

ESTUDO NUMÉRICO DO FENÔMENO DA FUGA TÉRMICA EM MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Luiz Fernando F. Rodovalho, FEMEC/UFU, luiz.ffrodovalho@gmail.com
Antonio Marcos Gonçalves de Lima, FEMEC/UFU, amglima@mecanica.ufu.br
Romes Antonio Borges, RC/UFU, romes.borges@catalao.ufu.br

Resumo. Este trabalho é dedicado a uma estratégia de modelagem numérica-computacional contemplando os efeitos combinados de cargas dinâmicas cíclicas e pré-cargas estáticas no fenômeno do autoaquecimento de materiais viscoelásticos com ênfase no fenômeno da fuga térmica para um completo estado triaxial de tensões. A metodologia de modelagem por elementos finitos permite considerar a influência da frequência, da temperatura e da pré-carga estática no fenômeno do autoaquecimento de materiais viscoelásticos lineares. Para tanto, são feitas modificações que viabilizam a análise termomecânica de estruturas viscoelásticas mais complexas. Posteriormente a apresentação dos principais aspectos teóricos, os resultados numéricos obtidos em termos das evoluções da temperatura em diferentes pontos do volume do material viscoelástico para diferentes níveis de pré-carregamento estático são discutidos e a consistência qualitativa é avaliada com o reportado na literatura para o fenômeno da fuga térmica para dispositivos mais simples e sem o efeito da pré-carga.

Palavras chave: Materiais viscoelásticos, autoaquecimento, termoviscoelasticidade, fuga térmica, pré-carga estática.

1. INTRODUÇÃO

Tem sido demonstrado por vários autores que o amortecimento interno dos materiais viscoelásticos oferecem inúmeras possibilidades de aplicações práticas em engenharia. A alta eficiência combinada a alta atratividade caracterizada por baixos custos de aplicação e manutenção, tem motivado a busca pelo amplo controle desta tecnologia, com vistas a viabilidade do tratamento de sistemas industriais cada vez mais complexos. Entretanto, a maioria dos procedimentos tradicionais de análise e projeto de dispositivos amortecedores viscoelásticos tem assumido distribuições de temperatura homogêneas e independente do tempo, negligenciando o fenômeno do autoaquecimento, cuja importância relativa pode levar à ocorrência do fenômeno do equilíbrio térmico e da fuga térmica (*thermal runaway*) (Lesieutre e Govindswamy, 1996). Além disso, em aplicações nas quais as solicitações dinâmicas são aplicadas simultaneamente a esforços estáticos, tais como coxins de motores, os efeitos da pré-carga estática no autoaquecimento devem ser levados em conta durante os procedimentos de modelagem.

Neste contexto, o presente trabalho é dedicado ao estudo numérico-computacional da influência de esforços dinâmicos cíclicos sobrepostos a pré-cargas estáticas sobre o fenômeno do autoaquecimento para o dispositivo viscoelástico tridimensional apresentado por de Lima *et al.* (2013), assumindo o acoplamento fraco entre os domínios e não linear entre as análises estrutural e térmica.

2. MÓDULO COMPLEXO COMO FUNÇÃO DE DEFORMAÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Para os casos em que os materiais viscoelásticos são submetidos simultaneamente à esforços mecânicos cíclicos sobrepostos a pré-cargas estáticas, é necessário que o modelo seja suficientemente representativo dos efeitos combinados das deformações estáticas e dinâmicas sobre as propriedades mecânicas.

Como a caracterização experimental é dificultada pelo grande número de combinações de parâmetros de cargas envolvidos nos procedimentos experimentais de medição usuais para materiais viscoelásticos, uma alternativa é a utilização de uma abordagem na qual os efeitos dos domínios físicos podem ser separados, e as propriedades mecânicas do material caracterizadas independentemente, e em seguida, utilizadas para a descrição dos módulos estático e dinâmico combinados. Assim, o módulo complexo para a relação tensão-deformação unidimensional incorporando a influência da pré-carga estática, pode ser expresso como (de Lima *et al.*, 2013):

$$G(\omega_r, T_0, \delta) = F(\delta) \quad G(\omega_r, T_0) = G'(\omega_r, T_0, \delta) + i G''(\omega_r, T_0, \delta) \quad (1)$$

onde $\omega_r = \alpha_T(T) \omega$ ω é a frequência reduzida, $\alpha_T(T)$ o fator de deslocamento, ω a frequência de excitação, T é a temperatura interna do material viscoelástico, T_0 é a temperatura de referência e δ a deformação estática.

