

# **Análise da espessura do material viscoelástico em compósitos estruturais**

## **Thickness analysis of viscoelastic material in structural composites**

<sup>(1)</sup> Lúcia Aparecida Gonçalves Silva, lutixd@hotmail.com

<sup>(1)</sup> Adriana Amaro Diacenco, adriana\_aadiacenco@yahoo.com.br

<sup>(1)</sup> Centro Universitário de Itajubá – FEPI, Av. Dr. Antônio Braga Filho, nº 687, Varginha, Itajubá – Minas Gerais

Recebido: 03 de setembro de 2019; Revisado: 28 de outubro de 2019

### **RESUMO**

Esse trabalho dedica-se a realizar uma análise numérica da espessura de um material viscoelástico que pode ser aplicado entre camadas de material compósito com o objetivo de atenuar os níveis de vibração e ruído em estruturas de engenharia. A análise foi executada pelo Matlab<sup>®</sup>, fundamentada no método dos elementos finitos, para análises de estruturas compósitas do tipo sanduíche. A estrutura compósita sanduíche analisada neste trabalho é do tipo placa na qual considera-se deformações de flexão-membrana e cisalhamento. Para a representação do comportamento do material compósito sanduíche foi utilizada a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (Theory of Deformation Shear First Order – FSDT) combinada com o modelo do módulo complexo para a representação do comportamento viscoelástico inserido na estrutura. Os materiais viscoelásticos dependem da frequência de excitação e temperatura, assim foram analisados quatro casos numéricos de um material compósito estrutural do tipo sanduíche, na qual o material viscoelástico foi inserido entre as camadas do material compósito. Nas simulações foram aplicadas diferentes temperaturas para diferentes espessuras para verificar a influência destes parâmetros no comportamento da estrutura compósita do tipo sanduíche.

**Palavras-chaves:** Material viscoelástico. Espessura. Método dos elementos finitos. Controle passivo.

### **ABSTRACT**

This work is dedicated to performing a numerical analysis of the thickness of a viscoelastic material that can be applied between layers of composite material to attenuate vibration and noise levels in engineering structures. The analysis was performed by Matlab<sup>®</sup>, based on the finite element method, for analysis of composite sandwich structures. The sandwich composite structure analyzed in this work is of the plate type in which bending-membrane and shear deformations are considered. To represent the behavior of the sandwich composite material, the Theory of Deformation Shear First Order (FSDT) combined with the complex modulus model was used to represent the viscoelastic behavior inserted in the structure. Viscoelastic materials depend on the excitation frequency and temperature, so four numerical cases of a sandwich-type structural composite material were analyzed in which the viscoelastic material was inserted between the layers of the composite material. In the simulations different temperatures for different thicknesses were applied to verify the influence of these parameters on the behavior of the composite sandwich structure.

**Keywords:** Viscoelastic material. Thickness. Finite element method. Passive control.

## INTRODUÇÃO

A inserção de materiais que apresentam características de amortecimento em outros materiais e/ou estruturas (metálicas e compósitas, por exemplo) formam uma estratégia de controle passivo de vibrações. Este tipo de amortecimento envolve a aplicação de materiais viscoelásticos nas estruturas e máquinas, a técnica de inserção do material viscoelástico entre outras camadas de materiais é denominada controle passivo de vibrações. Estes materiais são dotados de uma capacidade de amortecimento bastante superior às ligas metálicas, sendo capazes de dissipar grandes quantidades de energia (LIMA; FARIA; RADE, 2010; DIACENCO, 2010).

Existem pesquisas com enfoques diferentes a respeito do controle passivo de vibrações, dentre eles, pode-se citar Lima (2015) que estudou o controle passivo de vibrações de sistemas não-lineares empregando ligas com memória de forma, enquanto que, Cunha (2016) que realizou uma análise sobre o controle passivo de vibrações induzidas por vórtices utilizando materiais viscoelásticos.

Visto que, os materiais viscoelásticos são inseridos em outros tipos de estruturas para atenuar os níveis de vibração, pode ser realizado análises experimentais e análises computacionais para caracterizar o comportamento mecânico dos mesmos.

