

Análises probabilística e de sensibilidade aplicadas ao estudo de um pavimento asfáltico com revestimento modelado via série de Prony

Probabilistic and Sensitivity Analyses Applied to the Study of an Asphalt Pavement with a Prony Series Modeled Overlay

¹Albert Willian Faria, ²Paulo Roberto Garcia

¹Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Triângulo Mineiro
(albert.faria@uftm.edu.br)

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Triângulo Mineiro
(paulo.garcia@uftm.edu.br)

RESUMO: A análise probabilística e de sensibilidade do comportamento mecânico de um pavimento asfáltico submetido um carregamento variável com o tempo, proveniente do tráfego de veículos, é analisado neste trabalho. O pavimento em estudo é estruturado em três camadas: revestimento asfáltico, base granular e subleito. O modelo probabilístico do sistema é implementado usando o Método dos Elementos Finitos no software ANSYS. As variáveis de entrada do modelo 2D incluem a geometria e as propriedades mecânicas do pavimento e do subleito, e são implementados utilizando a Simulação de Monte Carlo. Um elemento quadrático plano, de oito nós e dois graus de liberdade de translação por nó é utilizado na modelagem do sistema. O revestimento asfáltico é adotado como sendo viscoelástico-linear, sendo modelado empregando a série de Prony, enquanto os demais materiais são adotados como sendo elástico-lineares. O máximo deslocamento vertical médio sofrido pelo revestimento asfáltico é a única variável aleatória de saída do sistema, e cujo valor é comparado e validado através dos resultados determinísticos fornecidos pela literatura científica. Os resultados probabilísticos demonstram, com 95 % de probabilidade e confiança, que os deslocamentos verticais médios sofridos pelo pavimento são maiores que os correspondentes determinísticos. A incerteza associada ao valor do deslocamento vertical médio tende a ser maior no ponto em que a carga vertical atinge o seu máximo valor, diminuindo e se estabilizando conforme o tempo de análise. A análise de sensibilidade demonstra que a espessura do revestimento asfáltico e o módulo de elasticidade da base são os parâmetros que mais influenciam nos valores do deslocamento vertical máximo e no deslocamento permanente do pavimento, respectivamente.

Palavras-Chave: Pavimento Asfáltico. Método dos Elementos Finitos Probabilístico. Viscoelasticidade. Análise Probabilística. Sensibilidade.

ABSTRACT: Probabilistic and sensitivity analysis of the mechanical behavior of an asphalt pavement subjected to varying loads over time, originating from vehicle traffic, is discussed in this study. The pavement is structured in three layers: an asphalt overlay and a granular base, supported by a subgrade. The probabilistic model of the system is implemented using the Finite Element Method in the ANSYS software. The 2D model's input variables include the geometry and mechanical properties of the pavement and subgrade, and they are implemented using the Monte Carlo method. A two-dimensional quadratic element with eight nodes and two translational degrees of freedom per node is used in modeling the system. The asphalt overlay is assumed to be viscoelastic-linear and is modeled using the Prony series, while the other materials are linear-elastic. The maximum average vertical displacement experienced by the asphalt overlay is the only random output variable of the system, and its value is compared and validated against deterministic results provided in the scientific literature. The probabilistic results demonstrate, with 95% probability and confidence, that the average vertical displacements are greater than their corresponding deterministic values. The uncertainty associated with the average vertical displacement tends to be higher at the point where the vertical load reaches its maximum value, decreasing and stabilizing over the analysis period. Sensitivity analysis shows that the asphalt overlay thickness and the base's elastic modulus are the parameters that most influence the maximum vertical displacement values and the permanent displacement of the pavement, respectively.

Keywords: Asphalt Pavement. Probabilistic Finite Element Method. Viscoelasticity. Probabilistic Analysis. Sensitivity.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização experimental das propriedades mecânicas dos materiais que compõem os pavimentos asfálticos é uma tarefa desafiadora, pois envolve uma ampla variedade de fatores interdependentes, que incluem o ambiente e as condições climatológicas e a magnitude, a duração e a frequência das cargas exercidas pelo tráfego dos veículos sobre ele, bem como do estado de tensões, de natureza mecânica e/ou térmica, resultante dessas cargas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Na modelagem numérica “tradicional” de pavimentos asfálticos, as variáveis de entrada do modelo são geralmente tratadas como não aleatórias, ou seja, são consideradas determinísticas. Entretanto, essas variáveis estão sujeitas a incertezas, que vão desde a caracterização experimental das propriedades mecânicas dos materiais que compõem as camadas do pavimento (como o módulo de relaxação do revestimento, a permeabilidade dos materiais etc.), até a estimativa da geometria do traçado da via e a espessuras das camadas que compõem o pavimento, bem como da magnitude e frequência das cargas de tráfego sobre o pavimento, dentre outras fontes de incertezas (YSHIBA 2003; PARDAL 2014).

Em uma análise probabilística, são incorporadas incertezas às variáveis de entrada do modelo, o que resulta em variáveis de saída (como deslocamentos, deformações, gradientes térmicos, tensões etc.) que também são aleatórias (ALTABEY *et al.* 2018). Esse enfoque probabilístico, que leva em consideração as incertezas inerentes aos dados, tende a tornar os resultados do modelo numérico mais coerentes com as observações experimentais (PARDAL 2014; FARIA e ROCHA 2021).

Além de incorporar incertezas no modelo, outro aspecto importante a ser considerado no projeto de pavimentos é a análise do grau de influência dos parâmetros de entrada do modelo sobre os de saída. Esse tipo de análise, muitas vezes referida como análise de sensibilidade, é essencial para compreender quais parâmetros têm o maior impacto nas respostas do sistema (ALTABEY *et al.*, 2018) e, portanto, que mereçam atenção especial durante a fase de projeto e de manutenção do pavimento. Esse tipo de análise auxilia na identificação de propriedades críticas do pavimento que podem exigir ajustes, melhorias e mesmo de substituição para atender aos requisitos de desempenho, conforto e segurança estabelecidos pelas normas da área.

