

ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO SOB A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Rikson Matheus Borges do Canto

Douglas Wendel Consoli Ozelame

Matheus Lemos Nogueira

Universidade de Caxias do Sul

Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias

RESUMO

As deformações permanentes e o trincamento por fadiga são degradações comuns presentes nos revestimentos asfálticos geradas pelas solicitações de tráfego. No presente estudo, através de simulações computacionais com auxílio do *software 3D-MOVE*, são analisadas as tensões e deformações em um revestimento asfáltico frente a variação da sua espessura. Foram analisados pontos sob as rodas e entre elas, na superfície, centro e nas fibras inferiores do pavimento. Foi considerado um revestimento padrão com ligante asfáltico FLEXPAVE 60/85, com teor de ligante de 4,7% e faixa granulométrica enquadrada na faixa C do DNIT - ES 031/2006. A espessura deste revestimento foi variada em $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. Pode-se concluir que as deformações no revestimento crescem com a diminuição de sua espessura, mesmo que muitas vezes essa diminuição esteja dentro dos limites permitidos.

ABSTRACT

Permanent deformations and fatigue cracking are common degradations present in asphalt coatings generated by traffic demands. In the present study, computational simulations using software 3D-MOVE, the stresses and deformations in an asphalt coating are analyzed against the variation of its thickness. Points were analyzed under the wheels and between them, on the surface, center and lower fibers of the pavement. It was considered a standard coating with FLEXPAVE 60/85 asphalt binder, with 4.7% binder content and particle range within the DNIT - ES 031/2006 C band. The thickness of this coating was varied by $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. It can be concluded that the deformation in the coating increases with the reduction of its thickness, even though this reduction is often within the limits allowed.

1. INTRODUÇÃO

No relatório da Pesquisa CNT de Rodovias 2018 (CNT, 2018), a partir dos mais de 107.000km de rodovias avaliados em todo o território brasileiro, constatou-se que a situação da malha do país é preocupante pois 50,9% da extensão estudada apresenta algum tipo de defeito na superfície do pavimento, necessitando então de intervenção. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), tem-se observado diversas patologias prematuras nos revestimentos asfálticos, como a formação de trilha de rodas e a exsudação, mesmo quando a mistura é dosada dentro dos limites de teor ótimo de ligante.

Na bibliografia, de forma geral, é consenso de que a maneira mais eficaz de evitar tais patologias em revestimentos asfálticos é realizar um controle eficiente das operações dentro das usinas e também na pista. Para controlar as operações de usinagem e de lançamento da mistura asfáltica deve-se realizar medidas de características das misturas que afetam diretamente no desempenho dos revestimentos e compará-las com especificações vigentes. Sendo assim, Fortes e Merighi (2004) afirmam que o controle de qualidade de uma obra de engenharia busca amostrar os serviços executados e realizar ensaios para verificar em todas as fases de execução, aplicação e seleção de materiais se aquilo que foi realizado respeita as especificações vigentes.

Albano (2005) afirma que circulam nas rodovias veículos comerciais e de passeio, sendo que os comerciais (caminhões e ônibus) possuem um efeito mais significativo sobre os

pavimentos, devido às cargas deslocadas serem maiores. Ainda de acordo com o autor, as estas são transmitidas aos pavimentos por rodas pneumáticas simples ou duplas arranjadas em eixos simples, duplos ou triplos. Se as tensões cisalhantes que atuam nas faces externas da área carregada forem suficientemente elevadas, resultarão em deformações plásticas na camada asfáltica (ATR) e no surgimento de trincais superficiais de cima para baixo (*Top Down Cracking* - TDC) (SU *et al.*, 2008).

Para DNIT (2006a), a espessura do revestimento deve ser uma característica inspecionada e medida por meio da extração de corpos-de-prova na pista, sendo admitida uma variação máxima de $\pm 5\%$ do valor estabelecido em projeto. Segundo Vidotto e Fontenele (2013), a este parâmetro apresenta grandes efeitos quando se trata, principalmente, de fissuras por fadiga. Shahji (2006) estudou a importância e a sensibilidade da variação da espessura do revestimento asfáltico e constatou que mesmo uma diferença positiva provoca problemas; neste caso gera um acréscimo na formação de TDC.

