



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

MODELAGEM 3D POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CORPO DE PROVA BETUMINOSO CONSIDERANDO O EFEITO VISCOELÁSTICO APROXIMADO VIA SÉRIE DE PRONY

Felipe Pulheis Rodrigues, felipepulheis@hotmail.com¹
Albert Willian Faria, albert.faria@uftm.edu.br²

^{1,2} Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM, Av. Randolfo Borges Júnior, 2856 - Univerdecidade, Uberaba - MG, 38064-100,

Resumo. Pavimentos asfálticos são estruturas sujeitas a cargas repetidas, devido ao tráfego de veículos, e a variações térmicas e hidrológicas ao longo de sua vida útil, e o conhecimento desse comportamento pode conduzir ao aumento de sua vida útil. Este artigo aborda a modelagem, via método dos elementos finitos, de um corpo de prova de uma mistura asfáltica betuminosa, empregada como revestimento asfáltico. Um modelo 3D e no formato cilíndrico desse corpo de prova é realizado no software ANSYS, empregando os princípios de axissimetria, em vista a redução do custo computacional, e uso da Série de Prony para a modelagem matemática do comportamento viscoelástico da mistura. O elemento sólido (Solid65) com quatro nós e três graus de liberdade de translação por nó é empregado na modelagem. Os máximos deslocamentos sofridos pela amostra quando submetida a uma pressão de compressão variável com o tempo são obtidos e comparados com dados experimentais e numéricos da literatura. Os efeitos térmicos não serão considerados. Os resultados numéricos demonstram similitude do deslocamento axial x tempo e um erro percentual no de no máximo 3,06 % do deslocamento axial ao final comparado com dados experimentais.

Palavras chave: Viscoelasticidade. Método dos elementos finitos. Mistura asfáltica betuminosa. Série de Prony.

Abstract. Asphalt pavements are structures subjected to repeated loads due to vehicle traffic and thermal and hydrological variations throughout their lifespan. Understanding this behavior can lead to an increase in their lifespan. This paper addresses the modeling, using the finite element method, of a test specimen of a bituminous asphalt mixture used as asphalt pavement. A 3D cylindrical model of this test specimen is created in the ANSYS software, employing axisymmetric principles to reduce computational costs, and using the Prony series for the mathematical modeling of the viscoelastic behavior. The solid element (Solid65) with four nodes and three degrees of translational freedom per node is employed in the modeling. The maximum displacements experienced by the sample under variable time-dependent compression pressure are obtained and compared with experimental and numerical data from the literature. Thermal effects will not be considered. The numerical results demonstrate similarity of axial displacement over time and a maximum percent error of 3.06% in axial displacement compared to experimental data at the end of the test.

Keywords: Asphalt bituminous mixture. Prony series. Viscoelasticity. Finite elements. Bituminous mixture. Prony series.

1. INTRODUÇÃO

As rodovias desempenham um papel fundamental no sistema logístico do país, sendo historicamente responsáveis por 60% e 90% das cargas e passageiros transportados, respectivamente (MEDINA e MOTTA, 2015), em comparação aos demais modais. Desta maneira, a infraestrutura rodoviária deveria estar em boas condições de tráfego, uma vez que qualquer deficiência afeta diretamente os custos operacionais: dos veículos, de transporte de passageiros, dos produtos e serviços. Sem levar em consideração ao fato que a infraestrutura rodoviária deficitária tem impacto ambiental relevante, devido, por exemplo, ao congestionamento de veículos, que leva ao sobre consumo de combustíveis fósseis com consequência da maior emissão de poluentes decorrentes de sua queima.

O tráfego intenso e o excesso de carga de certos veículos também causam danos significativos aos pavimentos asfálticos. Os danos mais típicos são o fundamento da trilha de roda, trincamento por fadiga, exsudação do asfalto, escorregamento, panelas e afundamento de consolidação. Portanto, é essencial o conhecimento do comportamento mecânico das camadas dos constituintes asfálticos, visando evitar ou mesmo mitigar os efeitos dessas patologias estruturais, levando a ganhos de: sensação de conforto ao usuário (diminuído inclusive paradas para manutenção da via), segurança viária, ambientais, financeiros e dentre outros.

