

ESTUDO NUMÉRICO DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO CONSIDERANDO REVESTIMENTO VISCOELÁSTICO OU ELÁSTICO-LINEAR

Albert Willian Faria (UFTM) E-mail: albert.faria@uftm.edu.br

Paulo Roberto Garcia (UFTM) E-mail: paulo.garcia@uftm.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta a análise do comportamento mecânico de um pavimento asfáltico submetido a uma carga variável no tempo. O pavimento é composto por duas camadas: revestimento asfáltico e base granular, apoiadas sobre um subleito. O modelo numérico do pavimento e subleito é implementado usando o Método dos Elementos Finitos através do programa comercial ANSYS. Um elemento quadrático plano (denominado Plane183), dotado de oito nós e dois graus de liberdade de translação por nó (u_x e u_y), é utilizado na modelagem do sistema solo-pavimento, empregando os conceitos de axissimetria e de simetria geométrica. O revestimento do pavimento é considerado viscoelástico-linear, modelado através da série de Prony, ou elástico-linear, empregando o Módulo de Resiliência (MR), enquanto os demais materiais são considerados elástico-lineares. Os efeitos térmicos não são considerados neste trabalho. Esses modelos numéricos permitem demonstrar como o carregamento dinâmico afeta as tensões (verticais e horizontais) e deslocamentos verticais do pavimento. O deslocamento vertical obtido com esses modelos é comparado e validado com a literatura científica. Os resultados numéricos também demonstram a capacidade no modelo viscoelástico em prever as alternâncias (que pode levar a fadiga do revestimento) e defasagem das tensões normais ao longo da espessura do revestimento asfáltico, que não podem ser captadas nos modelos empregando o MR.

Palavras-chave: Mecânica do Pavimento, Pavimento Flexível, Revestimento Asfáltico, Método dos Elementos Finitos, Viscoelasticidade.

NUMERICAL STUDY OF AN ASPHALT CONCRETE PAVEMENT CONSIDERING VISCOELASTIC OR LINEAR-ELASTIC OVERLAY

Abstract: The mechanical behavior of an asphalt pavement subjected to a time-varying load of a semi-sinusoidal type is presented in this paper. The pavement consists of two layers: an asphalt overlay and a granular base, supported by a subgrade. The numerical model of pavement and subgrade is implemented using the Finite Element Method through the commercial software ANSYS. A 2D-quadrilateral element (Plane183), defined by eight nodes and two degrees of translational freedom: u_x and u_y at each node, is used in the discretization of the soil-pavement system, employing axisymmetric and geometric symmetry concepts. The pavement overlay is considered as viscoelastic-linear material, modeled using the Prony series, or as linear-elastic by Resilience Modulus (MR). In both models, the base and subgrade are assumed to be linear-elastics. Thermal effects are not considered in simulations. These numerical models allow demonstrating how dynamic loading affects the vertical and horizontal stresses and vertical displacements of the pavement. The vertical displacement obtained by models are compared and validated with the scientific literature. The numerical results also demonstrate the capability of the viscoelastic model to predict the alternation and phase shift of the normal stresses experienced throughout the thickness of the asphalt overlay which cannot be evaluated by MR.

Keywords: Pavement Mechanics, Flexible Pavement, Asphalt Overlay, Finite Element Method, Viscoelasticity.

1. Introdução

Pavimentos são estruturas multicamadas de espessura finita, sujeitos a cargas cíclicas provenientes do tráfego de veículos e também a variações térmicas e de humidade, construídos sob a superfície final de terraplanagem. Eles são projetados para resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais e horizontais aplicados, propiciando a seus usuários melhores condições de rolamento, comodidade, economia, durabilidade e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Conforme Medina e Motta (2015), as primeiras estradas de rodagem foram feitas diretamente em solo argiloso. Já, a partir de 1950, com o desenvolvimento da indústria de refinação de petróleo, o revestimento dos pavimentos passa a ser de origem asfáltica (mistura constituída por agregados e ligantes asfálticos) ampliando, em escala industrial, o emprego do pavimento asfáltico (MEDINA e MOTTA, 2015).

Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, os pavimentos asfálticos podem ser constituídos por quatro camadas principais: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito. Segundo Bernucci *et al.* (2010), o revestimento asfáltico (foco deste trabalho) tem por função proteger da ação da água as demais camadas, resistir e transmitir às ações do tráfego as camadas inferiores de maneira mais atenuada e melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança dos usuários.

No início do século XX, o projeto dos pavimentos asfálticos era baseado principalmente em abordagens empíricas. A partir da década de 70, observa-se uma maior adoção de métodos mecanístico-empíricos, nos quais os seus materiais constituintes são caracterizados experimentalmente e esses dados gerados são utilizados como entrada para as análises estruturais e de desempenho, feitas através de modelos multicamadas, do pavimento. Esses modelos (dos tipos analítico ou numérico) geram estimativas de tensões e deformações dos pavimentos, que posteriormente são comparadas a critérios de dimensionamento pré-definidos de natureza empírica, donde advém o nome desses métodos (Torquato Silva *et al.*, 2013).

Dentre os modelos numéricos multicamada que podem ser empregados nos métodos mecanístico-empíricos para a modelagem do pavimento merece destaque os gerados com o Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse método permite incorporar em sua formulação modelos constitutivos de materiais diversos como os elásticos, elastoplásticos, viscoelásticos e viscoplásticos, necessários para prever de forma mais realística (ou seja, em concordância com as observações experimentais) o comportamento mecânico das misturas asfálticas. No MEF é essencial realizar a definição: da geometria do problema, das condições de contorno (que envolvem cargas e deslocamentos impostos) e das propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pavimento.