Conforme Huang (2004), os princípios da análise probabilística aplicada ao projeto de pavimentos foram originalmente desenvolvidos por Kher e Darter em 1973 e posteriormente incorporados no guia de projetos da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) a partir dos anos de 1986. Já a análise da sensibilidade aplicada em projetos de pavimentos, segundo Wu *et al.* (2017), tem sido extensivamente estudada desde a publicação, em 2004, do Guia de Projeto de Pavimentos com o Método Empírico-Mecânico (MEPDG) também da AASHTO.

Apesar desses avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas, é notável que ainda existe uma escassez de trabalhos científicos, notadamente nacionais, que abordem a análise probabilística e de sensibilidade no projeto de pavimentos asfálticos. Alguns trabalhos recentes sobre essa temática incluem os de Faria e Rocha (2021), empregando a análise probabilística e de sensibilidade aplicada a um pavimento de concreto sujeito a cargas térmicas, e o trabalho experimental de Anselmo *et al.* (2021) sobre a análise de sensibilidade dos parâmetros do projeto de um pavimento asfáltico.

O presente trabalho procura investigar numericamente, via método dos elementos finitos (MEF), o efeito da inclusão de incertezas nas propriedades geométricas e mecânicas de um pavimento asfáltico, para previsão estatística dos deslocamentos verticais considerando diferentes velocidades de tráfego de veículos. Interessa-se também no estudo da sensibilidade dos parâmetros de projeto do pavimento asfáltico em relação à sua resposta mecânica, em

termos do deslocamento vertical medido na superfície do seu revestimento, quando solicitado pelo tráfego de veículos. No modelo probabilístico são consideradas incertezas nas espessuras das camadas do pavimento, nos valores dos módulos de relaxação do revestimento betuminoso e de Young da base e do subleito, e nos valores do coeficiente de Poisson dos materiais constituintes do pavimento. O revestimento asfáltico é tratado como um material viscoelástico linear, enquanto as demais camadas são consideradas como materiais elástico-lineares. Vale ressaltar que esse trabalho não levará em conta os efeitos térmicos nas propriedades mecânicas do pavimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico do pavimento

No caso particular dos materiais viscoelásticos lineares, suas propriedades mecânicas são influenciadas tanto pelo tempo quanto pela taxa de carregamento, além é claro da temperatura de trabalho. Isso implica que a resposta do material não é instantânea, mas leva em consideração o histórico dos carregamentos e variações de temperatura sofridos pelo pavimento ao longo do tempo. Esse princípio, pode ser representado por uma integral de convolução na forma (CHRISTENSEN, 1982):

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

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

Como pode ser observado na Equação (1), que relaciona a tensão $\sigma(t)$ com a deformação $\varepsilon(t)$, a definição do módulo de relaxação $E(t)$ é essencial, e, neste trabalho, ele é modelado pela série de Prony conforme 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 E_∞ e E_0 respectivamente os módulos de Young em um tempo infinito ($t = \infty$) e em um tempo instantâneo ($t \rightarrow 0$), n 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 (onde $\alpha_i = E_i / E_0$) é o módulo relativo de Young, que indica a perda percentual de rigidez devido à relaxação do material. A soma de todos os termos α_i da série de Prony deve ser menor ou igual a 1.

2.2 Análises probabilística e de sensibilidade aplicadas ao estudo de pavimentos asfálticos

Uma maneira de avaliar e de estimar o impacto das incertezas nos parâmetros de entrada de um modelo e nas hipóteses adotadas de sua criação é por meio da análise probabilística. Além disso, a análise probabilística possibilita quantificar o grau de influência das incertezas de um modelo nos resultados da análise realizada via MEF (ALTABEY *et al.*, 2018).

Nesse tipo de análise, as variáveis de entrada, sejam elas geotécnicas, materiais ou estruturais, são adotadas como sendo variáveis aleatórias. Isso significa que cada variável é

definida com uma determinada distribuição de probabilidade, variando dentro de um intervalo específico, em vez de ser tratada com um valor fixo e constante em uma análise determinística, por sua vez, menos realística e robusta em relação a análise probabilística.

A Simulação de Monte Carlo (SMC) é uma das técnicas estatísticas mais comumente empregadas na análise probabilística (ALTABEY *et al.*, 2018). Ela envolve a geração de uma sequência de números aleatórios, com o objetivo de calcular a probabilidade das variáveis de saída do problema, e o seu nome é uma alusão à aleatoriedade dos jogos de azar em cassinos, sendo o Monte Carlo um dos cassinos mais famosos que deu o seu nome (ALTABEY *et al.*, 2018). A SMC pode ser utilizada em problemas de otimização, integração numérica e geração de amostras de uma distribuição de probabilidade. A principal desvantagem dessa técnica de simulação está relacionada ao custo computacional e ao tempo necessário para o processamento, devido a intensa geração de números aleatórios e a avaliação repetida do modelo a cada novo conjunto de dados de entrada gerados (ALTABEY *et al.*, 2018).

A SMC envolve a especificação de três elementos principais: a seleção e definição da distribuição de probabilidade, a criação da amostra e a geração de números aleatórios.

A Função Distribuição de Probabilidade (FDP) de uma variável aleatória X é uma função $f(x)$ usada para representar as probabilidades associadas aos possíveis valores dessa variável, conforme equação:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

A FDP é usada para calcular a probabilidade de que a variável aleatória X esteja dentro do intervalo $[a, b]$, ou seja, $0 \leq P(a < X < b) \leq 1$. Isso é possível, desde que FDP seja não negativa para todos os valores reais de x e desde que $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$.

Existem diversas FDP empregadas para modelar a distribuição de uma variável aleatória X , incluindo a distribuição: normal (gaussiana), uniforme, exponencial, de Weibull, lognormal, gamma e dentre outras. Cada uma dessas distribuições é escolhida com base na natureza das variáveis aleatórias e das incertezas associadas ao problema em questão.

Uma alternativa para descrever a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória X é o uso da Função Distribuição Acumulada (FDA). A FDA é uma função matemática $F(x)$ que fornece a probabilidade da variável aleatória X assumir um valor menor ou igual a “ x ”, quer dizer: $F(x) = P(X \leq x)$. Portanto, a FDA descreve como a probabilidade acumulada varia à medida que x aumenta.