O pavimento asfáltico deve ser projetado para suportar as cargas do tráfego de veículos e influências climáticas, manifestadas pelas variações diárias de temperatura e umidade. Normalmente ele é projetado como uma estrutura multicamada formada, podendo ser formado, por um revestimento seguido por uma base, uma sub-base e um subleito.

Cada uma dessas camadas desempenha funções específicas relacionadas a distribuição das cargas (de origem mecânica e/ou térmica), na impermeabilização, na melhoria das condições de rolamento, na segurança de tráfego e no suporte da superfície do pavimento asfáltico.

As misturas asfálticas do tipo betuminosa, empregadas como revestimento, se caracterizam por apresentarem um comportamento viscoelástico, influenciado pela temperatura e pela velocidade de circulação de veículos, ou seja, pelo tempo de aplicação das cargas (PINTO e PINTO, 2019). Dessa forma, o betume é considerado um material viscoelástico, que tende a ser mais rígido quando submetido a cargas mecânicas de curta duração, de menor pulso, e a ser menos rígido quando sujeito a cargas de longa duração (BERNUCCI *et al.*, 2022), sendo observado o efeito inverso em relação as cargas de origem térmica.

Esse trabalho procura validar numericamente a modelagem numérica, por Método dos Elementos Finitos (MEF), de um corpo de prova (CP) cilíndrico feito de material betuminoso com os resultados experimentais do deslocamento axial *versus* tempo (t) obtidos de um ensaio experimental de Fluência $D(t)$ disponível na literatura.

2. METODOLOGIA

Torquato Silva *et al.* (2013), Xu e Prozzi (2015) e Chen *et al.* (2017) e García *et al.* (2019), investigaram o comportamento mecânico do betume levando em conta sua natureza viscoelástica empregando para isso a Série de Prony (modelo generalizado de Maxwell) para modelar, no domínio do tempo, o seu comportamento físico. Essa série matemática pode ser utilizada para expressar, por exemplo, o Módulo de Relaxação $E(t)$ do material betuminoso, através de uma soma de termos exponenciais decrescentes, conforme indicados nas Equações (1) e (2).

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_i} E_i^{(-t/\rho_i)} \quad (1)$$

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

$$E_0 = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_i} E_i \quad (3)$$

$$\alpha_i = E_i / E_0 \quad (4)$$

sendo: E_{∞} termo independente da Série Prony; E_i e ρ_i termos dependentes da Série Prony; E_0 o Módulo de Relaxação inicial; α_{∞} e α_i Termos dependentes da Série Prony, e, E_0 e α_i são calculados através das Equações (3) e (4), respectivamente.

Vários métodos aproximados de interconversão entre as funções de relaxamento $E(t)$ e de Fluência $D(t)$ estão disponíveis na literatura, e, alguns deles podem ser consultados no trabalho de García *et al.* (2019).

Para a caracterização dos termos da série de Prony pode ser realizado o ensaio de Fluência por compressão uniaxial estática consiste na aplicação de cargas de compressão estáticas, mantidas temperaturas padrões e constantes durante um período ao longo do ensaio.

O ensaio de Fluência realizado por Souza, (2010) foi realizado com um CP cilíndrico e betuminoso, como o ilustrado esquematicamente na Figura 1, em (a), é implementado numericamente, via MEF no ANSYS APDL, neste trabalho.

Nesse CP, foi aplicada por 10 s uma pré-carga 0,005 MPa e mantendo, por mais 1 h (3600 s), mantendo a pressão de compressão (P) constante de 0,1 MPa. O ensaio foi realizado a temperatura constante, de aproximadamente 25°C, e o CP apresenta diâmetro (D) e altura (H) iguais respectivamente a 102 mm e 64 mm, como ilustrado na Figura 1, em (a). Nesse trabalho, a pressão de compressão P será aplicada em incrementos (Δt) de tempo fixos e iguais a 10 s até o tempo final de ensaio, igual a 3610 s.