A caracterização experimental das propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pavimento (ou seja, dos dados de entrada do modelo numérico) é uma tarefa desafiadora, pois envolve uma variedade de fatores interdependentes, que incluem o ambiente em que o pavimento está localizado, a magnitude das cargas aplicadas pelos veículos, a duração do tempo de aplicação dessas cargas, a frequência com que as cargas são aplicadas e o estado de tensões no pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Nos últimos 20 anos, tem-se observado na modelagem dos pavimentos asfálticos a premissa que o seu revestimento funciona como um material viscoelástico. Esse pressuposto vem sendo amplamente estudado no meio científico em detrimento da hipótese clássica elástico-linear, empregada por exemplo com o uso do Módulo de Resiliência (MR). Pode-se citar um grande número de trabalhos científicos, que estudam o comportamento mecânico dos pavimentos asfálticos considerando a natureza viscoelástica de sua mistura, como os trabalhos de Hemmat *et al.* (2012), Torquato Silva *et al.* (2013), Xu e Prozzi (2015) e Chen *et al.* (2017). Em comum, esses trabalhos empregam a série de Prony (Modelo Generalizado de Maxwell) na modelagem do revestimento viscoelástico no domínio do tempo. Essa série permite descrever uma função ou sinal complexo como uma soma de termos exponenciais decrescentes e será melhor descrita neste trabalho posteriormente.

O presente trabalho visa validar (com referências da literatura científica), comparar (com o MR) e investigar o efeito da adoção de revestimento viscoelástico linear (empregando a série de Prony) na modelagem de um pavimento asfáltico apoiado em um subleito utilizando o

software ANSYS, desprezando os efeitos térmicos, quando submetido a condição de tráfego variável com o tempo. Especial atenção é dada ao estudo, das tensões (σ_x e σ_y) desenvolvidas ao longo da espessura do revestimento asfáltico, da defasagem na resposta do revestimento e dos deslocamentos verticais sofridos pelo pavimento asfáltico, ao longo do tempo de aplicação da carga dinâmica proveniente do tráfego de veículos à diferentes velocidades, pouco estudados em outros trabalhos.

2. Modelagem numérica do comportamento viscoelástico linear do revestimento asfáltico

Uma analogia comumente usada para ilustrar o comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico é a sua representação por meio de um sistema de molas e amortecedores conectados em série. Nessa analogia, cada mola representa a componente elástica do material viscoelástico (revestimento), que armazena energia quando deformada e a libera quando a deformação é removida. Por sua vez, os amortecedores representam a componente viscosa do material viscoelástico, dissipando energia na forma de calor durante a deformação. Quando uma força externa (por exemplo, devido ao tráfego de veículos) é aplicada ao sistema (pavimento), ele sofre uma deformação inicial. A partir desse ponto, as molas começam a armazenar energia elástica e a se expandir, enquanto os amortecedores dissipam energia na forma de calor, retardando o movimento do sistema. Com o tempo, a energia armazenada nas molas diminui gradualmente devido à sua propriedade de relaxação, enquanto os amortecedores continuam a dissipar energia.

Nessa analogia, as molas representam o módulo de relaxação do revestimento $E(t)$, o qual diminui gradualmente com o tempo, refletindo a diminuição na capacidade do material de armazenar energia elástica. Já os amortecedores representam a função de compliância ou de fluência $D(t)$ do revestimento asfáltico, que continua a dissipar energia e retardar o movimento do sistema mesmo após um longo período de tempo.

Esses dois parâmetros $E(t)$ e $D(t)$ podem ser obtidos respectivamente pelos ensaios de Relaxação ou de Fluência (*Creep*) detalhados em Medina e Motta (2015). Nesses ensaios experimentais há a aplicação de um nível constante de uma grandeza (tensão ou deformação) e observação da evolução ao longo do tempo da segunda (deformação ou tensão, respectivamente). Existe também a possibilidade de interconversão entre o $D(t)$ e $E(t)$, apresentada no trabalho de Nogueira Silva (2009).

O princípio da superposição de Boltzmann é utilizado para descrever a relação entre tensão $\sigma(t)$ e a deformação $\varepsilon(t)$ dos materiais viscoelásticos de forma mais complexa e real do que a simples relação linear entre elas estabelecida pela lei de Hooke.

No caso de materiais viscoelásticos lineares, as propriedades mecânicas dependem tanto do tempo (t) quanto da taxa de carregamento, além é claro da temperatura de trabalho. Isso significa que a resposta do material não é instantânea, mas também leva em consideração o histórico de carregamento sofrido por ele ao longo do tempo e das variações de temperatura.

Esse princípio pode ser representado por uma integral de convolução sob a forma (Christensen, 1982):

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

, em que $E(t-\tau)$ representa o histórico do carregamento aplicado, dependente do tempo de retardamento (τ) e do tempo (t) contado a partir de um referencial qualquer. O diferencial $\partial\varepsilon/\partial\tau$ fornece informações sobre como a deformação (ε) do material varia em relação às mudanças no tempo de retardamento (τ) .