De acordo com que foi exposto nos parágrafos anteriores, pretende-se analisar, por meio de modelagem e simulação numérica, a influência da magnitude do parâmetro espessura do material viscoelástico aplicado entre as camadas de material compósito sobre o desempenho da capacidade de amortecimento da estrutura.

## REFERENCIAL TEÓRICO

Análises atuais revelam que materiais viscoelásticos podem ser aplicados como núcleo em um elemento compósito estrutural, formando o denominado material compósito estrutural do tipo sanduíche, com a finalidade de diminuir o grau de vibração e ruído das estruturas. Esta aplicação demonstrou ser solução para o controle de vibrações, visto que os materiais viscoelásticos são habilitados a absorver a energia vibratória do sistema e dissipá-la na forma de calor (LIMA, 2015).

O crescente interesse industrial sobre materiais poliméricos, surgiu na década de 60, utilizando estudos numéricos direcionados a materiais viscoelásticos. As equações diferenciais são utilizadas para a representação do método dos elementos finitos (MEF).

Pitela (2006), pesquisou métodos para melhorar o amortecimento, utilizando materiais viscoelásticos para amortecer as vibrações. Através de experimentos, utilizando materiais viscoelástico do tipo “Sanduíche”, previu se as frequências naturais

e as taxas de amortecimento, medindo a eficiência do material, para amortecimento e diminuição das vibrações. Assim aumentando a vida útil do material.

Estudos e análises sobre a inserção de material viscoelástico em estruturas tem sido realizados por alguns pesquisadores (Diacenco, Fonseca e Diniz; 2014, Lima 2015), constituindo as camadas estrutural sanduíche e que apresentam diversas aplicações na Engenharia, como sua aplicação nas fuselagens de aviões, por exemplo. As estruturas sanduíches podem ser formadas pela combinação de materiais compósitos reforçados com fibras e o material viscoelástico que ficaria entre as camadas do material compósito.

O material compósito é composto pela união de dois ou mais materiais distintos, obtendo um material com propriedades diferentes, na qual os materiais individualmente não possuem (DIACENCO,2010).

De acordo com os estudos, os materiais compósitos podem ser definidos como compósitos reforçados com partículas compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais.

Os materiais compósitos podem ser fabricados em forma de cascas e placas, cuja a principal diferença pode ser realizada por meio da curvatura apresentada pela estrutura, a qual pode ser constituída de uma camada

comum ou várias camadas de materiais isotrópicos ou anisotrópicos. As cascas são determinadas como estruturas finas e curvadas, enquanto que, placas são cascas planas com duas curvaturas nulas. Estudo de placas e cascas compostas laminadas podem ser realizados por meio das Teorias Baseadas em Camada Equivalente Única, estas teorias englobam a Teoria da Camada Equivalente Única (CLT), Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT), Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior (HSDT), no trabalho de Faria (2006) é apresentado a relação entre capacidade de predição e custo computacional para uma ampla classe de aplicações. Das teorias, a HSDT é extremamente precisa na estimação das propriedades mecânicas globais, como deflexões, frequências naturais fundamentais e comportamento de vibração de ordem elevada e distribuição de tensões. Além disso, esta teoria exige funções referentes ao espaço  $C^0$ , isto é, funções contínuas, e pode ser utilizada para a modelagem de placas e cascas finas e relativamente espessas. Porém esta teoria, quando implementada em ambiente de programação apresenta elevado esforço computacional.

É importante ressaltar que existe definição para placas finas, semi-espessas e espessas, de acordo com a relação do comprimento do laminado pela espessura,  $a/h$ , dada por (REDDY, 1997):

- Laminados delgados  $a/h \leq 100$ ;
- Laminados semi - espessos  $a/h > 100$ ;
- Laminados espessos  $a/h \gg 100$ .

Para a representação do comportamento do material viscoelástico é utilizado, neste trabalho, o modelo do módulo complexo associado ao conceito de fator de deslocamento e frequência reduzida de acordo com o Princípio da Superposição Frequência-Temperatura.