A estratégia consiste em gerar um conjunto de propriedades do material medidas estaticamente, empregando-as na caracterização da função da deformação estática, $F(\delta)$, e um conjunto de propriedades do material medido dinamicamente, sem pré-cargas estáticas para determinar a função módulo complexo, $G(\omega, T_0)$. Assim, no estudo numérico, as pré-cargas estáticas são aplicadas diretamente no amortecedor viscoelástico através da realização de uma análise harmônica com efeitos de pre-tensão via software de elementos finitos *ANSYS*TM, ao passo que as propriedades dinâmicas do material viscoelástico em função da temperatura e da frequência de excitação são fornecidas pelas expressões analíticas, propostas por Drake e Soovere (1984) para o material viscoelástico *3M ISD 112*TM, respectivamente, para o módulo de cisalhamento complexo e o fator de deslocamento em função da frequência reduzida, nos intervalos $210 \leq T \leq 360 \text{ K}$ e $1.0 \leq \omega \leq 1.0 \times 10^6 \text{ Hz}$, para uma temperatura de referência $T_0 = 290 \text{ K}$:

$$G(\omega, T_0) = B_1 + B_2 / \left(1 + B_3 (i\omega / B_3)^{-B_6} + (i\omega / B_3)^{-B_4} \right) \quad (2)$$

$$\log_{10}(\alpha_T) = a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + 2,303 \left(\frac{2a}{T_0} - b \right) \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) + \left(\frac{b}{T_0} - \frac{a}{T_0^2} - S_{AZ} \right) (T - T_0). \quad (3)$$

3. TAXA DE GERAÇÃO DE CALOR

Para o caso particular em que a variação da energia interna de um corpo envolve exclusivamente o armazenamento e a geração de calor, a relação entre a taxa que este calor é gerado pela dissipação viscoelástica e as variações espaciais e temporais de temperatura, no volume Ω de um material viscoelástico, desprezando o efeito termoelástico, pode ser expressa pela seguinte equação transiente de transferência de calor (Cazenove *et al.*, 2012):

$$q_g + k \nabla^2 T(t, x, y, z) = \rho c_p \dot{T}(t, x, y, z) \quad (4)$$

onde k , ρ e c_p denotam, respectivamente, a condutividade térmica, a densidade, o calor específico por unidade de massa e o coeficiente de dilatação à pressão constante. O termo $k \nabla^2 T$ representa a condução de calor, $\rho c_p \dot{T}(t, x, y, z)$ designa o armazenamento de calor com dependência a capacidade de aquecimento do material, e q_g é a quantidade de calor gerado pelo efeito da dissipação viscoelástica.

Para um material viscoelástico submetido à esforços mecânicos cíclicos sobrepostos a uma pré-carga estática, q_g , pode ser expressa como (Cazenove *et al.*, 2012):

$$q_g = \beta \dot{w}_m \quad (5)$$

onde $\dot{w}_m$ é a energia de deformação mecânica dissipada por unidade de volume em função do tempo e β designa o coeficiente de rendimento térmico.