A Equação (1), E relaciona a tensão $\sigma(t)$ com a deformação $\varepsilon(t)$ e reflete a capacidade do material de se ajustar gradualmente ao carregamento aplicado, sendo representada nesse trabalho pela série de Prony dada pela expressão (HEMMAT *et al.* 2012):

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} E_i e^{-t/\tau_i} = E_0 \left(\alpha_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i e^{-t/\tau_i} \right) \quad (2)$$

sendo os termos E_∞ e E_0 respectivamente o módulo de Young em um tempo infinito ($t = \infty$) e em um tempo instantâneo ($t \rightarrow 0$), n_i é o número de elementos da série e τ_i representa o tempo de retardamento de cada elemento da série. Já o termo α_i ($\alpha_i = E_i/E_0$) é o módulo relativo de Young, que representa a perda percentual de rigidez devido a relaxação do material, cuja soma deve ser menor ou igual a 1.

A Equação (1) pode ser reescrita da seguinte maneira generalizada:

$$\sigma(t) = \int_0^t \mathbf{C}(t-\tau) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial \tau} d\tau \quad (3)$$

sendo: \mathbf{C} a matriz constitutiva elástica do material, obtida da lei de Hooke Generalizada.

Considerando material isotrópico e coeficiente de Poisson constante, a matriz \mathbf{C} pode ser reescrita sob a forma: $\mathbf{C}(t) = E(t) \mathbf{A}(\nu)$, que, substituída na equação (2), resulta na expressão:

$$\sigma(t) = \mathbf{A}(\nu) \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial \tau} d\tau \quad (4)$$

Para materiais axissimétricos, a matriz $\mathbf{A}(\nu)$ é dada pela expressão:

$$\mathbf{A}(\nu) = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) e as equações apresentadas anteriormente, pode-se chegar ao seguinte sistema não linear: $\mathbf{Ku} = \mathbf{F}$. Esse sistema deve ser resolvido de maneira incremental, sendo \mathbf{F} a diferença entre o vetor das forças externas

aplicadas \mathbf{f}_{n+1} com o das forças internas \mathbf{g}_{n+1} obtido no incremento de força $n+1$, ou seja:
 $\mathbf{F} = \mathbf{f}_{n+1} - \mathbf{g}_{n+1}$.

A dedução desse sistema não linear, bem como das matrizes e vetores que o compõe e da forma de sua resolução incremental, pode ser consultada no trabalho de Portela (2011).

De maneira geral, o vetor das forças internas pode ser obtido por meio da integral:

$$\mathbf{g}_{n+1} = \int_V \mathbf{B}^T (\mathbf{u}_n + \Delta \mathbf{u}) dV \quad (6)$$

enquanto a matriz de rigidez do material viscoelástico, pode ser expressa segundo a expressão:

$$\mathbf{K}_{n+1} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV = \mathbf{A} \int_V \mathbf{B}^T E(t) \mathbf{B} dV \quad (7)$$

sendo \mathbf{B} a matriz das derivadas das funções de forma do elemento finito utilizado na modelagem, V o volume e T o sobrescrito indicando a operação matemática de transposição.

Observa-se que a Equação (6) é dependente do histórico das tensões $\boldsymbol{\sigma}_n$ do incremento de força anterior. Além disso, a matriz de rigidez do revestimento viscoelástico indicada na Equação (7) dependente do módulo de relaxação $E(t)$, representado neste trabalho pela Equação (2).

3. Metodologia

Esse trabalho propõe o estudo no domínio do tempo do comportamento mecânico, em termos da obtenção de tensões (horizontal e vertical) e deslocamentos verticais, de pavimento asfáltico submetido a uma carga variável no tempo, e cujo $E(t)$ do revestimento é escrito via série de Prony ou alternativamente como material elástico-linear via MR(t).

São propostos dois modelos distintos, implementados no *software* ANSYS, um que considera o pavimento asfáltico e o subleito como sendo elástico-lineares (Elast) e outro considerando o revestimento asfáltico viscoelástico e demais materiais elástico-lineares (Visco). Esses dois modelos foram estudados também por Portela *et al.* (2008), empregando um elemento finito quadrático de 8 nós, com 2x2 pontos de integração de Gauss.

Os resultados numéricos obtidos neste trabalho serão confrontados com a referência supracitada (Ref.), em vista da validação numérica dos modelos Elast e Visco.

Nesses dois modelos, a temperatura do pavimento será adotada constante (25° C), ou seja, somente será estudada a influência da taxa de aplicação do carregamento sob o comportamento mecânico do pavimento.

Devido a simetria geométrica do sistema pavimento-subleito somente será realizada a modelagem de metade do sistema, em vista a uma maior economia de gasto de tempo de processamento computacional, e, além disso, nas modelagens esse sistema será considerado axissimétrico.

4. Simulações numéricas e discussões

O pavimento asfáltico em estudo é formado por uma camada de revestimento asfáltico (mistura asfáltica usinada à quente, do inglês *Hot Mix Asphalt - HMA*) apoiada sobre uma base com solo brita (*crushed stone base*) e um subleito com baixa resistência (*soft subgrade*), conforme ilustrado na Figura 1(a).