### Modelagem por elementos finitos por meio da Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (*Theory of Deformation Shear First Order – FSDT*)

Os campos de deslocamentos mecânicos nesta teoria podem ser representados pela Equação 1 (REDDY, 1997):

$$U(x, y, z, t) = A(z)u(x, y, t) \quad (1)$$

Sendo:

$$U(x, y, z, t) = [u(x, y, z, t) \ v(x, y, z, t) \ w(x, y, z, t)]^T \quad (1.a)$$

$$A(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & z \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.b)$$

$$u(x, y, t) = [u_0(x, y, t) \ v_0(x, y, t) \ w_0(x, y, t) \ \psi_x(x, y, t) \ \psi_y(x, y, t)]^T \quad (1.c)$$

Sendo,  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ , e  $w(x, y, z, t)$  são os deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .  $(u_0, v_0, w_0)$  e  $(\psi_x, \psi_y, \psi_z)$  são, respectivamente, os deslocamentos do plano médio e as rotações da seção transversal nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

A estrutura compósita sanduíche analisada neste trabalho é do tipo placa e, nesse sentido, tem-se que a placa suporta carregamento transversal, desenvolvendo, portanto, deformações de flexão e também suportam carregamentos coplanares, denominados comportamentos de membrana. Existem relações deformação deslocamento (Equação 2), propostas por Reddy (1997), substituindo o campo de deslocamentos mecânicos nessas relações pode-se obter as deformações resultantes, as quais são separadas em deformações de flexão e de cisalhamento,  $\epsilon_b$  e  $\epsilon_s$ , representadas pelas Equações (2.a) e (2.b).

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\epsilon_b(x, y, z, t) = [D_{b0} + zD_{b1}]u(x, y, t) = D_b(z)u(x, y, t)$$

$$\epsilon_s(x, y, z, t) = [D_{s0}]u(x, y, t) = D_s u(x, y, t)$$

(2.a)

As matrizes  $D_i$  ( $i = 0, \dots, 2$ ) são constituídas por operadores diferenciais como mostra as equações (3).

$$D_b = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & z \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}\right) & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & z \cdot \left(\frac{\partial}{\partial y}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial x}\right) & 0 & z \cdot \left(\frac{\partial}{\partial y}\right) & z \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}\right) \end{bmatrix}$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### Discretização por elementos finitos

A discretização das variáveis de deslocamentos é feita utilizando-se o elemento Serendipity, sendo que a representação dos campos de deslocamentos mecânicos pode ser representada pela equação 4:

$$\mathbf{u}(\xi, \eta, t) = \mathbf{N}(\xi, \eta) \mathbf{u}(t) \quad (4)$$

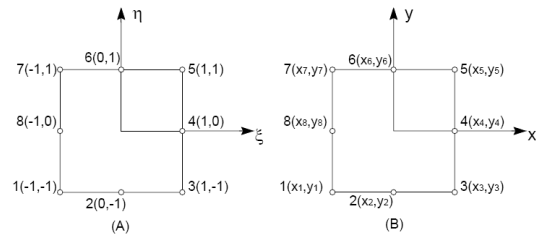
sendo:

$$\mathbf{u}(t) = [\mathbf{u}_1^T(t) \mathbf{u}_2^T(t) \dots \mathbf{u}_8^T(t)]^T \quad \text{e}$$

$$\mathbf{u}_i(t) = [u_i \ v_i \ w_i \ \psi_{xi} \ \psi_{yi} \ \psi_{zi} \ \zeta_{xi} \ \zeta_{yi} \ \zeta_{zi} \ \Phi_{xi} \ \Phi_{yi}]^T$$

( $i=1$  a  $8$ ).  $\mathbf{N}(\xi, \eta)$  de dimensão  $5 \times 40$ , é a matriz formada pelas funções de interpolação do elemento padrão de 8 nós da família

*Serendipity* formulada em coordenadas locais  $(\xi, \eta)$ ,  $-1 \leq \xi \leq 1$ ,  $-1 \leq \eta \leq 1$ , e ilustrado na Figura 2.



**Figura 1** – Elemento da família *Serendipity* empregado na formulação por elementos finitos de placas compostas laminadas: (a) coordenadas locais, (b) coordenadas globais.