A energia mecânica dissipada pelo efeito viscoelástico pode ser expressa pelo produto dos componentes das tensões e das velocidades de deformação (Lima *et al.*, 2013), que para uma variação harmônica, $\epsilon_0(t, \omega, T, \delta) \sin(\omega t + \phi)$, conduz a seguinte expressão para a geração de calor em decorrência ao efeito viscoelástico de dissipação:

$$q_g(\omega, T, \delta) = \frac{1}{2} \beta \omega G''(\omega, T, \delta) \epsilon_0^T(\omega, T, \delta) \bar{C} \epsilon_0(\omega, T, \delta), \quad (6)$$

cuja substituição na equação transiente da térmica (4) resulta no seguinte problema termoviscoelástico não linear acoplado para um estado de tensão-deformação cisalhantes:

$$\frac{1}{2} \beta \omega G''(\omega, T, \delta) \epsilon_0^T(\omega, T, \delta) \bar{C} \epsilon_0(\omega, T, \delta) + k \nabla^2 T(t, x, y, z) = \rho c_p \dot{T}(t, x, y, z). \quad (7)$$

No contexto da modelagem por elementos finitos, a geração de calor pelo efeito viscoelástico deve ser calculada para cada elemento através das amplitudes dos deslocamentos, $U_{(e)}(\omega, T, \delta)$, obtidas a partir da realização de uma análise harmônica com efeitos de pre-tensão, integrando-se a Eq. (6) no volume de cada elemento viscoelástico:

$$q_g(\omega, T, \delta) = \left(\beta \omega \eta(\omega, T, \delta) / 2V_{(e)} \right) U_{(e)}^T(\omega, T, \delta) K'_v(\omega, T, \delta)_{(e)} U_{(e)}(\omega, T, \delta) \quad (8)$$

onde $K'_v(\omega, T, \delta)_{(e)} = G'(\omega, T, \delta) \int_{V_{(e)}} \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{C}} \mathbf{B} dV_{(e)}$ é a parte real da matriz de rigidez da subestrutura viscoelástica, $\mathbf{B}$ é a matriz formada pelos operadores diferenciais que intervêm nas relações deformações-deslocamentos, e $V_{(e)}$ denota o volume do elemento finito viscoelástico.

4. PROCEDIMENTO ITERATIVO DE RESOLUÇÃO

Como $\{q_g\}$ é obtido a partir da energia de deformação resultante da resposta estrutural, e as matrizes de rigidez complexa, $[K_v^*(\omega, T, \delta)]$, e de amortecimento viscoso equivalente, $[C_{eq}(\omega, T, \delta)] = (\eta(\omega, T, \delta) G'(\omega, T, \delta) / \omega) [\bar{K}_v]$, dependem do campo de temperatura, é necessária à utilização de um procedimento iterativo de resolução, no qual, para um dado incremento de tempo, Δt , uma análise harmônica estrutural com inclusão dos efeitos de pré-cargas estáticas é realizada, avaliando-se em sequência as fontes de calor para os elementos correspondentes, obtendo-se em seguida, o campo de temperatura pela realização de uma análise térmica transiente, para a então atualização das matrizes estruturais em $t + \Delta t$, até que seja atingido o tempo final de aplicação do carregamento cíclico. Assim, a metodologia de simulação do fenômeno do autoaquecimento, foi implementada na linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language), integrada ao software de elementos finitos ANSYSTM, com interface ao ambiente de programação MATLAB[®].

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para a avaliação da influência dos efeitos da pré-carga estática sobre o fenômeno do autoaquecimento de materiais viscoelásticos e evidência do fenômeno da fuga térmica as simulações numéricas foram realizadas para o dispositivo translacional viscoelástico apresentado por Lima *et al.* (2013), composto por duas camadas viscoelásticas do material 3M ISD112TM inseridas entre três placas de aço SAE 1020 mostrado na Fig. 1. Considerado o plano de simetria indicado, a junta foi modelada utilizando o elemento tridimensional SOLID45, com oito nós e três graus de liberdade por nó (deslocamentos nas direções x , y e z) para o domínio estrutural e o elemento compatível SOLID70, com o mesmo número de nós e um grau de liberdade por nó (temperatura), para o domínio térmico. Como condições térmicas, admitiu-se o dispositivo termicamente isolado na face indicativa do plano de simetria e uma transferência de calor por convecção natural, com o coeficiente de convecção natural $h = 13,016 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (Lima *et al.*, 2013) e temperatura ambiente $T_\infty = 25^\circ\text{C}$.