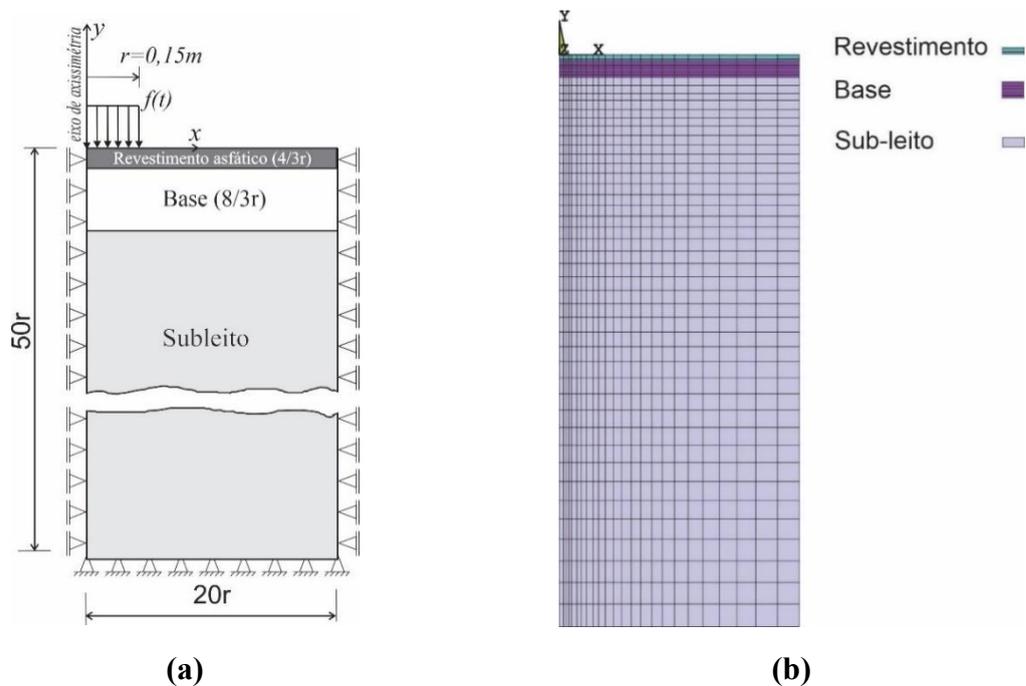


Figura 1. Geometria, carregamento, condições de contorno (a) e malha de elementos finitos utilizada na discretização do pavimento asfáltico (b).

Como pode ser visto na Figura 1(a), somente a metade da geometria do pavimento-subleito foi modelada, conforme eixo de simetria (ou axissimétria) y do sistema.

O pavimento asfáltico possui comprimento total de $40r$, sendo r o raio de distribuição da carga $f(t)$ sob o revestimento asfáltico igual a $0,15\text{ m}$. O revestimento asfáltico e a base apresentam respectivamente espessuras iguais a $4/3r$ e $8/3r$, enquanto a posição indeslocável do subleito está localizada em $y = -50r$, conforme ilustrado na Figura 1(a), e sistema x - y ilustrado.

A malha do sistema pavimento-subleito, obtida via MEF no ANSYS, é ilustrada na Figura 1(b). O elemento quadrático plano utilizado na discretização do sistema possui oito nós e dois graus de liberdade de translação por nó (u_x e u_y), e é chamado Plane183 no *software*.

O revestimento asfáltico, a base e o subleito foram discretizados respectivamente com 8, 8 e 40 elementos finitos ao longo de suas direções verticais (y), enquanto que na direção horizontal (direção x) são empregados 20 elementos planos, perfazendo o modelo um total de 9746 graus de liberdade.

Para $x = 0$ e $x = 20r$ do sistema os deslocamentos na direção horizontal (u_x) são assumidos nulos. Já na posição $y = -50r$ do indeslocável do subleito, u_x e u_y são considerados nulos.

A carga distribuída $f(t)$, ilustrada na Figura 1(a), é distribuída sob o pavimento na área circular de r e tem magnitude máxima de $0,550\text{ MPa}$ e forma (ao longo do tempo) de um pulso semi-senoidal com duração definida pelo pulso de carga t_p .

A velocidade, em *km/h*, correspondente a passagem do veículo no pavimento conforme a sua profundidade (*d*), em *m*, pode ser obtida através da expressão:

$$\log(t_p) = 0,5d - 0,2(1 - 4,7 \log(v)) \tag{8}$$

Adotando *d* nulo, obtêm-se as velocidades aproximadas de 82,2, 7,1 e 0,6 *km/h* para *t_p* igual respectivamente a 0,01, 0,1 e 1 s, adotados neste trabalho. Os dois primeiros pulsos de carga são ilustrados Figura 2.

Como pode ser notado na Figura 2 e Equação (8), desenvolvida por Brown (1973) *apud* Evangelista Jr (2006), quanto maior o pulso de carga (*t_p*) menor a velocidade do veículo.

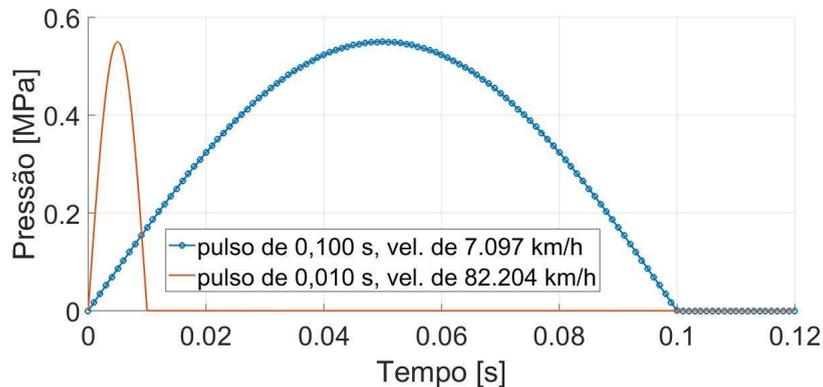


Figura 2. Pulsos de carga representando a passagem de uma roda do veículo sobre o pavimento asfáltico.

As propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pavimento asfáltico e subleito utilizadas nos dois modelos numéricos implementados neste trabalho, com revestimento elástico linear (Elast) e com revestimento viscoelástico (Visco), são fornecidas na Tabela 1.

A Tabela 1 (b) fornece os coeficientes da série de Prony do revestimento asfáltico viscoelástico, fornecidos por Lee (1996) *apud* Portela *et al.* (2008) para a temperatura de referência de 25°C. E, a partir desses dados são obtidos os coeficientes α_i da série de Prony utilizando o módulo relativo de Young.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais do pavimento-subleito e coeficientes da série de Prony do revestimento asfáltico.

Camada	MR(t) ou E ou E(t) (MPa)	ν	Termo	Revestimento asfáltico	
			<i>i</i>	<i>E_i</i> (MPa)	τ_i (s)
Revestimento elástico	MR=2555,16	0,35	∞	1,172	-
	(<i>t_p</i> = 0,1 s)		1	3100	2,20E-5
	MR=4838,80		2	4310	2,20E-4
Revestimento viscoelástico	(<i>t_p</i> = 0,01 s)		3	3460	2,20E-3
	E(t):		4	2020	2,20E-2
Base	Eq. (2) e Tabela 2b		5	1270	2,20E-1
Subleito	E = 300	0,30	6	272	2,20E+0
	E = 100		300	7	65,9
			8	14,5	2,20E+2
			9	1,52	2,20E+3
			10	0,710	2,20E+4
			11	0,0588	2,20E+5

(a) (b)
 Fonte: (a) Portela *et al.* (2008), (b) Lee (1996) *apud* Portela *et al.* (2008)

A Figura 3 compara os deslocamentos verticais (em módulo) obtidos neste trabalho (Visco e Elast) com os de Portela *et al.* (2008) entre 0 a $2 t/t_p$, considerando diferentes valores de t_p (1, 0,1 e 0,01 s).

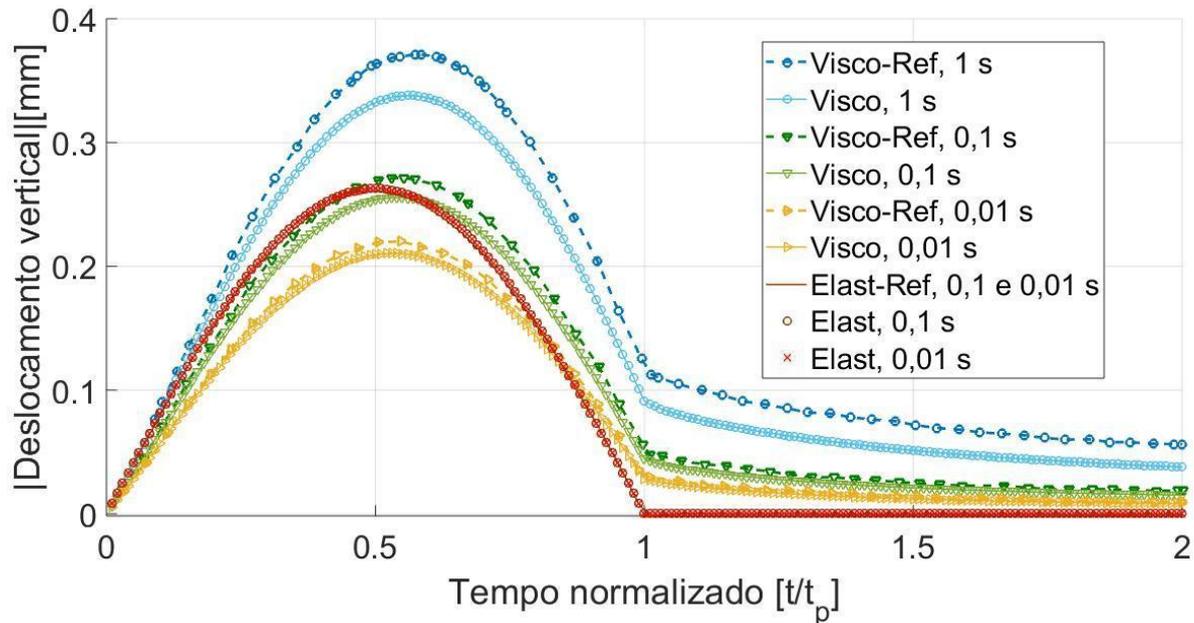


Figura 3 – Módulo do deslocamento vertical do revestimento asfáltico em função do tempo normalizado adotando diferentes pulsos de carga e modelos.

O tempo total da análise (t) varia conforme o valor do pulso de carga aplicado, ou seja, nesse trabalho para $t = 2, 0,2$ e $0,02$ s foram adotados t_p iguais a 1, 0,1 e 0,01 s, respectivamente, sendo fixado (em todas as simulações numéricas realizadas) 200 incrementos de tempo (Δt).

Pode-se observar da Figura 3, que quanto maior o pulso de carga (correspondente ao tráfego de veículos com baixa velocidade) maior o deslocamento vertical obtido ao longo do tempo normalizado de análise.

Verifica-se pela Figura 3 que, independentemente do valor do pulso de carga (0,1 ou 0,01s), os modelos elásticos (da referência e implementados neste trabalho) apresentam uma distribuição similar do deslocamento vertical ao longo do tempo.