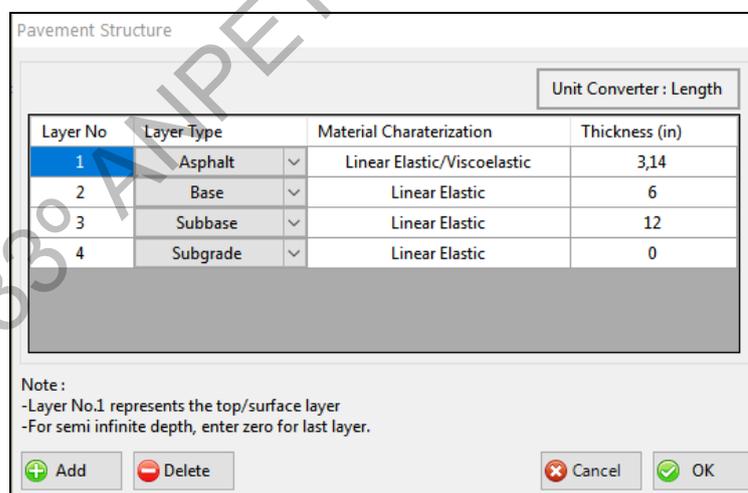
1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é demonstrar os efeitos causados pela variação da espessura de um revestimento asfáltico nas tensões e deformações por meio de uma análise computacional com auxílio do *software 3D-MOVE*.

2. MÉTODO DE PESQUISA

2.1. Estrutura considerada e Materiais

A estrutura do pavimento considerada neste trabalho se deu conforme a Figura 1, que se trata de uma tela do *software* utilizado para as simulações.



Layer No	Layer Type	Material Charaterization	Thickness (in)
1	Asphalt	Linear Elastic/Viscoelastic	3,14
2	Base	Linear Elastic	6
3	Subbase	Linear Elastic	12
4	Subgrade	Linear Elastic	0

Note :
-Layer No.1 represents the top/surface layer
-For semi infinite depth, enter zero for last layer.

Buttons: Add, Delete, Cancel, OK

Figura 1: Pavimento

Percebe-se então que o pavimento é composto pelo revestimento asfáltico, base e sub-base com espessuras de 8cm, 15cm e 30cm, respectivamente.

2.1.1. Caracterização do revestimento asfáltico

O ligante utilizado, conforme Mattos (2014), para mistura foi o FLEXPAVE 60/85 da Greca Asfaltos. Além disso, a mistura asfáltica apresenta um teor de ligante de 4,7% e a faixa granulométrica da mistura asfáltica adotada se enquadra na faixa “C” do DNIT (DNIT - ES

031/2006a).

2.1.2. Caracterização da base

Para a camada de base foi considerada a espessura de 15cm de brita graduada, coeficiente de Poisson é igual a 0,35 e o módulo de elasticidade $E \approx 240MPa$ (MATTOS, 2014).

2.1.3. Caracterização da sub-base

Para a camada de sub-base, constituída de macadame seco e com espessura de 30cm, tem-se o coeficiente de Poisson de 0,35 e módulo de elasticidade $E \approx 280MPa$ (MATTOS, 2014).

2.1.4 Caracterização do subleito

Para o subleito o coeficiente de Poisson é de 0,40 e o módulo de elasticidade $E \approx 60MPa$ (MATTOS, 2014).

2.2. Simulação computacional

2.2.1. Apresentação do software

3D-MOVE é um *software* desenvolvido pela *University of Nevada Reno* e possibilita obter respostas rápidas do comportamento do pavimento, como a distribuição de tensões geradas pelas cargas atuantes sobre ele. Ele permite que sejam utilizados dois modelos diferentes de desempenho: *NCHRP 1-37A* e *VESYS*. A diferença está nos parâmetros levados em consideração para análise de desempenho.

O primeiro modelo, por exemplo, leva em consideração o TDC (*Top Down Cracking*) e o segundo considera o trincamento por fadiga, além dos demais parâmetros relacionados com a falha das camadas inferiores do pavimento. Ambos são mecanísticos-empíricos e avaliam desempenho do pavimento de uma forma semi-analítica. Para o presente trabalho o modelo de desempenho escolhido foi o *NCHRP (1-37A)* pois este levar em consideração fatores que são mais influenciados pela variação da espessura do revestimento.