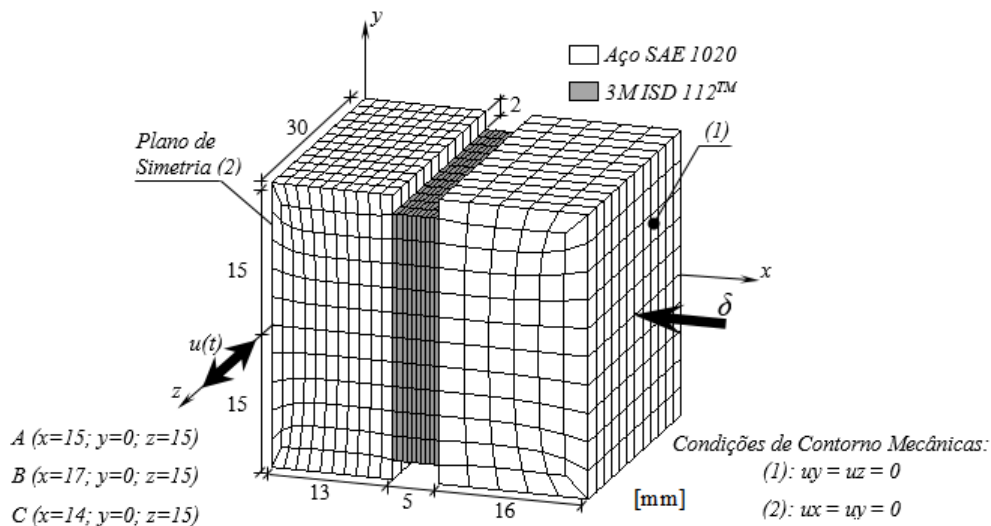


Figura 1. Junta translacional viscoelástica – características geométricas e condições de contorno mecânicas aplicadas na geração do modelo de elementos finitos.

A determinação da evolução dos valores do campo de temperatura nos pontos A, B e C indicados na Fig. 1, abrange a fase de aplicação de um deslocamento cíclico, $u(t) = u_0 \sin(2\pi f_0 t)$, com $u_0 = 3,5 \text{ mm}$ e $f_0 = 14 \text{ Hz}$, imposto ao amortecedor viscoelástico durante 3396 s, em sobreposição à diferentes valores de pré-cargas estáticas, caracterizando os quatro respectivos cenários de teste: (1) $\delta = 0 \text{ N}$, (2) $\delta = 100 \text{ N}$, (3) $\delta = 200 \text{ N}$ e (4) $\delta = 250 \text{ N}$. Na Figura 2(a) são

mostradas as distribuições de temperatura para os pontos A, B e C, para o cenário (1), e a Fig. 2(b) possibilita a comparação da evolução da temperatura no ponto A para os diferentes valores de pré-cargas estáticas comparativamente à configuração de equilíbrio térmico, obtida para os valores de $u_0 = 1,0 \text{ mm}$, $f_0 = 14 \text{ Hz}$ e $\delta = 0 \text{ N}$.

Dos resultados obtidos, constata-se que há a ocorrência do fenômeno da fuga térmica para ambos os cenários de teste, uma vez que para as mesmas condições de contorno térmicas, a temperatura interna do material em um mesmo ponto, experimenta grandes aumentos, nos mesmos instantes de tempo em que se observa para a configuração de equilíbrio térmico a estabilidade do campo de temperatura. Além disso, o comportamento caracterizado pelo aumento abrupto da temperatura para os instantes iniciais, seguido de um crescimento contínuo, a uma taxa menor de geração de calor, já apresentando para os cenários (1) e (2) a tendência a uma temperatura de equilíbrio superior, é qualitativamente consistente com a descrição feita por Lesieutre e Govindswamy (1996) para dispositivos mais simples e sem os efeitos de deformações estáticas. Adicionalmente, nota-se que a evolução da temperatura dentro do volume do material viscoelástico é diferente para pontos distintos, em decorrência à não homogeneidade da transferência de calor.

