregamentos do eixo tandem duplo e do ESRD. A explicação do ocorrido pode estar associada à rigidez do subleito e camadas granulares (ver Tabela 3), além das premissas dos modelos de previsão da deformação permanente em camadas granulares incorporados no programa, não detalhados neste estudo.

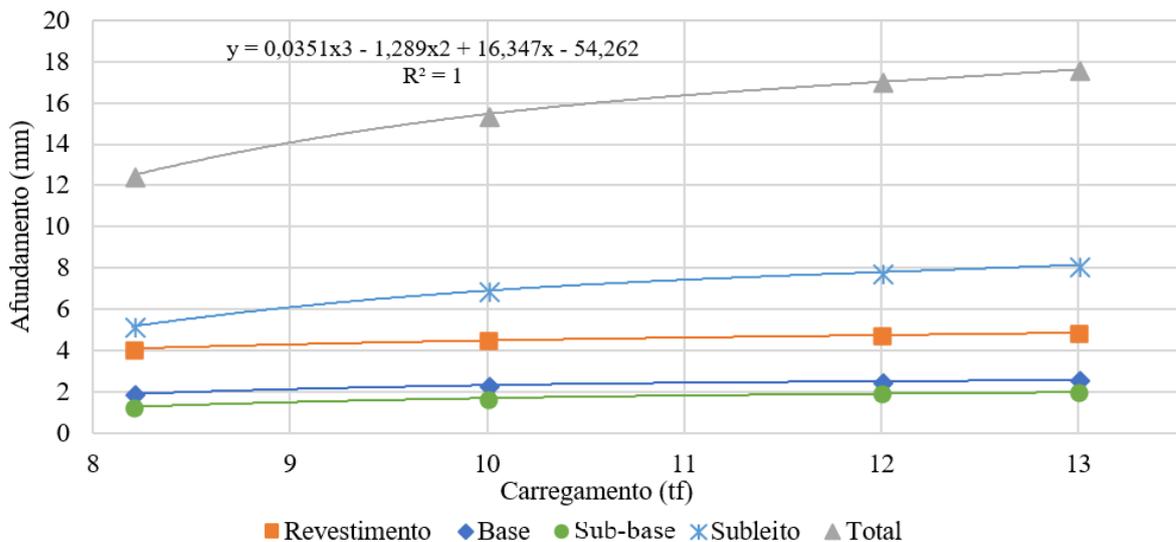
Observa-se uma maior taxa de crescimento do afundamento ao longo do tempo na camada do revestimento (AC). O fato pode ser explicado pelo comportamento viscoelástico do material, que tende a fluir com o tempo. Os resultados dos afundamentos, em mm, das camadas e do subleito do pavimento após a simulação de 120 meses nas situações de carregamento normal e sobrecarga do ESRD e tandem duplo estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de afundamentos por camada ao final de 120 meses

Eixo	Carregamento (tf)	Afundamento (mm)					Total	Incremento do afundamento total (%)
		Revestimento	Base	Sub-base	Subleito			
Padrão	8,2 (padrão)	4,1	1,9	1,3	5,2	12,5	--	
	10	4,5	2,3	1,7	6,9	15,5	24,0	
	12	4,8	2,5	1,9	7,8	17,0	36,0	
	13	4,9	2,6	2,0	8,2	17,6	40,8	
Tandem	17 (padrão)	5,7	4,0	2,7	13,9	26,3	--	
Duplo	19,9	6,1	4,6	3,3	17,3	31,3	19,0	

A maior parcela de incremento do afundamento com o aumento da carga se dá ao subleito, seguido pelas camadas de sub-base, base e ao revestimento, indicando a maior sensibilidade das camadas granulares às sobrecargas. O incremento total de 40,8% no afundamento total para situações de sobrecarga de 13tf do ESRD indicam uma elevada sensibilidade na ocorrência deste defeito desta situação de sobrecarga desse eixo.

Vale lembrar que, para muitos autores e órgãos rodoviários, o limite de afundamento aceitável é de 12,5mm. Observa-se que a sobrecarga do ESRD a partir do valor de carregamento padrão (8,2tf), nas condições adotadas, elevaria o defeito para a categoria de inaceitável. A Figura 8 apresenta a evolução com o tempo da deformação total, por camada e por carregamento do ESRD.

**Figura 8:** Resultados de afundamento por camada para cada carregamento do ESRD.

Analisando o eixo tandem duplo, tem-se um incremento de 19,0% no afundamento total do pavimento para o incremento de 17tf para 19,9tf (17% de sobrecarga). Os valores de sobrecarga e os incrementos de afundamentos correspondentes apontam a significativa influência da sobrecarga nos valores de deformação permanente no pavimento.