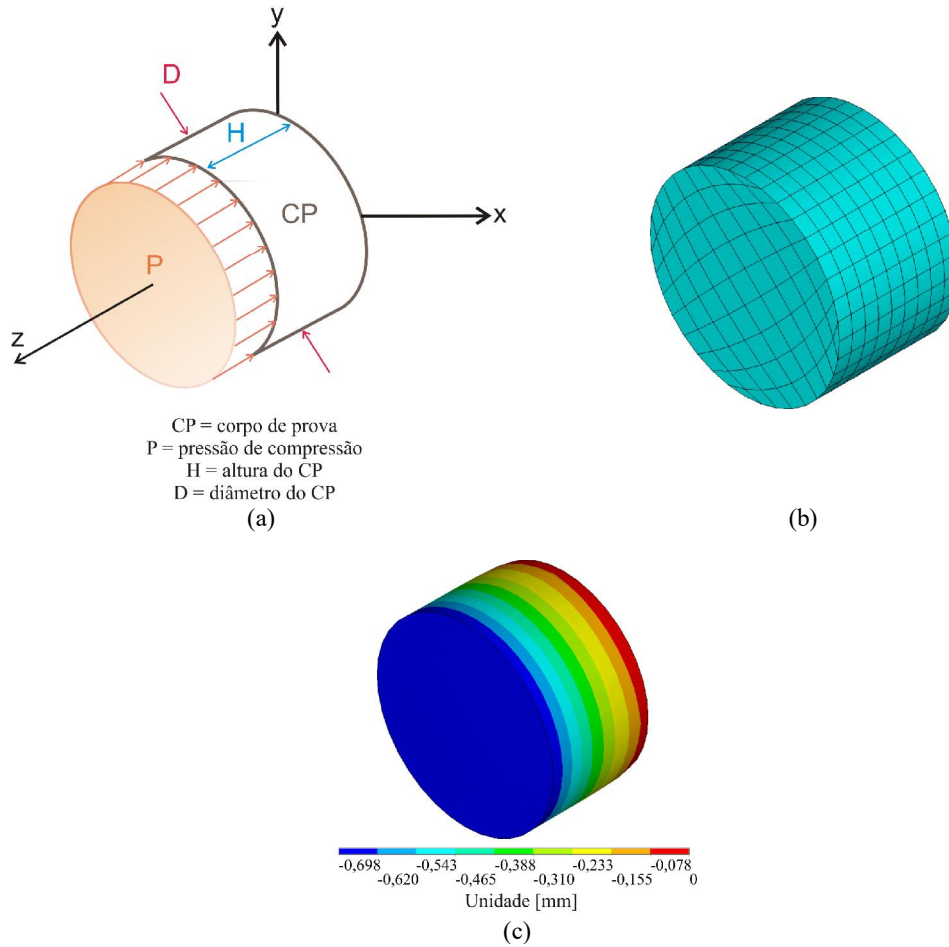


Figura 1. Corpo de prova de uma mistura betuminosa (a), modela via elementos finitos (b) e deslocamentos verticais obtidos ao final do carregamento aplicado no ensaio de Fluência.

A mistura betuminosa do CP apresenta densidade igual a 1100 kg/m^3 , coeficiente de Poisson (μ) igual a 0,30 e parâmetros da Série de Prony informados na Tabela 1. O CP trata-se de uma mistura de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) do tipo 50-70. O CAP 50-70 é um tipo de composto asfáltico utilizado para a pavimentação de ruas, estradas e rodovias com tráfego baixo a moderado e em regiões de clima mais quente. Essa classificação refere-se às faixas de temperatura em que o asfalto pode ser utilizado, ou seja, entre 50 e 70 graus Celsius. Além disso, foi adicionado 4 % de fibras sintéticas (de aramida) como reforço mecânico à matriz da mistura asfáltica estudada.

Tabela 1. Parâmetros da Série de Prony para a Mistura: CAP 50-70 (García *et al.*, 2019)

E_{∞}	7,07 MPa	
α_{∞}	0,035332	
E_0	200,10 MPa	
ρ_i	E_i	α_i
1	175,24	0,875762
10	10,32	0,051574
100	5,91	0,029535
1000	1,56	0,007796

O modelo numérico 3D implementado via MEF nesse trabalho é ilustrado na Figura 1, em (b).