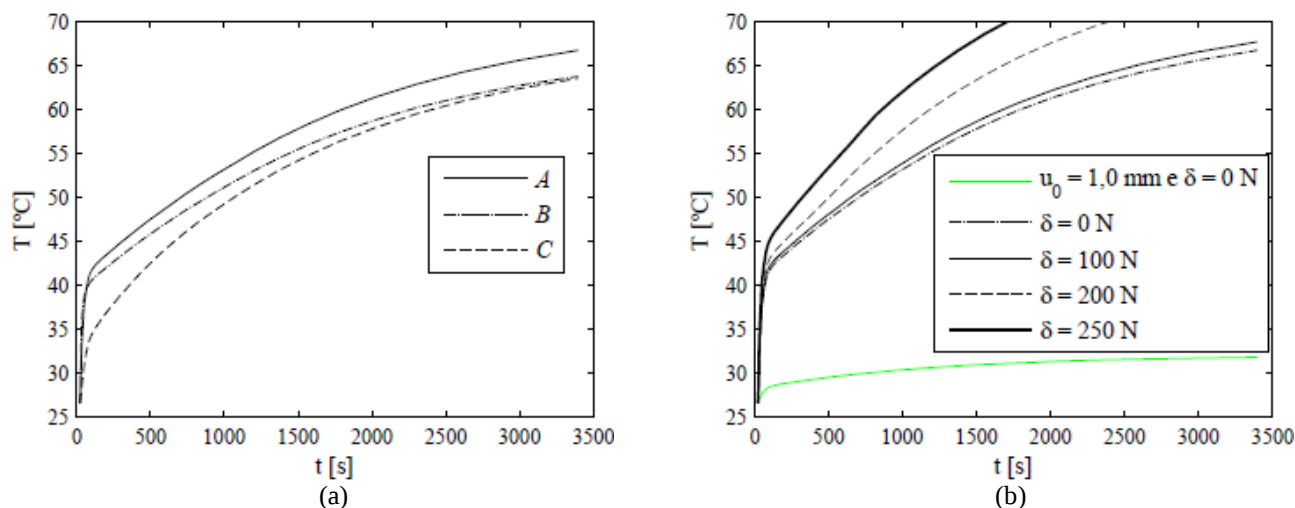


Figura 2. (a) Evolução da temperatura nos pontos A, B e C para o cenário de teste (1); (b) Evolução da temperatura no ponto A para os quatro cenários de teste.

6. CONCLUSÕES

A metodologia de modelagem e simulação numérica do fenômeno de autoaquecimento em materiais viscoelásticos para a combinação de pré-cargas estáticas e cargas cíclicas apresentada envolve a extensão da proposta originalmente por Cazenove *et al.* (2012) e consolidada por de Lima *et al.* (2013), para modelos tridimensionais de dispositivos viscoelásticos submetidos simultaneamente à cargas estáticas e dinâmicas.

Os resultados numéricos evidenciaram que as pré-cargas estáticas afetam significativamente as evoluções de temperatura no material viscoelástico. Combinada ao carregamento dinâmico, esta se mostrou significativa sobre o autoaquecimento, permitindo concluir que à medida que a pré-carga aumenta, o efeito da fuga térmica se torna mais evidente.

7. REFERÊNCIAS

- Cazenove, J. de, Rade, D. A., Lima, A. M. G.; Araújo, C. A., 2012, "A numerical and experimental investigation on self-heating effects in viscoelastic dampers", *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 27, pp. 433-445..
- Drake, M. L., Soovere, J. A., 1984, "A design guide for damping of aerospace structures", *Vibration Damping Workshop*, Long Beach, California, Anais.
- Lesieutre, G.A., Govindswamy, K.M., 1996, "Finite element modeling of frequency-dependent and temperature-dependent dynamic behavior of viscoelastic materials in simple shear", *International Journal of Solids and Structures*, v. 33, n. 3, pp. 419-432.
- de Lima, A. M. G., Rade, D. A., LACERDA, H. B., ARAÚJO, C. A., 2013, "Influence of the combined dynamic and static strains on the self-heating phenomenon in viscoelastic dampers", *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, 22, Ribeirão Preto-SP, Anais do COBEM2013, 9 p.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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