O mesmo procedimento é realizado para as deformações de flexão-membrana e cisalhamento, conforme é apresentado pelas Equações (5) e (6).

$$\varepsilon_b(x, y, z, t) = D_b(z) N(\xi, \eta) u(t) = B_b(\xi, \eta, z) u(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_s(x, y, z, t) = D_s N(\xi, \eta) u(t) = B_s N(\xi, \eta) u(t) \quad (6)$$

Sendo que  $N(\xi, \eta)$  representa a matriz das funções de forma de dimensão  $5 \times 40$ , mostrado na Equação (7).

$$\begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Após os procedimentos de discretização por elementos finitos é possível obter as matrizes de massa e rigidez elementares, representadas nas Equações (8.a), (8.b), e (8.c).

$$\mathbf{M}^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \rho_k \mathbf{N}^T(\xi, \eta) \mathbf{A}^T(z) \mathbf{A}(z) \mathbf{N}(\xi, \eta) \det(\mathbf{J}) d\eta d\xi dz \quad (8.a)$$

$$\mathbf{K}_b^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \mathbf{B}_b^T(\xi, \eta, z) \mathbf{C}_b^{(k)}(\theta_k) \mathbf{B}_b(\xi, \eta, z) \det(\mathbf{J}) d\eta d\xi dz \quad (8.b)$$

$$\mathbf{K}_s^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \mathbf{B}_s^T(\xi, \eta, z) \mathbf{C}_s^{(k)}(\theta_k) \mathbf{B}_s(\xi, \eta, z) \det(\mathbf{J}) d\eta d\xi dz \quad (8.c)$$

Sendo que:  $\mathbf{K}^{(e)} = \mathbf{K}_b^{(e)} + \mathbf{K}_s^{(e)}$  é a matriz de rigidez elementar, na qual as componentes de flexão e cisalhamento são expressas.

Nas Eqs. (9.a) e (9.b)  $\det(\mathbf{J})$  indica o determinante do Jacobiano da transformação das variáveis físicas  $(x, y)$  para as variáveis naturais  $(\xi, \eta)$ , e as matrizes  $\mathbf{C}_b^{(k)}(\theta_k)$  e  $\mathbf{C}_s^{(k)}(\theta_k)$  representam, respectivamente, as matrizes elásticas ortotrópicas associadas à flexão e ao cisalhamento da  $k$ -ésima camada, as quais são construídas de acordo com a teoria CLT como segue:

$$\mathbf{C}_b^{(k)}(\theta_k) = \mathbf{T}_b(\theta_k) \bar{\mathbf{C}}_b^{(k)} \mathbf{T}_b^T(\theta_k) \quad (9.a)$$

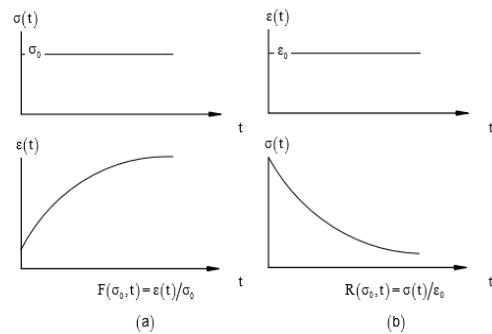
$$\mathbf{C}_s^{(k)}(\theta_k) = \mathbf{T}_s(\theta_k) \bar{\mathbf{C}}_s^{(k)} \mathbf{T}_s^T(\theta_k) \quad (9.b)$$

Sendo  $\bar{\mathbf{C}}_b^{(k)}$  e  $\bar{\mathbf{C}}_s^{(k)}$  as matrizes de propriedades elásticas de flexão e cisalhamento da  $k$ -ésima camada, associada ao eixo ortotrópico principal, e  $\mathbf{T}_b(\theta_k)$  e

$\mathbf{T}_s(\theta_k)$  são as matrizes de rotação associadas, pois visto que, os compósitos laminados possuem várias lâminas fibrosas, cada uma delas com fibras em diferentes orientações, isto faz com que o sistema de coordenadas do material seja diferente do sistema de coordenadas do problema. Logo, de acordo com Reddy (1997) as matrizes das propriedades dos materiais podem ser transformadas por uma rotação de um ângulo  $\theta$  em torno do eixo  $z$  utilizando as matrizes de transformação  $\mathbf{T}_b(\theta_k)$  e  $\mathbf{T}_s(\theta_k)$

### Materiais viscoelásticos

A denominação viscoelasticidade está relacionada ao tempo, devido a uma tensão ou deformação constante aplicada. Sendo assim a resposta destes materiais é dividida em duas funções que ilustram (Figura 2) a evolução no tempo destes materiais.