2.2.2. Parâmetros de entrada

As análises no *3D-Move* podem ser realizadas de duas formas distintas: estática e dinâmica. No presente trabalho foi utilizada a análise dinâmica. O primeiro parâmetro informado ao *software* é a velocidade dos veículos que trafegam na rodovia, que neste estudo foi considerada igual a 80km/h. Optou-se por este valor para estar em conformidade com o limite máximo de velocidade permitida para veículos pesados que trafegam no trecho da rodovia.

Após, o *software 3D-Move* possibilita variar a distribuição de pressões, número de eixos, cargas e espaçamento entre rodas, além de apresentar um banco de dados com diversos veículos-padrão. No presente trabalho considerou-se que $L1=L2=0$ e $S1=30cm$, o que caracteriza um eixo simples de roda dupla. Além disso, considerou-se uma carga dos pneus igual a 20kN e a pressão dos pneus igual a 560kPa.

O *software* também permite variar o tipo de suspensão do veículo e a rugosidade da rodovia. Considerou-se então uma suspensão com quatro molas e que a rodovia possui uma rugosidade suave, gerando um coeficiente de carga dinâmica de 0,07 (para velocidades entre 80 e 100 km/h).

A partir disso, é necessário informar os dados referentes ao tráfego. O *3D-Move* também permite que seja estipulada a taxa de crescimento do tráfego, podendo ser de forma composta ou linear. O tráfego foi considerado constante ao longo de todas as estações de forma que se obtivesse N igual a 10^6 . Para a taxa de crescimento anual foi utilizado o valor estipulado pelo DNIT (2006b) que é de 3%.

Os dados inseridos após as configurações do tráfego são parâmetros de estrutura do pavimento. É importante ressaltar que para a camada de subleito utilizou-se zero para que o programa interpretasse como um elemento infinito. Com a estrutura do pavimento definida, cada camada é caracterizada, começando pelo revestimento. As primeiras propriedades inseridas são referentes à mistura asfáltica, mais especificamente os valores do módulo dinâmico, obtidas em Gouveia (2016).

Vários modelos de previsão do módulo dinâmico estão sendo desenvolvidos nos últimos anos com o intuito de estimar a curva do módulo dinâmico para quando não houver a possibilidade de um estudo laboratorial (GOUVEIA, 2016). Para sua determinação, utilizou-se a função do tipo sigmoidal. Segundo Kim (2009), esta função pode ser definida pela Equação 1.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\varepsilon)}} \quad (1)$$

Em que: $|E^*|$ = módulo dinâmico;
 ε = frequência reduzida;
 δ = mínimo valor do módulo;
 $\delta + \alpha$ = máximo valor do módulo;
 β, γ = parâmetros de forma.

Para o cálculo da frequência reduzida, calculou-se antes o fator de deslocamento, definido pela Equação 2.

$$\log(aT) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2)$$

Onde: aT é o shift fator na temperatura T ;
 C é a constante de ajuste da curva;
 T é a temperatura de obtenção dos dados, em Kelvin;
 T_r é a temperatura de referência.

A constante de ajuste da curva (C) foi obtida no estudo de Gouveia (2016) e é igual a 11.753,1. A partir do cálculo do fator de deslocamento, foi utilizada a Equação 3 para obter o valor da frequência reduzida para cada temperatura.

$$fr = aT * f \quad (3)$$

Em que: fr é a frequência reduzida;
 aT é o fator de deslocamento;
 f é a frequência de carregamento.

Ainda contemplando as propriedades da mistura asfáltica, foram inseridos dados relacionados à taxa de amortecimento e coeficiente de Poisson. Optou-se por utilizar uma taxa de amortecimento nula. Já para o coeficiente de Poisson, adotou-se 0,35 (GOUVEIA, 2016). Os dados referentes ao ligante asfáltico foram inseridos conforme a Tabela 1. Para as camadas de base, sub-base e subleito foram inseridos valores para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, conforme descrito anteriormente.