O elemento do tipo sólido, chamado no ANSYS de Solid65, foi usado na modelagem, apresentando quatro nós e três graus de liberdade (gdl) de translação por nó, chamados u_x , u_y e u_z conforme direções cartesianas ilustrada na Figura 1, em (a). O modelo numérico ilustrado na Figura 1, em (b), apresenta 3000 gdl e tem como condição de contorno, impedimento de deslocamentos nas direções X, Y e Z (u_x , u_y e u_z) na posição $z = -H$. A discretização da malha, ilustrada na Figura 1, em (b), foi obtida por meio de uma análise da convergência de malha em relação aos máximos deslocamentos sofridos pela amostra quando submetida a pressão de compressão com o tempo do ensaio experimental.

Como na modelagem do material viscoelástico no ANSYS APDL devem ser empregados os parâmetros α_i , ρ_i e E_0 fornecidos na Equação (1) em detrimento aos parâmetros E_{i1} , ρ_i e E_{∞} , apresentados na Eq. (2), esse trabalho utiliza as expressões Eq. (3) e (4) para fazer essa conversão de parâmetros.

García *et al.* (2019) determinaram numericamente, aplicando o Método da Colocação Mínimos Quadrados Linear (MQL) ou o *software* VISCOLab aos resultados experimentais do ensaio de função Fluência $D(t)$ realizado por Souza, (2010), a respectiva Série de Prony para o Módulo de Relaxação $E(t)$ fornecidos na Tabela 1.

Além dos dados experimentais de Souza (2010) do máximo deslocamento axial *versus* tempo de aplicação da carga no CP betuminoso, esse trabalho também utiliza para comparação os dados numéricos obtidos por García *et al.* (2019), que emprega por sua vez o *software* ABAQUS em sua modelagem via MEF.

3. RESULTADOS

Para a validação dos resultados numéricos dos deslocamentos obtidos pelo modelo 3D *versus* dados experimentais, foi realizada uma análise prévia da convergência de malha, conforme ilustrada na Figura 2, visando verificar a estabilização dos máximos deslocamentos sofridos pelo modelo numérico implementado ao final do ensaio (3610 s).

A Figura 2 ilustra a distribuição do máximo deslocamento absoluto (ρ_{max}) sofrido pelo CP em função do tempo de ensaio para o modelo experimental de Souza (2010), o trabalho numérico de García *et al.* (2019) e o presente trabalho.

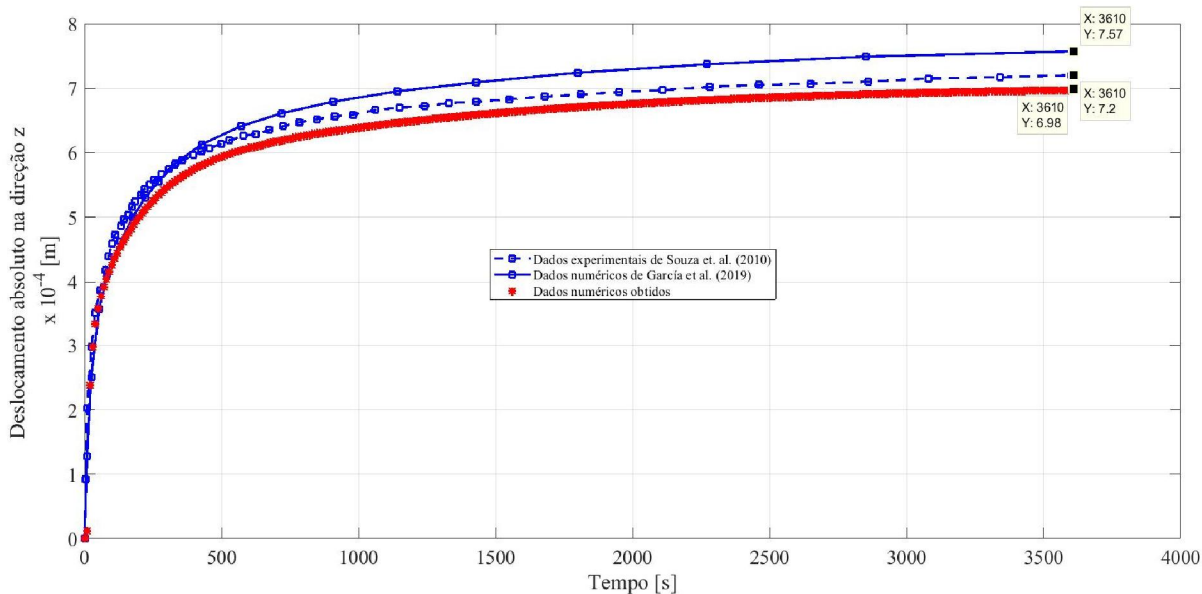


Figura 2. Resultados da simulação numérica do deslocamento vertical em módulo conforme o tempo obtido para o CAP 50-70 comparado com os obtidos experimentalmente na literatura.