Na modelagem probabilística de pavimentos, a estimativa das estatísticas relacionadas às variáveis de projeto é uma tarefa desafiadora, devido aos diversos fatores já apresentados nesse trabalho. Quando esses parâmetros não são disponíveis, é comum na engenharia recorrer à utilização de uma distribuição de probabilidade gaussiana com um coeficiente de variação estatística (Cov) igual a 5 %.

Além de incorporar as incertezas associadas às variáveis de entrada do modelo, uma outra etapa crucial no projeto do pavimento é a identificação das variáveis que exercem maior influência sobre as respostas mecânicas de interesse, sendo realizada por meio de uma análise de sensibilidade. Nesse sentido, o coeficiente de correlação (r) trata-se de uma estatística que relaciona as variáveis de entrada de um modelo com suas variáveis de saída. Ele é obtido a partir dos dados de uma amostra e varia entre -1 e +1, onde -1 indica uma correlação negativa,

+1 uma correlação positiva e 0 indica a ausência de correlação entre as variáveis de entrada e saída.

Basicamente, existem dois tipos de coeficientes de correlação, o de Pearson (CCP) e de Spearman (CCS), representados pela equação (FREY e PATIL, 2002):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

sendo n o tamanho da amostra do processo probabilístico. No CCP, \bar{x} é o valor médio da variável aleatória X no grupo de observações $[x_1, x_2 \dots x_n]$, \bar{y} é o valor médio da variável aleatória Y no grupo de observações $[y_1, y_2 \dots y_n]$. Já, no CCS, x_i e y_i tratam-se das classificações dessas variáveis dentro do grupo de observações correspondente, enquanto \bar{x} e \bar{y} são as classificações de suas médias.

Segundo Frey *et al.* (2004), os coeficientes CCP e CCS são empregados respectivamente no estudo da sensibilidade global de modelos lineares e monotônicos. O CCP avalia a força da associação linear existente entre os valores de entrada com os de saída do modelo, enquanto o CCS mede a força da relação monotônica existente entre as variáveis aleatórias (randômicas). Neste trabalho, será utilizado o CCS para a análise de sensibilidade estatística do pavimento de concreto devido a não linearidade do problema tratado.

Nesse trabalho, incertezas são inseridas nas propriedades mecânicas (módulos de relaxação, módulo de Young e coeficiente de Poisson) e geométricas (espessura) das camadas dos materiais constituintes de um pavimento asfáltico. Além disso, as variáveis de entrada do modelo probabilístico implementado nesse trabalho são consideradas insignificativas quando apresentam correlações $-0,1 < r < 0,1$.

O pavimento asfáltico implementado nesse trabalho foi estudado numericamente, via MEF, por Portela *et al.* (2008), entretanto desprezando a inclusão de incertezas nas variáveis de entrada do modelo e sem considerar a análise de sensibilidade, e os seus resultados serão comparados com os probabilísticos apresentados no presente trabalho.

Para a inserção das incertezas e análises probabilísticas e de sensibilidade de interesse, esse trabalho utiliza a Simulação Monte Carlo. Além disso, a temperatura do pavimento asfáltico será adotada como sendo constante, sendo estudado nesse trabalho somente a influência da taxa de aplicação do carregamento sob o comportamento mecânico do pavimento asfáltico.

3. METODOLOGIA

O pavimento asfáltico estudado nesse trabalho é composto por uma camada de revestimento asfáltico, base e subleito, conforme ilustrado na Figura 1. O revestimento trata-se de uma mistura usinada a quente, enquanto a base é composta por solo e brita.

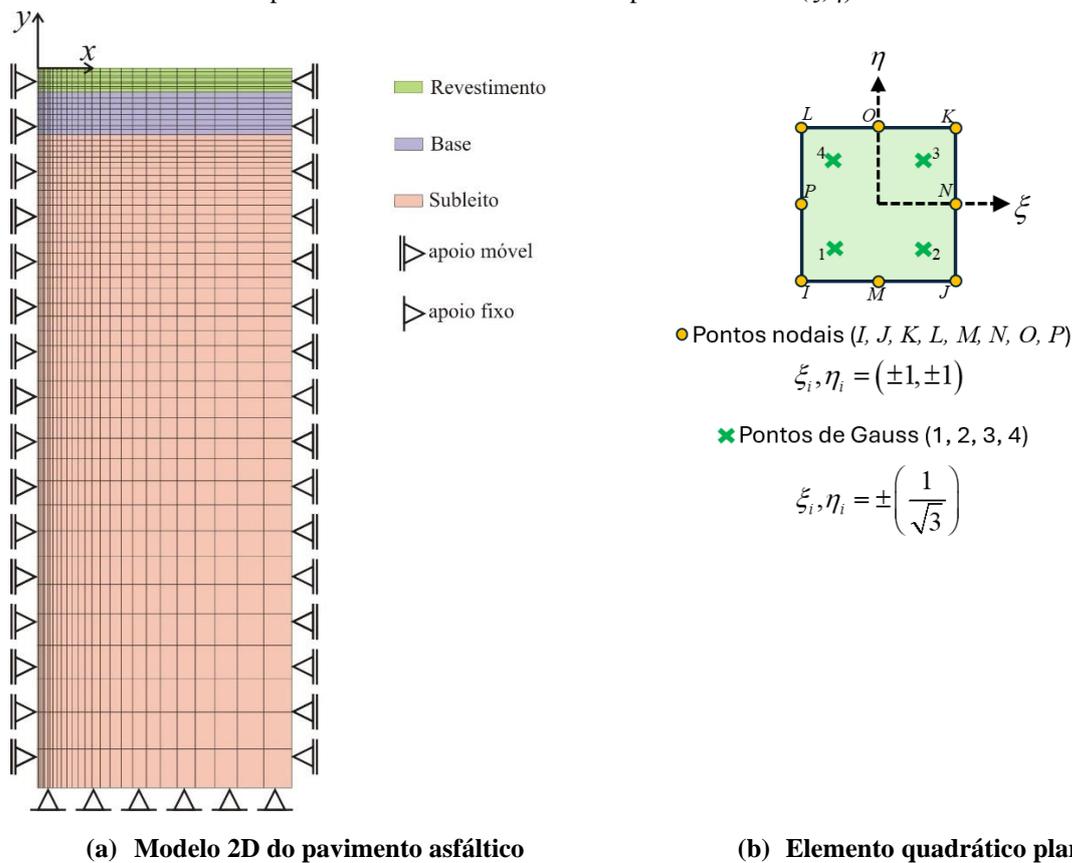
A malha do sistema formado por essas três camadas é ilustrada na Figura 1, em (a). Sendo que, o elemento quadrático plano utilizado na discretização do sistema apresenta oito nós, quatro pontos de Gauss para a integração numérica reduzida, e dois graus de liberdade por nó (deslocamentos nas direções x e y), denominado de Plane183 no *software* ANSYS, ilustrado na Figura 1, em (b), no sistema de coordenadas parametrizadas $\xi-\eta$. O revestimento asfáltico, a base e o subleito foram discretizados com 8, 8 e 40 elementos ao longo da direção vertical, enquanto na direção horizontal foram empregados 20 elementos, perfazendo assim um total de 9746 graus de liberdade. Conforme ilustrado na Figura 1, em (a), o revestimento e a base apresentam elementos mesma dimensão na direção y , enquanto a partir do início do