Tabela 1: Características do ligante asfáltico (MATTOS, 2014)

Propriedade	Limite de especificação	Valor do ensaio
Penetração 25°C (1/10mm)	40 a 70	70
Ponto de amolecimento (°C)	60	64
Massa esp. Aparente (g/cm ³)	-	1,03
Viscosidade Brookfield a 135°C	3000	1600

Os últimos dados inseridos no *software* foram referentes aos pontos de resposta, ou seja, a posição dos pontos de resposta do pavimento que foram analisados. Para este trabalho, utilizou-se o modo de resposta individual dos pontos, onde foi necessário especificar suas coordenadas (x, y e z). Foram analisados pontos localizados nas fibras inferiores, no centro e na superfície do revestimento. Para ambos os casos citados, foram escolhidos pontos sob a roda e entre as rodas.

3. ANÁLISES E RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos se dá pela comparação dos valores máximos de tensões e deformações atuantes no revestimento asfáltico em pontos com maior incidência de patologias, considerando o revestimento referência (conforme características de projeto) e os revestimentos com variações na espessura.

3.1. Módulo complexo

A curva mestra da mistura asfáltica, apresentada na Figura 2, foi obtida ainda na fase de inserção de dados no *software*, podendo assim confirmar a sua coerência.

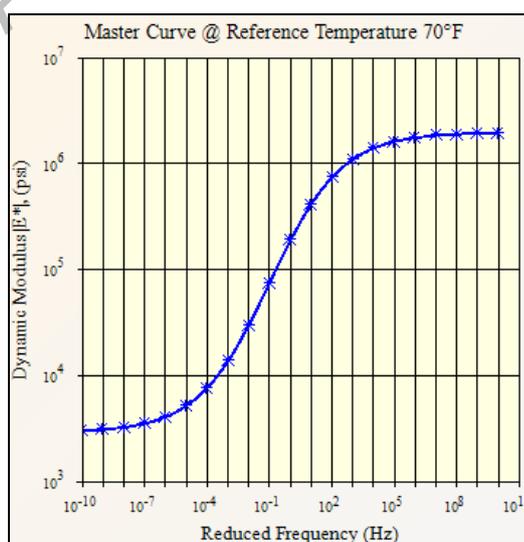


Figura 2: Curva mestra

3.2. Simulações com variação da espessura do revestimento

As simulações realizadas neste trabalho consideraram diversas espessuras para a camada de revestimento asfáltico. Primeiramente considerou-se um revestimento como referência, conforme os parâmetros estabelecidos no projeto. A partir disso, a espessura foi variada em $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, sendo o primeiro valor dentro da tolerância estabelecida por DNIT (2006b), o segundo exatamente o limite de DNIT (2006b) e o último sendo um valor que extrapola a tolerância estabelecida pela referida especificação.

3.2.1. Deformação na superfície do revestimento

Analisando os valores de deformação sob a roda, apresentados na Tabela 2, verifica-se que mesmo para a menor variação negativa da espessura ocorre um aumento na deformação de compressão do revestimento asfáltico de mais de 5%. Já para a variação que está exatamente no limite do permitido, a deformação devido à compressão aumenta em aproximadamente 9%. Para a variação da espessura de -10%, esta deformação aumenta em mais de 17%. Já entre as rodas, a deformação máxima de compressão ocorre para a maior variação da espessura de revestimento. Para a variação negativa dentro do permitido houve uma diminuição da deformação em aproximadamente 2%. Contudo, a deformação devido aos esforços de tração diminui com o aumento da espessura do revestimento asfáltico.

Tabela 2: Variações das deformações na superfície do revestimento

Espessura	Sob a roda	Entre as rodas
-3%	+5% deformação compressão	-2% deformação compressão
-5%	+9% deformação compressão	-3,5% deformação compressão
-10%	+ 17% deformação compressão	-7,5% deformação compressão
+3%	- 5% deformação compressão	+1,6% deformação compressão
+5%	-9% deformação compressão	+2,7% deformação compressão
+10%	-16% deformação compressão	+4,7% deformação compressão