Pode-se constatar também da Figura 3, que os modelos viscoelásticos da referência (Visco-Ref.) quando comparados aos correspondentes viscoelásticos implementados neste trabalho (Visco) apresentaram deslocamentos verticais maiores, independentemente do valor do pulso de carga t_p utilizado, sendo que, quanto maior o valor do pulso de carga t_p maior a discrepância observada entre os modelos Visco-Ref. e Visco. Essa pequena discrepância de resultados pode estar associada a diversos fatores, dentre eles: na formulação dos elementos finitos empregados, na discretização dos modelos ou então nos métodos de solução das equações incrementais do problema, não disponíveis no artigo da referência para comparação.

Ao final do tempo normalizado ($t/t_p = 2$), os modelos viscoelásticos apresentam um deslocamento vertical residual, resultante da lenta dissipação da energia (mecânica em térmica) armazenada no material viscoelástico, sendo que esse deslocamento residual é maior quanto maior o pulso de carga aplicado (ou seja, menor a velocidade do veículo). No entanto, esse comportamento não é observado nos modelos elásticos, como pode ser constatado na Figura 3.

As Figuras 4 e 5 ilustram a distribuição das tensões normal vertical (σ_y) e horizontal (σ_x) ao longo da profundidade do revestimento asfáltico, empregando o modelo viscoelástico (Visco) e considerando t_p igual a 0,01s.

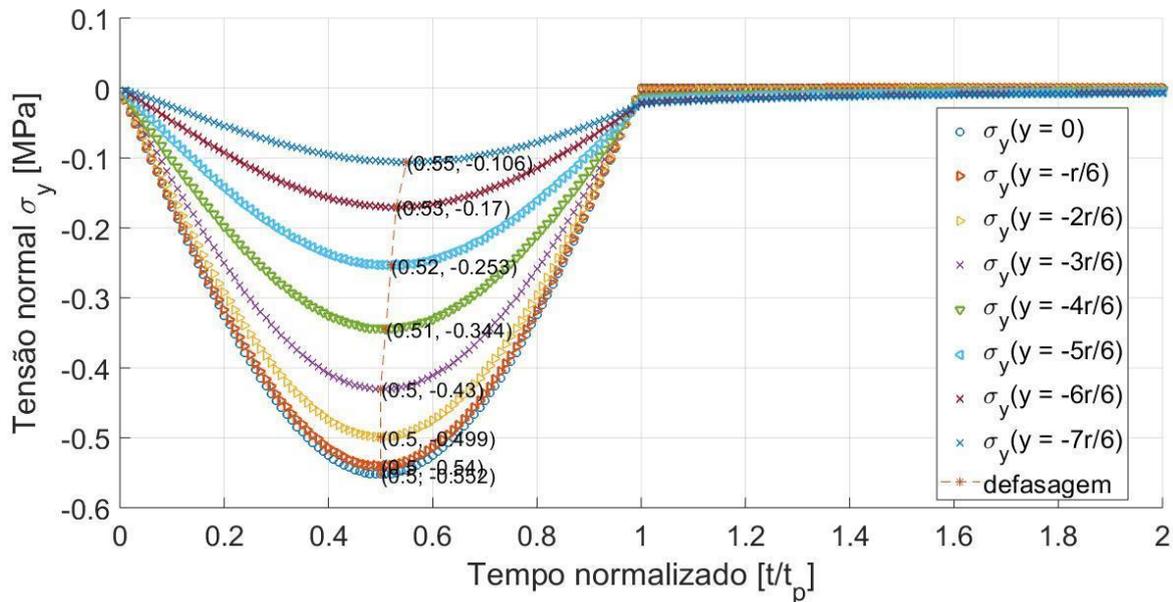


Figura 4 – Distribuição da tensão normal vertical ao longo da profundidade do revestimento asfáltico obtido com o modelo viscoelástico para $t_p = 0,01s$.

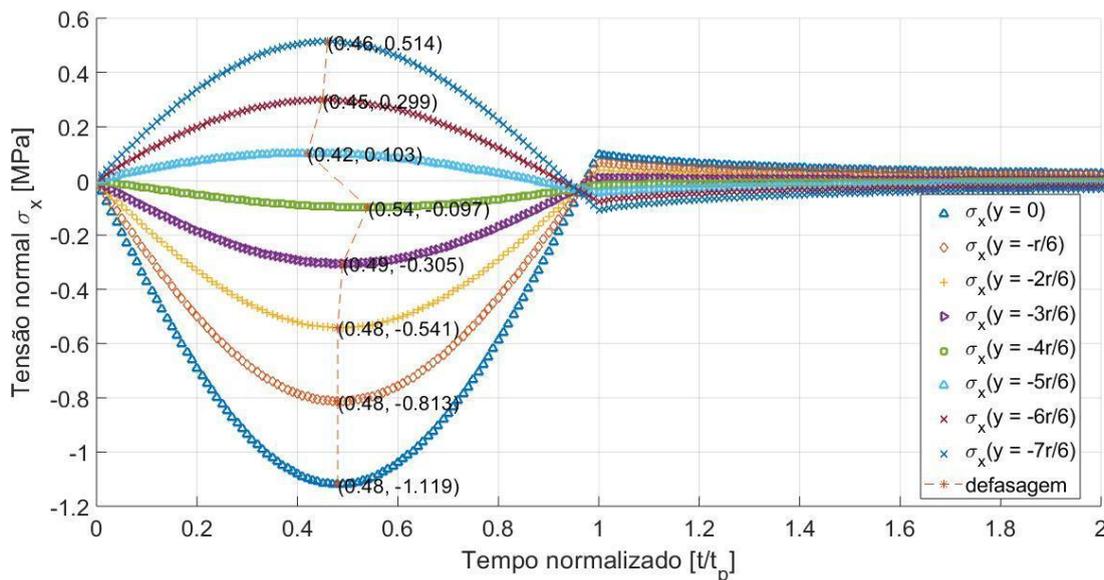


Figura 5 – Distribuição da tensão normal horizontal ao longo da profundidade do revestimento asfáltico obtido com o modelo viscoelástico para $t_p = 0,01s$.