subleito é utilizada uma taxa de aumento do tamanho dos elementos igual a 1/3. Já na direção x é utilizada a mesma taxa de aumento do tamanho dos elementos de 1/5.

São empregados na modelagem do sistema os conceitos de axissimetria e a discretização de somente a metade de sua geometria, visando economizar o custo e o tempo de processamento computacional, especialmente para a análise probabilística.

O sistema modelado possui um comprimento total horizontal de $40r$ e vertical de $50r$, onde r é igual a $0,15$ m, definido como o raio de aplicação da carga proveniente do tráfego dos veículos $f(t)$. O revestimento asfáltico e a base apresentam espessuras iguais a $4/3r$ e $8/3r$, respectivamente.

Figura 1 - Modelo do pavimento asfáltico no sistema de coordenadas cartesianas (x, y) e elemento quadrático plano no sistema de coordenadas parametrizadas (ξ, η) .



Os deslocamentos na direção horizontal nas posições $x = 0$ e $x = 20r$ são assumidos com sendo nulos, conforme representado pelos apoios móveis ilustrados na Figura 1, em (a). Além disso, na posição $y = -50r$, ambos os deslocamentos (horizontal e vertical) são adotados nulos, de acordo com os apoios fixos representados na mesma figura.

A carga $f(t)$ proveniente do tráfego do veículo é aplicada em uma área circular de raio r e possui magnitude máxima de $0,550$ MPa. Já a forma dessa carga com o tempo é de um pulso semi-senoidal com duração determinada pelo pulso de carga t_p .

A velocidade do tráfego de veículos sobre o revestimento asfáltico, em km/h, pode ser calculada usando a equação (BROWN, 1973, *apud* EVANGELISTA JUNIOR, 2006):

$$\log(t_p) = 0,2(1 - 4,7 \log(V)) \quad (5)$$

A partir dessa equação (5), obtém-se as velocidades aproximadas de 7 e 82 km/h, correspondentes à aplicação dos pulsos de carga (t_p) iguais a 0,1 s e 0,01 s, respectivamente. Portanto, quanto maior o valor de t_p menor a velocidade V do veículo sobre o pavimento.

As propriedades mecânicas e viscoelásticas dos materiais constituintes do pavimento asfáltico são listadas na Tabela 1. A Tabela 1, em (a), apresenta os valores dos coeficientes da série de Prony fornecidos por Lee (1996) *apud* Portela *et al.* (2008), obtidos para a temperatura de 25°C. A partir desses dados, os coeficientes (α_i) da série de Prony podem ser calculados utilizando a Equação (2).

Nesse trabalho, são adicionadas incertezas nas espessuras do revestimento asfáltico (H_r), da base (H_b) e do subleito (H_s), além de incertezas nos módulos de relaxação do revestimento (E_r), da base (E_b) e do subleito (E_s) e nos valores dos coeficientes de Poisson do revestimento (P_r), da base (P_b) e do subleito (P_s). São definidas para todas essas nove variáveis mecânicas de entrada do sistema uma distribuição Gaussiana com covariância (Cov) de 5%.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e viscoelásticas dos materiais constituintes do pavimento.

Termo	Revestimento asfáltico				
i	E_i (MPa)	τ_i (s)	Camada	E ou $E(t)$ (MPa)	ν
∞	1,172	-			
1	3100	2,20E-5			
2	4310	2,20E-4			
3	3460	2,20E-3			
4	2020	2,20E-2	Revestimento asfáltico	Eq. (2) e tabela (c)	0,35
5	1270	2,20E-1	Base	300	0,30
6	272	2,20E+0	Subleito	100	300
7	65,9	2,20E+1			
8	14,5	2,20E+2			
9	1,52	2,20E+3			
10	0,710	2,20E+4			
11	0,0588	2,20E+5			

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

O deslocamento vertical que ocorre na superfície do revestimento asfáltico (posição $x = 0$ e $y = 0$, conforme Figura 1, em (a)) ao longo do tempo é adotado como sendo a única variável mecânica de saída de interesse nas simulações probabilísticas desse trabalho.

O tempo total de análise (t) empregado nas simulações probabilísticas varia conforme o valor do pulso de carga (t_p) aplicado. Para t_p igual a 0,1 s e 0,01 s os tempos totais de análise são iguais respectivamente a 0,2 s e 0,02 s. Nas simulações probabilísticas, em vista a redução de custo e tempo de processamento computacional, o tempo total de análise foi subdividido em apenas 20 incrementos de tempo (Δt).

O número de amostragens empregado na Simulação de Monte Carlo (SMC) foi variado de maneira contínua até a verificação da convergência dos resultados estatísticos de interesse, sendo adotado neste trabalho 2000 amostras.

4. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

A Figura 2, em (a), ilustra por exemplo o deslocamento vertical médio (w), medido na superfície do revestimento asfáltico no instante de tempo $t = 0,5$ s, resultante da aplicação do

pulso de carga 0,1 s, conforme a variação do número de amostras, considerando um limite de confiança de 95 %.

A Figura 2, em (a), demonstra a convergência do valor médio da variável de saída w conforme o aumento do número de amostras utilizadas na SMC, já em (b), é ilustrada o histograma do módulo de relaxação do revestimento asfáltico (E_r) do modelo probabilístico obtido aplicando o pulso de carga de 0,1 s.

Nas Figuras 3 e 4 são comparados, entre o intervalo de tempo normalizado 0 e $2 t/t_p$, os valores (em módulo) do deslocamento vertical médio, máximo e mínimo com o deslocamento vertical (determinístico) fornecido no trabalho de Portela *et al.* (2008), denominado “Determinístico Ref.”, obtidos aplicando os pulsos de carga 0,1 s e 0,01 s, ambos medidos na superfície do revestimento asfáltico.

Figure 2 - Histórico do valor do deslocamento vertical médio (a) e histograma do módulo de relaxação do revestimento asfáltico (b) empregando o pulso de carga igual a 0,1 s.

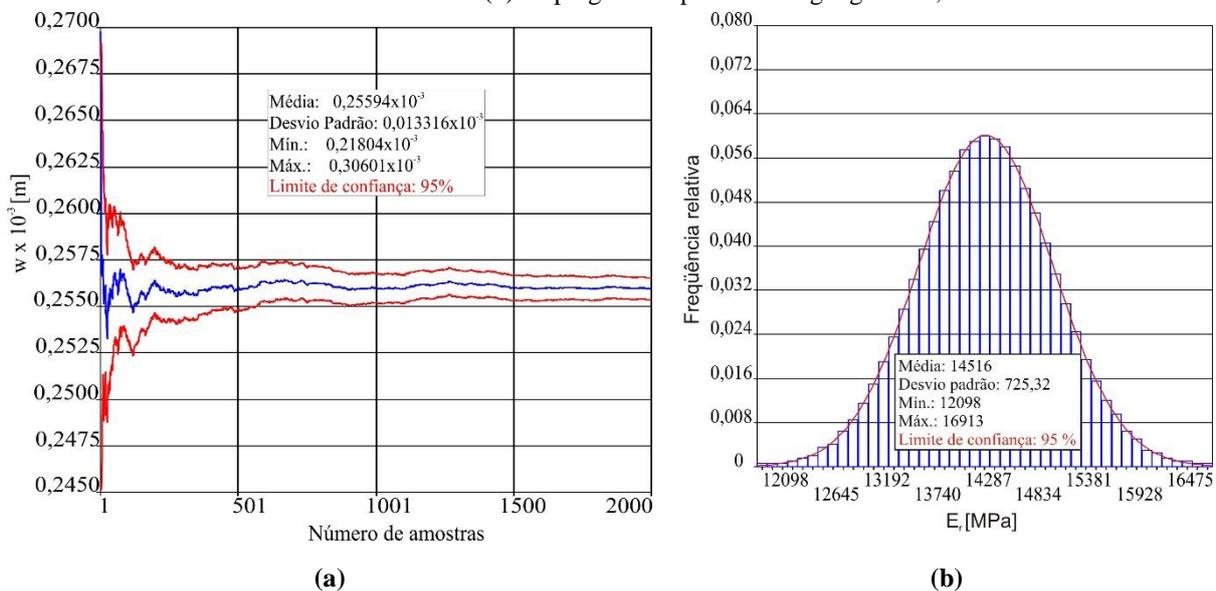


Figura 3 - Deslocamento vertical médio da superfície do revestimento asfáltico em função do tempo normalizado aplicando o pulso de carga 0,1 s.

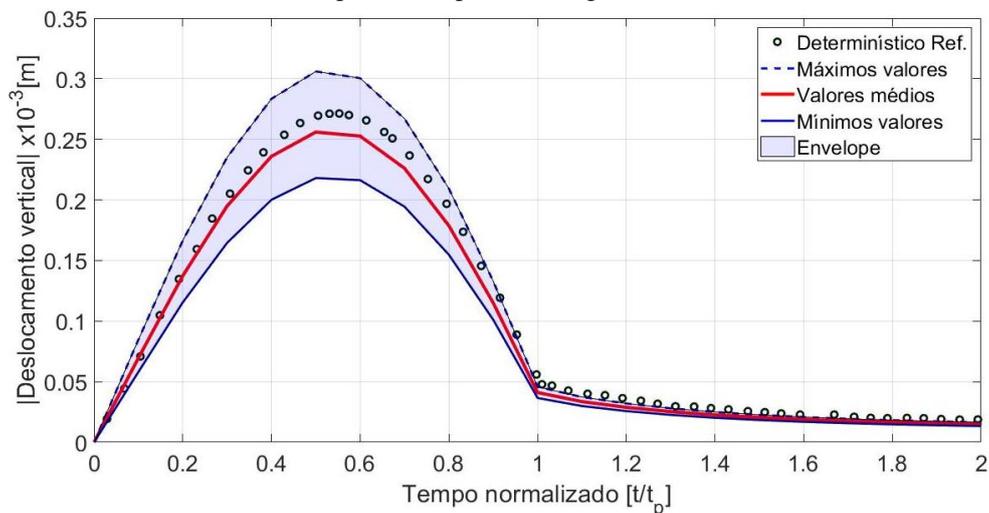
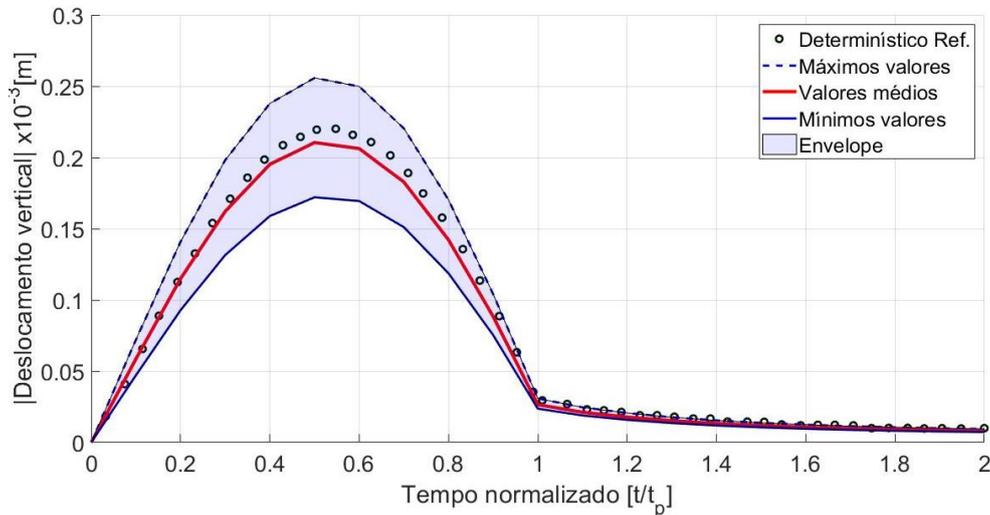