3.2.2. Deformação no centro do revestimento

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos resultados para as diferentes espessuras simuladas. Sob a roda, com a diminuição da espessura ocorre o aumento da deformação gerada pelos esforços de tração, chegando a ser 8% maior em comparação com o revestimento referência. Para a variação negativa de 5%, o aumento da deformação devido à tração é de aproximadamente 3,5%. A deformação no centro do revestimento se inverte quando comparada à deformação na superfície. No caso anterior as maiores deformações ocorriam devido aos esforços de compressão, para este caso as maiores deformações ocorrem para os esforços de tração. Já as deformações entre as rodas, para as variações positivas do revestimento asfáltico de 3%, 5% e 10% a deformação máxima aumenta na ordem de 8%, 13% e 26%, respectivamente. Aqui é possível notar um aumento considerável da deformação tanto para as variações dentro do limite permitido quanto para variação que o extrapola. Para a deformação entre as rodas no centro do revestimento, o comportamento das deformações se assemelha ao apresentado para o mesmo caso na superfície do revestimento.

Tabela 3: Variações das deformações no centro do revestimento

Espessura	Sob a roda	Entre as rodas
-3%	+2% deformação tração	-7% deformação compressão
-5%	+3,5% deformação tração	-7% deformação compressão
-10%	+8% deformação tração	-0,5% deformação compressão
+3%	-1,8% deformação tração	+8% deformação compressão
+5%	-3% deformação tração	+13% deformação compressão
+10%	-5% deformação tração	+26% deformação compressão

3.2.3. Deformação nas fibras inferiores do revestimento

Na Tabela 4 estão dispostos os resultados para as deformações nas fibras inferiores do revestimento. Assim como todos os outros casos apresentados de deformação sob a roda, ocorre o agravamento da deformação causada por esforços de tração com a redução da espessura do revestimento. Apesar deste caso apresentar as maiores deformações máximas quando comparado aos demais, para as variações negativas das espessuras de 3%, 5% e 10% a variação da deformação foi na ordem de 1,5%, 3% e 5%, respectivamente. Este foi o caso em que menos ocorreu variação na deformação do revestimento frente a variação das espessuras da camada. Entre as rodas, para os esforços de tração, a deformação cresce com o aumento da espessura. Para as espessuras com o aumento de 3%, 5% e 10%, as deformações devido aos esforços de tração aumentaram em 4,5%, 7,7% e 14%, respectivamente. Para a deformação devida aos esforços de compressão, o aumento da deformação frente a variação negativa de 3%, 5% e 10% foi na ordem de 7%, 12% e 24%, respectivamente. Apesar dos valores máximos das deformações geradas pelos esforços de compressão serem menores que as deformações geradas pelos esforços de tração, a diferença entre as diversas espessuras simuladas foi muito maior para as deformações negativas do que para as positivas.

Tabela 4: Variações das deformações nas fibras inferiores do revestimento

Espessura	Sob a roda	Entre as rodas
-3%	+1,5% deformação tração	+7% deformação compressão
-5%	+3,0% deformação tração	+12% deformação compressão
-10%	+5,0% deformação tração	+24% deformação compressão
+3%	-1,6% deformação tração	+4,5% deformação tração
+5%	-2,7% deformação tração	+7,7% deformação tração
+10%	-5,3% deformação tração	+14% deformação tração

3.2.4. Tensão na superfície do revestimento

Na Figura 3 é possível verificar as tensões sob a roda e a distribuição das mesmas ao longo do tempo de aplicação da carga. É possível constatar que os maiores esforços que se encontram na superfície do revestimento são esforços de tração. Também é possível verificar que a tensão na superfície do revestimento não depende da sua espessura, portanto foram obtidos os mesmos resultados para todas as simulações.