**Figura 2** - Funções de fluência (a); e relaxação (b) de um material viscoelástico.

A função de fluência,  $F(\sigma, t)$ , apresenta a deformação quando o material é submetido a uma tensão constante,  $\sigma$  e a função de relaxação,  $R(\epsilon, t)$ , mostra a tensão suportada

no momento em que o material é mantido a uma deformação constante ( $\epsilon$ ).

### Incorporação do comportamento viscoelástico em modelos de Elementos Finitos

Para representar o comportamento mecânico do material viscoelástico, o qual foi inserido entre as camadas de material compósito, foi considerado o modelo do módulo complexo. Este modelo foi utilizado por diversos pesquisadores (de Lima; Diacenco; Correa, 2009; Faria, 2006; Diacenco, 2010, dentre outros), logo trata-se de um modelo bastante aceito e que consegue representar de maneira confiável o comportamento do material viscoelástico. Visto que, os materiais viscoelásticos dependem da frequência de excitação e temperatura, sendo que a influência exercida pela frequência é qualitativamente o inverso do efeito da temperatura, mas em escala menor, ou seja, a variação na frequência de algumas décadas reflete a mesma influência de alguns graus na temperatura, conforme afirma Diacenco (2010). Isso conduz a um princípio denominado o Princípio da Superposição Frequência-Temperatura. O modelo do módulo complexo representa esta dependência, sendo também possível realizar a adaptação destes modelos para serem utilizados em combinação com elementos finitos.

De acordo com o modelo do módulo complexo o comportamento dinâmico dos materiais viscoelásticos pode ser representado pelas seguinte expressão Eq.(10) (de LIMA *et al.*, 2009):

$$E^*(\omega, T) = E'(\omega, T) - jE''(\omega, T) \quad (10)$$

Sendo:  $\omega$  e  $T$  representam, respectivamente, a frequência de excitação e a temperatura do material viscoelástico e  $\eta$  representa o fator de perda do material.

A partir do Princípio da Superposição Frequência-Temperatura tem-se que as características viscoelásticas em diferentes temperaturas podem ser associadas entre si por meio de mudanças horizontais nos valores da frequência real de excitação, conduzindo aos conceitos de fator de deslocamento e frequência reduzida (Equações 11).

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega_r, T_r) \quad (11.a)$$

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega_r, T_r) \quad (11.b)$$

Sendo  $T$  indica um valor arbitrário da temperatura,  $T_0$  é uma temperatura de referência,  $\omega_r = \alpha_T(T) \omega$  representa a frequência reduzida,  $\omega$  é a frequência de excitação, e  $\alpha_T(T)$  representa o fator de deslocamento como função da temperatura.

Existem expressões analíticas que representam o módulo complexo e o fator de

deslocamento para diferentes materiais viscoelásticos disponíveis comercialmente, estas expressões foram propostas por Drake e Soovere. O material viscoelástico considerado para fins de análise, neste trabalho foi ISD112 produzido pela 3M, de acordo com as equações (12.a ,12.b) obtidas pelos autores:



(12.a)



(12.b)

Existe um princípio, denominado de Princípio da Correspondência Elástico-Viscoelástica (PEEV), que diz que:

a derivação do modelo de elementos finitos considerando o comportamento viscoelástico pode ser descrito em duas fases distintas: primeiro, as matrizes elementares e globais são obtidas considerando-se comportamento elástico puro (o módulo do material é independente da frequência e da temperatura). Este procedimento foi considerado na seção precedente. Então, o módulo do material é modificado para levar em conta o comportamento viscoelástico (de acordo com modelo do módulo complexo como definido pela Eq. (3.9) (DIACENCO, 2010, p.41).