Figura 4 - Deslocamento vertical médio da superfície do revestimento asfáltico em função do tempo normalizado aplicando o pulso de carga 0,01 s.

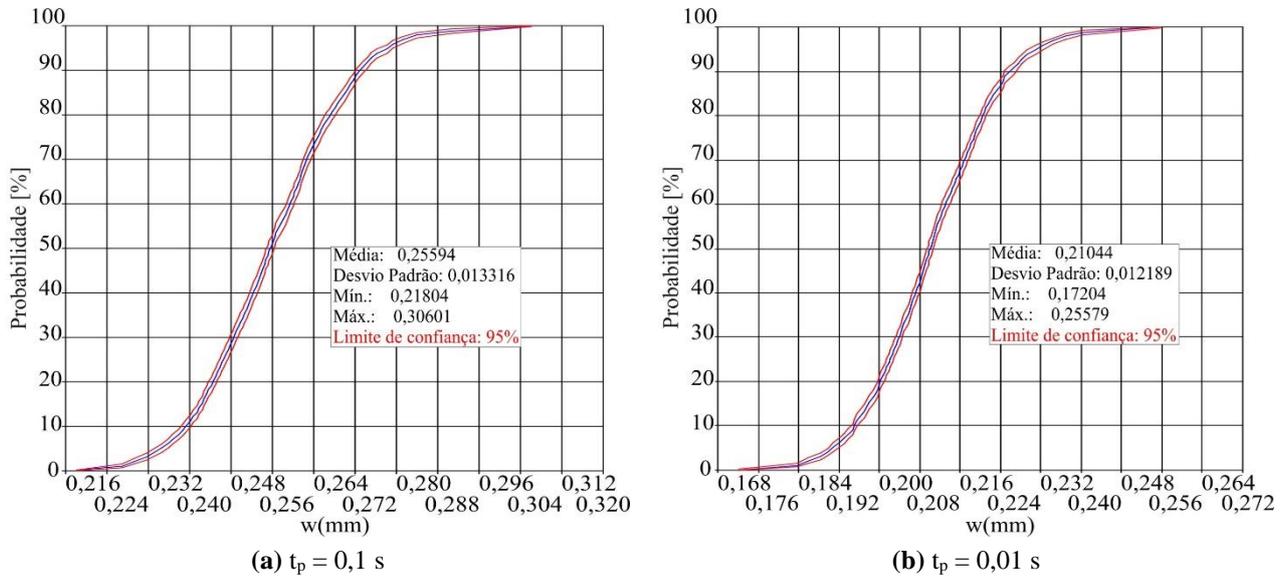


A partir das Figuras 3 e 4 pode-se observar que, quanto maior o valor do pulso de carga (correspondente a um tráfego de baixa velocidade) maior o deslocamento vertical médio sofrido pelo revestimento asfáltico ao longo do tempo normalizado de análise. Verifica-se também que, independentemente do valor do pulso de carga aplicado, em torno de $t/t_p = 0,5$ (correspondente ao pico de aplicação da carga) ocorre a discrepância mais acentuada (maior variação) entre os valores dos deslocamentos vertical médio, máximo e mínimo, medidos na superfície do revestimento asfáltico ao longo do tempo de análise. Constata-se ainda que, independentemente do valor do pulso de carga aplicado, os deslocamentos verticais do modelo determinístico “Determinístico Ref.” são um pouco maiores que os valores médios obtidos com o modelo probabilístico implementado neste trabalho.

Ao final do tempo normalizado de análise ($t/t_p = 2$), como pode ser visualizado nas Figuras 3 e 4, ambos os modelos apresentam um deslocamento vertical residual (permanente), resultante da lenta dissipação da energia (mecânica em térmica) armazenada no material viscoelástico do revestimento asfáltico. O deslocamento residual é maior quanto maior o pulso de carga aplicado.

A Figura 5 ilustra a função de distribuição acumulada (FDA) do deslocamento vertical médio w , medido na superfície do revestimento asfáltico, em $t/t_p = 0,5$ quando aplicados os dois pulsos de carga obtido, adotando um limite de confiança de 95 %.

Figura 5 - FDA do deslocamento vertical médio da superfície do revestimento asfáltico considerando um pulso de carga igual a 0,1 s (a) e 0,01s (b) para $t/t_p = 0,5$ s.



Com um limite de confiança de 95%, tem-se da Figura 5 e *software* ANSYS, que o valor do deslocamento vertical médio (w) obtido em $t/t_p = 0,5$ quando são aplicados os pulsos de carga iguais a 0,1 s e 0,01 s são iguais a $0,2559 \times 10^{-3}$ m e $0,2104 \times 10^{-3}$ m e desvios padrões de 0,013 m e 0,012 m, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta os valores das propriedades mecânicas e geométricas do sistema e o valor do deslocamento vertical obtido em t/t_p igual a 0,5, considerando uma probabilidade de ocorrência menor que 95 % e um limite de confiança de 95 %.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada e saída do sistema considerando 95 % de probabilidade de ocorrência e limite de confiança.