5. CONCLUSÕES

Encontrou-se, a partir do estado de tensões no ponto crítico de deformações viscoplásticas do revestimento asfáltico, a tensão desvio neste ponto para os valores de carregamento de 8,2tf, 10tf e 12tf do ESRD, carregamentos comumente praticados no país. As análises indicam aumento significativo das tensões desvio, chegando a ordem de 33%. Os resultados de tensões

apontam para a influência nas deformações plásticas verticais, acentuando a relevância da sobrecarga deste eixo na ocorrência de deformações permanentes em revestimentos. Os valores de tensão desvio encontrados (623kPa, 698kPa e 830kPa) para as sobrecargas impostas podem ser utilizados em ensaios triaxiais de carga repetida para avaliação, em laboratório, da deformação plástica vertical em misturas submetidas a incrementos de carga. Foram obtidos valores de afundamentos de trilha de rodas por meio de simulações, com uso do *Shift Model* incorporado no programa FlexPave 1.0, para 10 anos de tráfego em situações normais e de sobrecarga do ESRD e do tandem duplo. As sobrecargas indicam incrementos máximos de afundamentos na ordem de 45%, para o pavimento como um todo, analisando o ESRD. A sobrecarga simulada do eixo tandem duplo indica um incremento de 19% no afundamento total do pavimento para o mesmo período de análise. Uma situação específica foi apresentada neste estudo. Contudo, a análise ilustra a importância da compreensão do efeito da sobrecarga por meio de modelos mais avançados. Espera-se que os valores de evolução de afundamentos com incrementos de sobrecargas obtidos ensejem novos e mais avançados estudos, a fim de viabilizar o melhor entendimento e incorporação dos reais efeitos de sobrepesos de eixos de veículos no desempenho de pavimentos asfálticos em campo.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2016) *NBR 16505 Misturas Asfálticas - resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Albano, J. F. (1998) Efeitos da Variação de Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- Bastos, J. B., Borges, R. L., Soares, J. B. & Klinsky, L. M. (2015) Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes* v.23, n.2, 44-55.
- Bastos, J. B., Kim, Y. R., Torquato e Silva, S. A., Soares, J. B. & Nascimento, L. A. (2016a) Triaxial stress sweep test protocol considerations for permanent deformation characterisation of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, p.1-14.
- Bastos, J. B. (2016b) Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- Bastos, J. B., Babadopulos, L. F. A. L., Soares J. B. (2017a) Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian roadways. *Construction and Building Materials* 145 p. 20-27.
- Bastos, J. B., Soares, J. B., & Hermann do Nascimento, L. A. (2017b) Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *Revista Transportes*. v25 p. 31-42.
- Bernucci, L.L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A. & Soares, J.B. (2010) *Pavimentação Asfáltica*. Petrobrás Asfaltos, Rio de Janeiro.
- Brasil (2015) *Resolução nº 526*: estabelece limites de tolerância, dentre outras instituições. *Conselho Nacional de Trânsito*. Brasília, DF.
- Choi, Y. T., Subramanian, V. A., Guddati, M. N. & Kim, Y. R. (2013) Incremental model for the prediction of permanent deformation of asphalt concrete in compression. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2296, pp 24-35.
- Fernandes Jr., J.L. (1994) Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Fontenele, H. B., Réus, T. F. & Silva Júnior, C. A. P. (2014) Dano pelo sobrepeso de veículos comerciais ao pavimento flexível. *Revista Tecnologia* v. 35, n 1 e 2, Fortaleza, CE. p. 55-65
- Gibson, N. & Schwartz C. W. (2006) Three-dimensional viscoplastic characterization of asphalt concrete utilizing Perzyna and HiSS methodologies. *Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavement*, Vol. I, pp. 205-214. Quebec, Canadá.
- Holanda, A. S., Parente Jr.E., Melo, T. D. B., Evangelista Jr.F.; & J. B. Soares (2006). Finite Element Modeling of Flexible Pavements. *XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*. Belém, PA.

- Kim, O. K. & Bell, C. A. (1988) Measurement and Analysis of Truck Tire Pressures in Oregon. Transportation Research Record 1207, *Transportation Research Board*, p. 100-110.
- Medina, J. & Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos pavimentos*. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ.
- Nascimento, L. A (2008). Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com uso do Compactador Giratório na Deformação Permanente. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Perzyna, P. (1966) Fundamental problems in viscoplasticity. *Rec. Adv. Appl. Mech.* 9, 243–377. *Academic Press*. New York, Estados Unidos.
- 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.
- Choi, Y. T. & Kim, Y. R. (2014) Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement, *Road Materials and Pavement Design*. 15 (S1) p. 195-218.
- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. & Quintus, H. (2002) 75 V. NCHRP Report 465 - *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Washington, D.C.: National Academic Press.

Anthony Belo Vasconcelos Santos (anthonybe@outlook.com)

Juceline Batista dos Santos Bastos (jucelinebatista@hotmail.com)

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

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.

Av. Mister Hull s/n, Centro de Tecnologia-UFC, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, Ceará.