Na Figura 4, σ_y assume os valores extremos de -0,552 MPa na posição $y = 0$ (ou seja, na superfície do pavimento) e -0,106 MPa na posição $y = -7r/6$ (ou seja, próximo da interface revestimento-base). Observa-se assim, uma redução percentual de 80,971 % no valor de σ_y na vizinhança da interface revestimento-base. Como pode ser visto na Figura 4, esses dois

valores extremos de tensões ocorrem para tempos normalizados distintos (para t/t_p iguais a 0,50 e 0,55 quando $\sigma_y = -0,552$ MPa e $\sigma_y = -0,106$ MPa, respectivamente), ou seja, conforme o aumento da espessura do revestimento observa-se um aumento gradativo do tempo de retardamento observado na resposta da tensão vertical máxima que ocorre ao longo da profundidade do revestimento.

Conforme ilustrado na Figura 5, a tensão normal σ_x assume o valor mínimo de -1,119 MPa (em $y = 0$ e $t/t_p = 0,48$) e o valor máximo de 0,514 MPa (em $y = -7r/6$ e $t/t_p = 0,46$), ou seja, observa-se uma redução percentual de 54,066 % no valor da tensão σ_x próximo do revestimento-base, correndo também uma inversão no seu sentido (passando de uma tensão normal de compressão na superfície do revestimento para de compressão na posição indicada).

Além disso, observasse em $\sigma_x (y = 0)$ a inversão nas tensões normais conforme o tempo de excitação da estrutura, passando de uma tensão normal de compressão (entre os instantes 0 a 0,97 t/t_p) para tensão normal de tração (entre 0,97 a 2 t/t_p). Essa curva corresponde a máxima amplitude de variação da tensão normal ($\Delta\sigma_x$) ao longo da profundidade do pavimento entre os instantes 0 a 2 t_p . Esta flutuação da tensão ou variação em função do tempo pode levar à estrutura a falha por fadiga, sendo que ela diminui conforme o aumento da profundidade do revestimento (ou seja, menor seria o desgaste por fadiga do material conforme o aumento da profundidade).

Esse mecanismo, de inversão das tensões normais ao longo do tempo de excitação da estrutura não pode ser capturado pelo modelo utilizando o MR, conforme é ilustrado na Figura 6(a). Já a Figura 6(b) ilustra o campo de deslocamentos mecânicos resultante obtido empregando modelo viscoelástico, no instante t/t_p igual a 0,53 com pulso de carga igual a 0,01s.

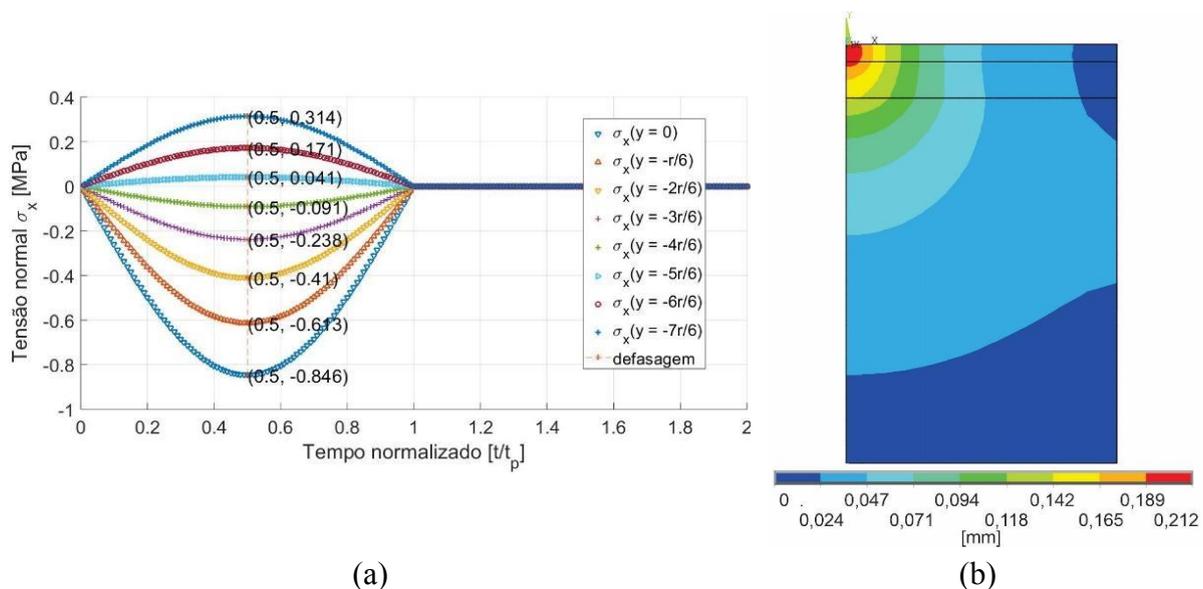


Figura 6 – Distribuição da tensão σ_x ao longo da profundidade do revestimento asfáltico obtido com o modelo elástico (a) e campo de deslocamentos resultante em t/t_p igual a 0,53 usando o modelo viscoelástico (b).