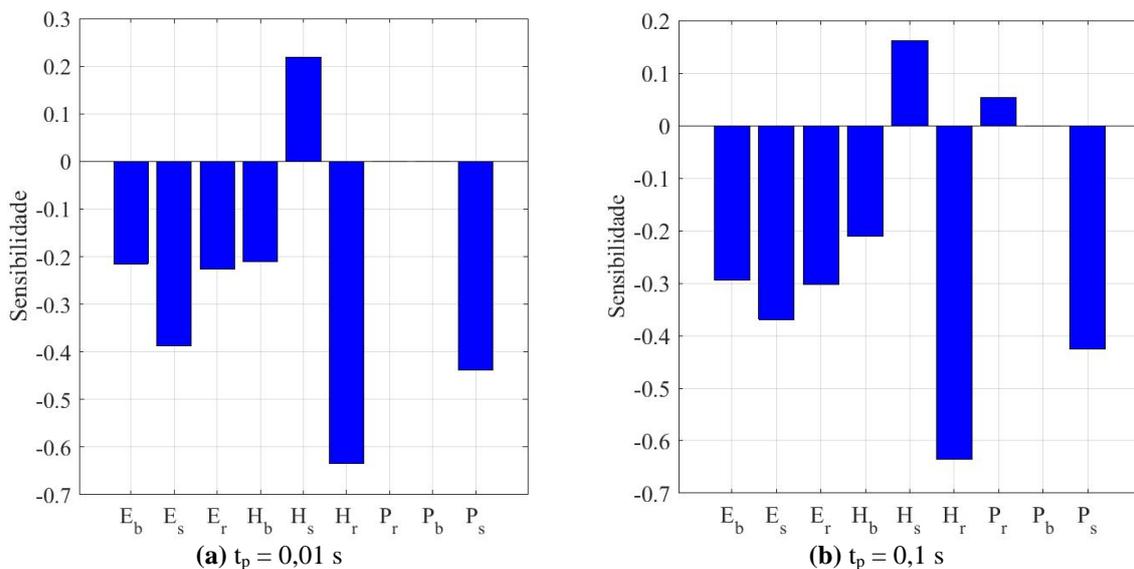
t_p	0,1s	0,01s
$H_r \times 10^3$ [m]	216,435	216,476
$H_b \times 10^3$ [m]	432,919	432,880
$H_s \times 10^3$ [m]	8116,84	8116,86
$E_r \times 10^6$ [Pa]	1571,01	1570,93
$E_b \times 10^6$ [Pa]	324,658	324,648
$E_s \times 10^6$ [Pa]	108,234	108,222
P_r	0,3788	0,3788
P_b	0,3247	0,3247
P_s	0,4329	0,4329
$w_{95} \times 10^3$ [m]	0,2783	0,2309

Na tabela 1, H_r , H_b e H_s são respectivamente as espessuras do revestimento, da base e do subleito, já E_r , E_b e E_s são os módulos de relaxação do revestimento, de Young da base e do subleito, e P_r , P_b e P_s são os coeficientes de Poisson do revestimento, da base e do subleito.

Nota-se da Tabela 2 que as variáveis de entrada do modelo probabilístico praticamente são independentes do pulso de carga aplicado, o que não ocorre evidentemente com o deslocamento vertical calculado (w_{95}) considerando 95 % de probabilidade de ocorrência, com um limite de confiança de 95 %.

A Figura 6 ilustra a sensibilidade das variáveis de entrada do modelo probabilístico em relação ao valor do deslocamento vertical médio (w), medido na superfície do revestimento asfáltico, obtido no instante de tempo normalizado 0,5, adotando um nível de significância igual a 2,5%, quando são aplicados os pulsos de carga 0,01 s e 0,1 s.

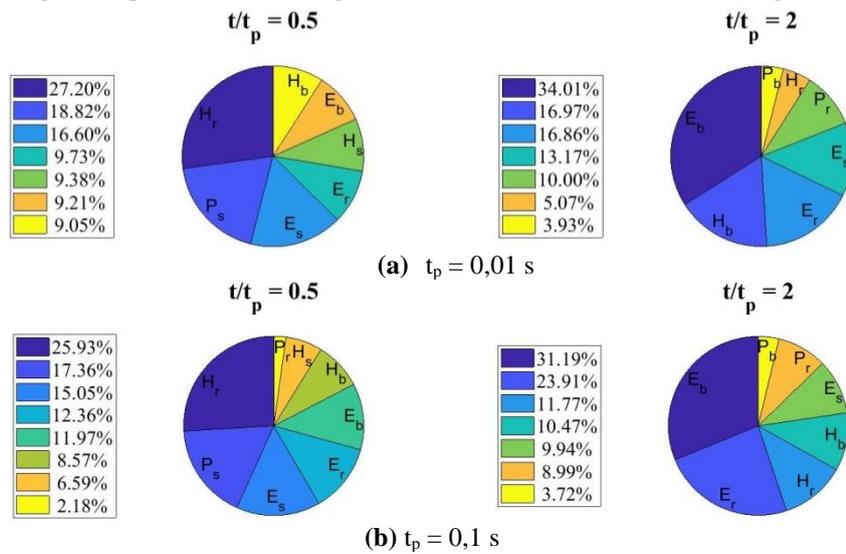
Figura 6 - Sensibilidade das variáveis de entrada do modelo em relação ao deslocamento w no instante t/t_p igual a 0,5, aplicando $t_p = 0,01$ s e 0,1 s, com um nível de significância de 2,5 %.



Conforme pode ser verificado na Figura 6, o aumento dos valores das variáveis de entrada H_s e P_r conduz a um aumento no valor do deslocamento vertical médio (w) medido na superfície do revestimento asfáltico, visto que esses dois parâmetros são positivos, enquanto o aumento das demais variáveis analisadas leva a uma diminuição no valor do w . Nota-se também que, o valor do deslocamento obtido no instante de tempo $t/t_p = 0,5$ é mais sensível a variável H_r , independentemente do valor do pulso de carga aplicado. A diminuição dessa variável acarreta o aumento do w , enquanto, inversamente, o aumento da espessura do subleito (H_s) acarreta o aumento do w .