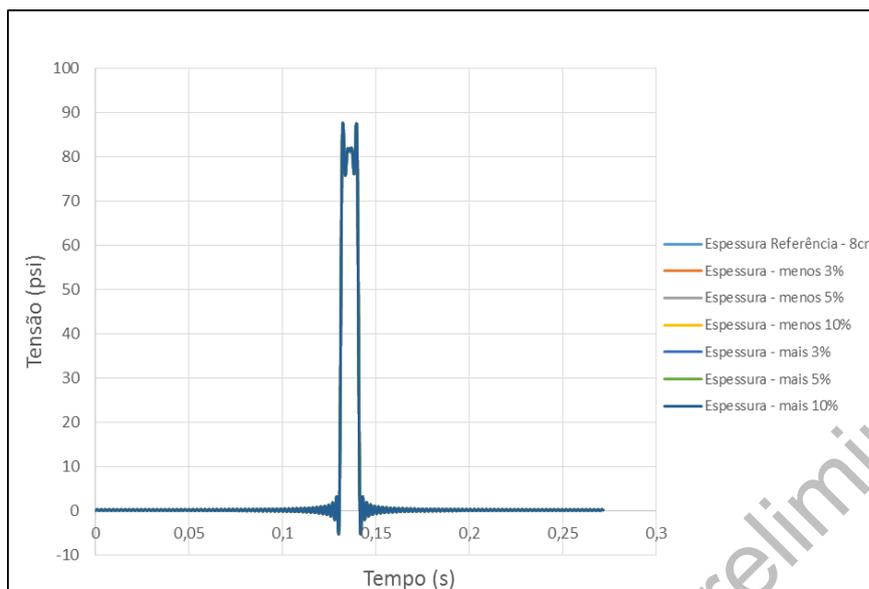


Figura 3: Tensões sob a roda na superfície do revestimento

Na Figura 4 a distribuição de tensões entre as rodas pode ser verificada, onde é possível constatar que os esforços variam entre tração e compressão. Assim como no caso anterior, observa-se que o resultado não depende da espessura do revestimento. Outro ponto a ser observado é que a amplitude das tensões de tração nesse ponto é muito menor do que sob a roda.

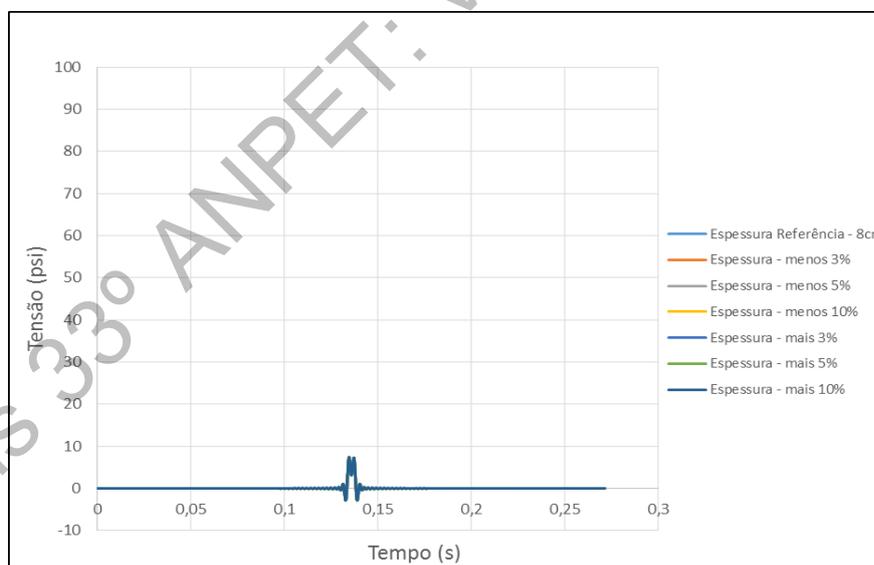


Figura 4: Tensões entre as rodas na superfície do revestimento

3.2.5. Tensão no centro do revestimento

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das variações de tensões no centro do revestimento. É possível verificar que a tensão sob a roda é maior para as maiores espessuras. Para variação positiva de 10%, as tensões de tração aumentaram em aproximadamente 1,7%. Para as demais variações positivas, de 3 e 5%, o aumento na tensão de tração foi de 0,5% e 0,8%, respectivamente. Entre as rodas, para a espessura com variação negativa de 3% o aumento de tensão foi de aproximadamente 3%, já para as negativas de 5 e 10% as tensões

aumentaram em aproximadamente 6% e 12,5%, respectivamente. Neste caso, diferente dos demais casos de tensões já apresentados, é possível perceber uma maior importância no controle da espessura do revestimento, pois foi onde a tensão apresentou maior variação com a diminuição da espessura.