O deslocamento resultante máximo obtido no sistema é igual a 0,212 mm, conforme ilustrado na Figura 6(b), e correspondendo também ao valor máximo observado na Figura 3, com $t_p = 0,01s$, $t/t_p = 0,53$ e empregando o modelo Visco. Pode-se observar também por meio da Figura 6(b) que a proximidade das condições de contorno em $x = 20r$ do carregamento aplicado pode influenciar o valor deste deslocamento resultante. No entanto, optou-se pelo uso da largura $20r$ em respeito a geometria adotada pela referência utilizada para a validação dos modelos numéricos implementados neste trabalho.

5. Conclusões

Este trabalho apresenta a modelagem numérica via MEF de um pavimento asfáltico composto por duas camadas: um revestimento asfáltico seguido de uma base apoiada em um subleito de baixa capacidade de suporte. Dois modelos 2D são implementados no *software* ANSYS, um considerando o revestimento viscoelástico-linear, empregando a série de Prony, e outro considerando o revestimento elástico-linear, empregando o módulo de Resiliência (MR).

Tensões (verticais e horizontais) e deslocamentos verticais são obtidas ao longo da espessura do pavimento submetido a uma carga de intensidade máxima igual a 550 kPa, aplicada na forma de um pulso semi-senoidal ao longo do tempo.

A distribuição obtida do deslocamento vertical ao longo do tempo de análise usando o modelo com revestimento elástico-linear mostra-se análoga à obtida pela referência bibliografia utilizada para comparação. Já usando o modelo com revestimento viscoelástico-linear os valores obtidos são um pouco inferiores aos obtidos pela referência, mas qualitativamente indicam o mesmo comportamento da variação do deslocamento vertical com o tempo.

Os valores das tensões normais horizontais comparadas às verticais, obtidas ao longo da espessura do revestimento asfáltico, são maiores. E, dentro do intervalo de aplicação da carga dinâmica sob o pavimento (entre 0 à $1t/t_p$), a tensão normal horizontal sofre inversão de sentido com a profundidade do revestimento (apresentando um plano neutro, ou seja, de tensões σ_x nulas) enquanto a tensão vertical diminui com a profundidade do revestimento, sofrendo inversão de sentido apenas nas proximidades do final do tempo de aplicação da carga. Em ambos os casos, observa-se um decaimento lento dos valores das tensões em torno de $t/t_p = 1s$.

Uma defasagem, ou retardamento temporal, no valor das tensões normais verticais com a profundidade do revestimento é observada nas simulações numéricas realizadas, sendo que, quanto mais próximo da superfície do revestimento asfáltico menor o valor desta defasagem. Já em relação às tensões normais horizontais, essa defasagem também aumenta com a profundidade do revestimento, entretanto somente até o seu plano neutro. Além disso, a amplitude das tensões normais obtidas ao longo do tempo varia conforme a profundidade do revestimento, sendo máxima na superfície do pavimento, indicando que o mecanismo de fadiga pode se iniciar da superfície do pavimento para o seu interior.

A capacidade de alternância entre tensões normais de tração e de compressão ao longo do tempo é observada no revestimento que emprega o modelo viscoelástico, já o modelo elástico-linear não consegue captar essa alternância, bem como a defasagem no valor das tensões normais com a profundidade do revestimento asfáltico.

Referências

- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. & SOARES, J. B.** *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 4ª Edição. Petrobras: ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- BROWN, S. F.** *Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design*. Highway Research Record, vol. 431, pp. 38–49, 1973.
- CHEN, F., BALIEU, R. & KRINGOS, N.** *Thermodynamics-based finite strain viscoelastic-viscoplastic model coupled with damage for asphalt material*. International Journal of Solids and Structures. p-1:13, 2017.
- CHRISTENSEN, R. M.** *Theory of Viscoelasticity: An Introduction*. Editora Academic Press, New York, 2nd edition, 1982.
- EVANGELISTA JUNIOR, F.** *Análise Quase-estática e dinâmica de pavimentos asfálticos*. Dissertação de Mestrado. UFC, 2006.
- HEMMAT, A., NANKALI, N., AGHILINATEGH, N.** *Simulating stress–sinkage under a plate sinkage test using a viscoelastic 2D axisymmetric finite element soil model*. Soil & Tillage Research 118 (2012) 107–116.
- LEE, H. J.** *Uniaxial Constitutive Modeling of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Modeling*. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 1996.
- MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G.** *Mecânica dos Pavimentos*. 3ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- NOGUEIRA SILVA, H.** *Caracterização Viscoelástica Linear de Misturas Asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, UFC, 2009.
- PORTELA, E. L.** *Análise viscoelástica de materiais asfálticos considerando os efeitos da temperatura e do dano*. Dissertação de Mestrado, UFC, 2011.
- PORTELA, E. L., PARENTE JR., E., BOTELHO, R. P. & HOLANDA, A. S.** *Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos pelo método dos elementos finitos*. p. 1484-1495. XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza-CE, 03-09 de novembro de 2008. ISBN: 978-85-87893-14-7.
- TORQUATO SILVA, S. A., VIDAL, P. J. F., HOLANDA, A. S. & PARENTE JÚNIOR, E.** *Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos usando elementos finitos e infinitos*. Revista Transportes. Vol. 2, n. 3, p. 5 – 13, 2013. ISSN: 2237-1346 (online). DOI: 10.4237/transportes.v2i3.676.
- XU, Q. & PROZZI, J. A.** *A time-domain finite element method for dynamic viscoelastic solution of layered-half-space responses under loading pulses*. Computers and Structures, v. 160, p. 20-39, 2015.