A tabela ilustrada a seguir, Tabela 2, apresenta o máximo deslocamento ao longo do eixo Z do CP obtidos ao final do ensaio, empregando os dados experimentais obtidos por Souza (2010), o modelo numérico de García *et al.* (2019) e a presente formulação. Além disso, nela é fornecido a diferença percentual entre esses modelos numéricos com o resultado experimental, empregando com referência os dados experimentais.

Os dados numéricos obtidos empregando o ANSYS são qualitativamente mais semelhantes aos experimentais de Souza (2010). Ao comparar qualitativamente os dados, observa-se uma pequena discrepância percentual de (3,06 %) empregando o presente modelo numérico com o experimental, menor portanto do que o obtido por García *et al.* (2019).

O campo de deslocamentos verticais do CP betuminoso, no instante de tempo $t = 3010$ s, e obtido via MEF nesse trabalho é ilustrado na Figura 1 em (c).

Tabela 2. Comparação entre métodos numéricos com o experimental dos valores do máximo deslocamento axial obtido ao final do ensaio

Modelo	Máximo deslocamento axial no instante $t = 3610$ s [m]	Diferença percentual $100(I \text{ ou } II - \text{ref}) / \text{ref}$ [%]
Experimental de Souza (2010) (ref)	7,20	-
Numérico de García <i>et al.</i> (2019) (I)	7,57	5,14 %
Numérico do presente trabalho (II)	6,98	3,06 %

4. CONCLUSÕES

O modelo 3D implementado via MEF nesse trabalho conseguiu representar qualitativamente a variação não linear do máximo deslocamento resultante sofrido por um corpo de prova betuminoso submetido a uma pressão de compressão, à temperatura constante (25° C), ao longo do tempo de realização do experimento (3610 s), e, cujos dados experimentais são obtidos da literatura. Nesse sentido, a formulação matemática da Série de Prony empregada no modelo mostra-se adequada para a representação física do comportamento viscoelástico do sistema. Uma pequena defasagem percentual (de 3,06 %), entre o valor do máximo deslocamento axial no corpo de prova comparado ao experimental é observada sobretudo ao final do ensaio. Essa pequena defasagem percentual pode ser atribuída aos parâmetros da série obtidos da literatura científica, que por sua vez apresentou uma diferença percentual um pouco maior que a obtida nesse trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica pelo financiamento da bolsa de iniciação científica PIBITI-CNPq do discente.

6. REFERÊNCIAS

- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. 2022. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. PETROBRAS ABEDA, Rio de Janeiro, 2ª edição.
- Chen, F., Balieu, R., Kringos, N. 2017. “Thermodynamics-based finite strain viscoelastic-viscoplastic model coupled with damage for asphalt material” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 129, p. 1-13.
- Garcia, L.M., Farias, M.M., Recarey, C.M. e Souza, M.V.R. 2019. “Estudo numérico das propriedades viscoelásticas no domínio do tempo em misturas asfálticas do tipo CPA” *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, Vol. 5, p. 148-157.
- Medina, J. e Motta, L.M.G., 2015. *Mecânica dos pavimentos*. Interciência, Rio de Janeiro, 3ª edição.
- Pinto, S. e Pinto, I. E., 2019. *Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos*. LTC, Rio de Janeiro, 1ª edição.
- Souza, M.V.R., 2010. *Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Torquato Silva, S.A., Vida, P.J.F., Holanda, A.S., Parenta Júnior, E. 2013. “Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos usando elementos finitos e infinitos” *Revista Transportes*, Vol. 2, n. 3, p. 5 – 13.
- Xu, Q., Prozzi, J.A. 2015. “A time-domain finite element method for dynamic viscoelastic solution of layered-half-space responses under loading pulses” *Computers and Structures*, Vol. 160, p. 20-39.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.