$$\sigma(\omega) = G(\omega)\varepsilon(\omega) \quad (3.9)$$

A matriz de rigidez elementar deve ser posta em função da frequência e da temperatura, quando há a inserção do material viscoelástico, entre outros materiais. Logo, no modelo de elementos finitos, após esta consideração, a matriz de rigidez elementar (considerando o efeito de flexão-membrana e cisalhamento) podem ser representadas da

seguinte forma (LIMA; FARIA; RADE., 2010):

$$\mathbf{K}_b^{(v)}(\omega, T) = \sum_{k=1}^v \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=1} \mathbf{B}_b^T(\xi, \eta, z) \mathbf{C}_b^{(k)}(\omega, T) \mathbf{B}_b(\xi, \eta, z) \times \det(\mathbf{J}) d\eta d\xi dz \quad (13.a)$$

$$\mathbf{K}_s^{(v)}(\omega, T) = \sum_{k=1}^v \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=1} \mathbf{B}_s^T(\xi, \eta, z) \mathbf{C}_s^{(k)}(\omega, T) \mathbf{B}_s(\xi, \eta, z) \times \det(\mathbf{J}) d\eta d\xi dz$$

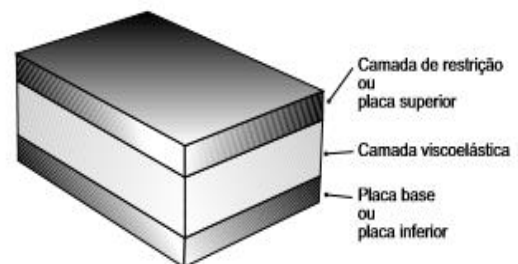
A equação global do movimento de elementos finitos no domínio da frequência (14) (LIMA, DIACENCO, CORREA, 2009):

$$[\mathbf{K}(\omega)] \mathbf{Q}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (14)$$

Sendo  $\mathbf{Q}(\omega)$  o vetor de deslocamentos e  $\mathbf{F}(\omega)$  o vetor de forças.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados quatro casos numéricos de um material compósito estrutural do tipo sanduíche, composto por quatro camadas constituídas de material compósitos com dimensões de  $a = b = 0,16\text{m}$ , cada camada de material compósito apresenta espessura de  $h = a/128$ . O material viscoelástico foi inserido entre as camadas de material compósito, conforme ilustra a Figura 3.





**Figura 3** - Reprodução de um material viscoelástico. Fonte: Moreira 2004.

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas e físicas do material compósito.

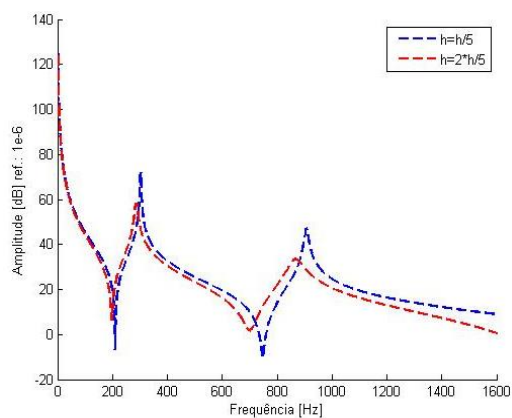
**Tabela 1** – Propriedades do material compósito

$E_1=172,4 \text{ GPa}$
$E_2=E_3=6,89 \text{ GPa}$
$G_{12}=G_{13}=3,45 \text{ GPa}$
$G_{23}=1,38 \text{ GPa}$
$V_{12}=V_{13}=0,25$
$V_{23}=0,30$
$P=1566 \text{ kg/m}^3$

A condição de contorno adotada foi a condição de vibração livre.