Já a figura 7 ilustra a distribuição percentual e normalizada de sensibilidade das variáveis de entrada do modelo probabilístico em relação ao valor do deslocamento w obtido nos instantes de tempo normalizados 0,5 e 2, quando são aplicados os pulsos de carga 0,01 s e 0,1 s, com um nível de significância de 2,5 %.

Figura 7 - Distribuição percentual e normalizada da sensibilidade das variáveis de entrada em relação a w para os dois pulsos de carga e tempos normalizados iguais a 0,01 s e 0,1 s, com um nível de significância igual a 2,5 %.



Conforme ilustrado na Figuras 7, também se constata que a espessura do revestimento (H_r) é a variável que mais influência no valor do deslocamento vertical médio (w), medido na superfície do revestimento asfáltico no instante de tempo normalizado 0,5. Já no instante de tempo normalizado igual a 2 ($t/t_p = 2$), independente do pulso de carga aplicado, o módulo de elasticidade da base (E_b) é a variável de entrada do modelo probabilístico que mais influencia no seu valor dentre as demais analisadas.

Para t/t_p entre 0 e 1, o comportamento mecânico (em termos do deslocamento vertical médio) do revestimento asfáltico é mais dependente da espessura do revestimento viscoelástico (H_r) do que das demais variáveis de entrada do modelo probabilístico. Já para t/t_p entre 1 e 2, o valor do w é mais influenciado pelo módulo de elasticidade da base do pavimento (E_b) em detrimento da espessura do revestimento (H_r).

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A forma da distribuição do deslocamento vertical médio sofrido pelo revestimento asfáltico ao longo do tempo de análise mostra-se análoga à obtida de Portela *et al.* (2008) para comparação, empregando, no entanto, um modelo que despreza incertezas. Além disso, os deslocamentos verticais médios obtidos com o modelo probabilístico são menores que os correspondentes obtidos por Portela *et al.* (2008). Entretanto, esses deslocamentos verticais encontram-se dentro da envoltória de deslocamentos probabilísticos para t/t_p entre 0 e 1 e um pouco fora entre 1 e 2.

Os resultados probabilísticos demonstram que existe uma incerteza maior no valor do deslocamento vertical médio, medido na superfície do revestimento asfáltico no instante de tempo em que a carga semi-senoidal aplicada atinge o seu máximo valor (550 kPa), considerando 95 % de probabilidade de ocorrência com um limite de confiança de 95 %.

A análise de sensibilidade demonstra que a espessura do revestimento asfáltico tem um papel importante na redução do deslocamento vertical médio sofrido pelo pavimento na fase de aplicação da carga do tráfego, enquanto o módulo de elasticidade da base tem um papel predominante no valor do deslocamento residual médio do pavimento asfáltico.

Não foi encontrado na literatura científica trabalhos que apresentem a envoltória dos deslocamentos mecânicos sofridos pelo pavimento ao longo do tempo e as funções FDA da resposta mecânica do pavimento conforme a velocidade de tráfego de veículos, e que podem ser ferramentas probabilísticas úteis no projeto e na manutenção preventiva de danos aos mesmos.

6. REFERÊNCIAS

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4 ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010. 504p.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity: An Introduction**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982.

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**, v. 118, p. 107-116, 2012. DOI: 10.1016/j.still.2011.10.016

LEE, H-J. **Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage modeling**. PhD Dissertation. 454p. Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 1996.

PORTELA, E. L.; PARENTE JR., E.; BOTELHO, R. P.; HOLANDA, A. S. Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos pelo método dos elementos finitos. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 22, 2008, Fortaleza. **Anais ... Fortaleza: ANPET**, 2008. p. 1484-1495. ISBN: 978-85-87893-14-7.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2nd ed. New Jersey: Pearson Education, 2004.

WU, Z.; YANG, X.; SUN, X. Application of Monte Carlo filtering method in regional sensitivity analysis of AASHTO Ware Pavement ME design. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 4, n. 2, p. 185-197, 2017. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.03.006

ALTABEY, W. A.; NOORI, M.; WANG, L. **Using ANSYS for finite element analysis, Volume II: Dynamic, probabilistic design and heat transfer analysis**. New York: Momentum Press, 2018.

FREY, H. C.; MOKHTARI, A.; ZHENG, J. **Recommended practice regarding selection, application, and interpretation of sensitivity analysis methods applied to food safety process risk models**. Office of Risk Assessment and Cost-Benefit Analysis. Washington, DC: Department of Agriculture, 2004.

FREY, H. C.; PATIL, S. R. Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. **Risk Analysis**, v. 22, n. 3, p. 553-578, 2002. DOI:10.1111/0272-4332.00039.

BROWN, S. F. Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. **Highway Research Record**, v. 431, p. 38–49, 1973.

EVANGELISTA JUNIOR, F. **Análise Quase-estática e dinâmica de pavimentos asfálticos**. 104p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2006.

FARIA, A. W.; ROCHA, F. M. Análise termomecânica e probabilística de um pavimento de concreto em regime transiente modelado via Método dos Elementos Finitos. **Revista Perspectivas Online: Exatas&Engenharia**, v. 11, n. 33, p. 1-18, 2021. DOI: 10.25242/885X113320212352

ANSELMO DA SILVA, L.; RAUSCH, P. M.; SANTIAGO, R. S. Análise probabilística de parâmetros construtivos em um pavimento flexível no município de Campo Verde - MT, com o Método FOSM. **In:** ALIN Jr, Organizador (org.). Tecnologia em controle de obras: 20 anos de contribuição do IFTM para construção civil. 1ª ed. Guarujá: Editora Científica Digital, 2021. p. 372-399. DOI:10.37885/230412750

PARDAL, M. C. **Modelos probabilísticos de previsão de fendilhamento em pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

YSHIBA, J. K. **Modelos de desempenho de Pavimentos: estudo de rodovias do estado do Paraná.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2003.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.