Tabela 5: Variações das tensões no centro do revestimento

Espessura	Sob a roda	Entre as rodas
-3%	-0,5% tensões de tração	+3% tensões de tração
-5%	-0,8% tensões de tração	+5,9% tensões de tração
-10%	-1,5% tensões de tração	+12,5% tensões de tração
+3%	+0,5% tensões de tração	-3% tensões de tração
+5%	+0,8% tensões de tração	-5% tensões de tração
+10%	+1,7% tensões de tração	-8,2% tensões de tração

3.2.6. Tensão na parte inferior do revestimento

Na Tabela 6 são apresentados os valores das variações das tensões na parte inferior do revestimento. Sob a roda, a tensão de tração aumenta para menores espessuras. Para as variações negativas de 3%, 5% e 10% houve um aumento nas tensões de 3%, 6% e 10%, respectivamente. Já para as positivas, houve uma diminuição de, respectivamente, 2,7%, 4,5% e 8,5%. No ponto entre as rodas, assim como em outros casos já apresentados, é possível perceber que para maiores espessuras, ocorre a diminuição das tensões. Já para as variações negativas de espessura do revestimento, ocorre um aumento nas tensões de tração e de compressão.

Tabela 6: Variações das tensões na parte inferior do revestimento

Espessura	Sob a roda	Entre as rodas
-3%	+3% tensões de tração	+6% tensões de compressão
-5%	+6% tensões de tração	+10% tensões de compressão
-10%	+10% tensões de tração	+20% tensões de compressão
+3%	-2,7% tensões de tração	-5,6% tensões de compressão
+5%	-4,5% tensões de tração	-9,5% tensões de compressão
+10%	-8,5% tensões de tração	-18% tensões de compressão

4. CONCLUSÕES

Por meio das simulações realizadas, foi possível perceber que a variação da espessura do revestimento afeta diretamente nas tensões e também nas deformações do pavimento em todos os casos estudados. Também é possível constatar que a região que apresenta maior deformação devido aos esforços de tração são as fibras inferiores do revestimento, sob a roda. Contudo, também é possível observar que não é no mesmo local que se concentram as maiores tensões de tração do revestimento. As maiores tensões de tração estão localizadas sob a roda, na superfície do revestimento.

É possível inferir, também, que para a maioria dos pontos analisados, a deformação diminui com o aumento da espessura. Porém é importante salientar que com o aumento do revestimento começam a surgir demais patologias como o TDC (*Top Down Cracking*), que além da deformação, também pode comprometer o desempenho do revestimento asfáltico. Outro ponto negativo de maiores espessuras de revestimento é o aumento no custo de implementação.

Como sugestão para um trabalho futuro, é interessante comparar os resultados gerados por meio dos dois modelos de desempenho que podem ser utilizados pelo *software 3D-MOVE*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albano, J. F. *Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento*. 1998. 138 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. da; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras; Adeba, 2008.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de Rodovias 2018*. Disponível em <https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20alta.pdf>, Acesso em: 10 de setembro de 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: IPR, 2006a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT: Manual de Estudos de Tráfego*. Rio de Janeiro: IPR, 2006b.
- Fortes, R. M.; Merighi, J. V. Controle Tecnológico e Controle de Qualidade – Um Alerta sobre sua Importância. In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004, Brasília. Brasília: *Anais do Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 2004.
- Gouveia, B. C. S. *Métodos De Previsão E Determinação De Módulo Dinâmico De Misturas Asfálticas Aplicadas Em Rodovias Brasileiras*. 2016. 97 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2016.
- Kim, Y. R. *Modeling of asphalt concrete*. Reston: ASCE Press, 2009.
- Mattos, J. R. G. *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul*. 2014. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- Shahji, S. *Sensitivity analysis of AASHTO's 2002 flexible and rigid pavement design methods*. 2006. Thesis (Master of Science). University of Central Florida, 2006.
- Su, K.; Sun, L.; Hachiya, Y.; Maekawa, R. Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure. In: *Proceedings of the 6th ICPT*. Japan. p.1118. 2008.
- Vidotto, J. P.; Fontenele, H. B. *Efeito da variação da espessura do revestimento nas respostas estruturais do pavimento flexível*. Ciências Exatas e Tecnológica. Londrina, p. 155-166. dez. 2013.