### Simulação 1

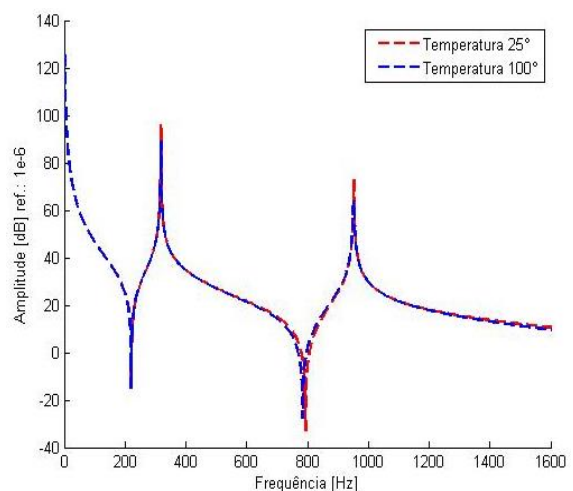
Nesta aplicação numérica foram analisados dois casos, a saber: foram considerados dois valores de espessura para camada viscoelástica  $h=h/5$  e  $h=2.h/5$ , sendo que pôde se notar que existe uma dependência da espessura da camada viscoelástica em relação a capacidade de amortecimento, conforme ilustra a Figura 4.



**Figura 4** - Influência da espessura do material sobre o amortecimento no compósito do tipo sanduíche. Fonte: Próprio autor

### Simulação 2

A Figura 5, apresenta as amplitudes da função de resposta em frequência de um material compósito reforçado com fibras de carbono incorporando material viscoelástico, sendo possível notar, qualitativamente, as primeiras duas frequências naturais do material compósito.



**Figura 5** - Influência do efeito da temperatura sobre o amortecimento no compósito do tipo sanduíche.

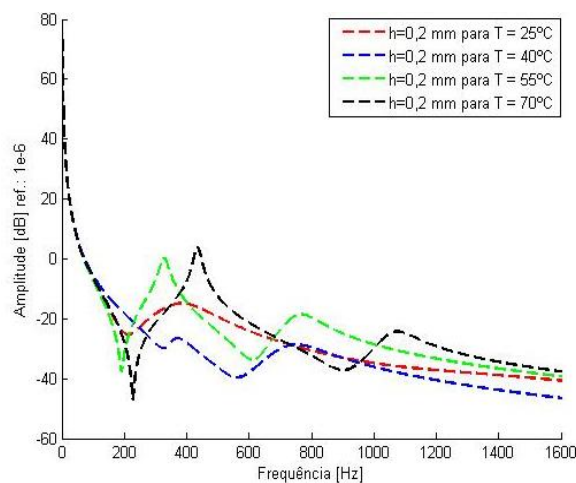
O resultado numérico apresentado analisou o efeito da temperatura sobre a capacidade de amortecimento do material e, apesar de ser relatado na literatura (de Cazenove *et al.*, 2012; Diacenco, 2010) que há uma perda da capacidade de amortecimento no material viscoelástico em relação ao aumento de temperatura, nota-se nesta simulação numérica não pôde-se observar esta relação, o que pode ser devido a teoria

utilizada, pois no trabalho de Diacenco (2010) foi utilizada a Teoria da Deformação Cisalhante de Alta Order (HSDT) e, neste trabalho utilizou-se a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) que apresenta algumas limitações, pois sua capacidade de predição do comportamento mecânico de placas é válido para placas finas e moderadamente espessas e também ao valor da espessura da camada viscoelástica adotada que foi de 0,00125, este valor foi escolhido para estar em concordância em relação as camadas de material compósito, porém este valor é muito inferior se comparado com os valores de espessura de camada viscoelástica aplicados na prática, pois segundo Moreira (2004) foi afirmado que a espessura da camada viscoelástica varia entre 0,2 mm e 1,0 mm. Logo, para verificar o efeito da temperatura na influência do amortecimento viscoelástico foi simulado o mesmo caso anterior, alterando-se apenas o valor da espessura do material viscolástico, conforme a Simulação 3.

### Simulação 3

A Figura 6, mostra as amplitudes em função de resposta em frequência do material compósito considerando diferentes valores para a temperatura, mantendo a espessura da camada viscoelástica 0,1 mm, sendo que pode-se observar, qualitativamente, que houve mudanças significativas nas amplitudes

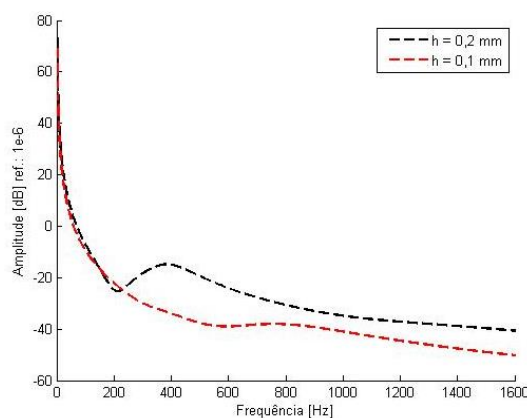
de resposta em frequência, pois com o aumento de temperatura observa-se uma perda da capacidade de amortecimento.



**Figura 6** - Influência do efeito do material com uma espessura de 0,2mm sobre a frequência, amortecimento no compósito do tipo sanduíche.

### Simulação 4

A Figura 7, aponta as amplitudes em função de resposta em frequência do material compósito considerando diferentes valores para a espessura da camada viscoelástica, sendo que pode-se observar, qualitativamente, os dois resultados apresentaram as amplitudes amortecidas.



**Figura 7** - Influência da espessura do material de 0,1mm e 0,2 mm no comportamento do material viscoelástico.

## CONCLUSÃO

Materiais viscoelásticos são extremamente eficientes quando inseridos entre camadas com outros materiais, pois estes materiais apresentam uma elevada capacidade de amortecimento, mas estes materiais dependem de condições externas para serem aplicados, uma delas são as condições ambientes, pois estes materiais são fortemente dependentes da temperatura.

Este trabalho abordou o efeito da influência do material viscoelástico, em relação ao valor da espessura deste material, quando inserido entre materiais compósitos, consistindo em uma estratégia de controle passivo de vibrações.

Pode-se verificar em alguns casos numéricos abordados que o valor da espessura influencia na capacidade de amortecimento. Além disso, quando se trabalha com modelagem e simulação deve se atentar a teoria utilizada para representação do comportamento do material, pois algumas teorias falham a medida que o valor da espessura aumenta.

## REFERÊNCIAS

CAZENOVE, DE J.; RADE, D. ALVES., DE LIMA, A.M.G., ARAUJO, A. A numerical and experimental investigation on self-heating effects in viscoelastic dampers. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.27, p. 433-445,2012

CUNHA, B. S. C. da. **Controle Passivo de Vibrações Induzidas por Vórtices Utilizando Materiais Viscoelástico**. 77f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2016.

DEN HARTOG, J. P. "**Mechanical Vibrations**", 4 th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1956.

DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, MG, 2010.

DIACENCO, A. A., FONSECA, D. J., DINIZ, C. A. Formulação numérica em elementos finitos do amortecimento em materiais compósitos usando a teoria da deformação cisalhante de primeira ordem (FSDT). **69° Congresso da ABM - Internacional**, São Paulo – SP, 2014

DRAKE M.L, SOOVERE J. **A Design Guide for Damping of Aerospace Structures**. In: **Vibration Damping Workshop Proceedings**, AFWAL-TR-84-3064, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, VV- 1-VV-10; 1984.

FARIA, A.W. **Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica**. 2006. 152f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

LIMA, A.M.G.; DIACENCO, A. A.; CORREA, E. O. **Finite Element Modeling of Composite Sandwich Plates with Viscoelastic Layers**. In: 20<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Gramado, RS, 2009.

LIMA, A.M.G., FARIA, A.W., RADE, D.A. Sensitivity Analysis of Frequency Response Functions of Composite Sandwich Plates Containing Viscoelastic Layers. **Composite Structures**, v. 92, p. 364-76, 2010

LIMA, A. F. R. de. **Controle passivo de vibrações de sistemas não lineares empregando ligas com memória de forma**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2015.

MOREIRA, R. A. S. da. **Modelação e análise de tratamentos Viscoelásticos multicamada para controle passivo de vibrações**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Portugal, 2004.

PITELA, B.D.A. **Investigação da Eficiência de Materiais Viscoelásticos para Redução de Vibrações em Risers**. Tese de M. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis**. 2.ed. Florida: CRC Press, 1997.