

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Modelagem Matemática de Estruturas Compostas com Material Viscoelástico

AUTORES:

Jhonattan Dias, Carlos Alberto Bavastri, Eduardo Márcio de Oliveira Lopes

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Paraná

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

MODELAGEM MATEMÁTICA DE ESTRUTURAS COMPOSTAS COM MATERIAL VISCOELÁSTICO

Abstract

All engineering design of structures subject to vibration problems. When a mechanical system is excited in one or several natural frequencies in the resulting response will be high which causes at risk of collapse of the structure due to fatigue or in high levels of noise and discomfort to users. In order to control this vibration the following techniques can be applied: act on the excitement, acting on the structure or design and secure dynamic neutralizing the structure. The viscoelastic materials (MVEs) are applied frequently in vibration control and radiated noise due to high vibrational energy dissipation capacity and elastic potential energy storage. Using the properties of these materials, it has been employed in composite engineering design structures of the sandwich type. They allow the introduction of damping as well as the creation of strong and durable structures. This research study the dynamic behavior of a structure composed of a plus aluminum beam of an SEM thin layer and a metallic barrier layer ("constrained layer"). First it is made to obtain mass matrixes and rigidity of the assembly by commercial software ANSYS® followed by the processing thereof with numeric codes under development by the research group (GVIBS / CNPq). Next, the model derived from the fractional LVM is implemented, corrections being made in the stiffness matrix for it. With headquarters is found the solution to the problem of eigenvalues and made to obtain the structure of the frequency response for a given point of arousal and response. In order to validate the numerical response obtained it was built a prototype and tests carried out to obtain experimental dynamic response. The numerical model presented a good approximation for the experimental model because the response curves showed similar behavior with an order error of 5% for the first two natural frequencies. Upon investigating the causes of errors, testing a different element for the construction of the finite element mesh, ranging modulus and frequency reference material, checking the impact of temperature, mesh refining and Poisson's ratio in response.

Introdução

Vibrações estão presentes em diversos projetos de engenharia, e, uma vez que não sejam devidamente estudadas e controladas podem acarretar níveis de ruído elevados e até em falha prematura da estrutura por fadiga. Com o objetivo de reduzir a reposta a vibrações da estrutura, podem ser utilizadas as seguintes técnicas (Bavastri, 1997): atuar sobre a excitação, reduzindo sua amplitude e/ou alterando o seu espectro; atuar sobre a estrutura, seja pela variação da rigidez, massa ou introduzindo amortecimento; fixar um ou mais sistemas secundários ao sistema vibrante (sistema primário), cuja vibração deseja-se reduzir. Para a última técnica, dá-se o nome de absorvedor dinâmico de vibrações ou neutralizador dinâmico de vibrações ao sistema secundário.

A fim de controlar as vibrações e o ruído irradiado, utiliza-se com frequência materiais viscoelásticos (MVEs) devido a elevada capacidade de dissipação de energia vibratória e armazenamento de energia potencial elástica. Para a modelagem desses materiais utiliza-se diferentes modelos podendo mencionar os de Maxwell, Kelvin-Voigt, Zenner ou combinações destes, modelados por derivadas de ordem inteira ou de derivadas fracionárias.

O modelo de derivadas fracionárias apresenta várias vantagens como pode ser visto em Bagley e Torvik (1983), Bagley (1991) e Pritz (1996). Segundo esses autores, este modelo apresenta uma resposta analítica bem comportada nos domínios do tempo e frequência; isto permite a descrição do comportamento dinâmico, pois a formulação matemática é baseada em teorias moleculares que

governam o comportamento mecânico do meio viscoelástico. Ou seja, o modelo de derivadas fracionárias reproduz com maior fidelidade as características dinâmicas dos materiais viscoelásticos mais utilizados na engenharia em uma ampla faixa de frequência e de temperatura como pode ser observado em Bagley e Torvik (1983), Bagley (1991) e Pritz (1996).

Ao longo das últimas décadas, estruturas compostas do tipo sanduíche vêm sendo empregadas em diversos setores industriais, com finalidades de projeto estrutural, principalmente em casos onde o “peso” é significativamente importante, como, por exemplo, o setor aeronáutico e aeroespacial (Arvin et al., 2010) e (Malheiros, 2006). O desenvolvimento de estruturas sanduíche tem sido adotado como um excelente meio para o projeto de estruturas resistentes, duráveis e de baixo peso, que são especialmente eficientes na transferência de cargas de flexão e compressão (Malheiros, 2006).

Como forma de introduzir amortecimento nesses projetos aplica-se camadas de material viscoelástico com elevado amortecimento, o que permite a estrutura manter a rigidez elevada para suportar os esforços mecânicos e ter o amortecimento necessário oferecido pelo material viscoelástico (Rett, 2011).

O presente trabalho visa estudar o comportamento dinâmico de uma viga metálica composta com uma camada de material viscoelástico com uma restrição de uma lâmina metálica (“constraining layer”), conforme mostra a Fig.1. Além disso, também busca-se encontrar as fontes de erros presentes na modelagem matemática e experimental com objetivo de diminuir os erros associados, tornando a modelagem mais fiel a resposta possível.



Figura 1. Viga composta com material viscoelástico

Metodologia

Na metodologia proposta, primeiramente é feita a obtenção de matrizes de massa e rigidez do conjunto pelo software comercial ANSYS® seguido do processamento das mesmas com códigos numéricos em desenvolvimento em Matlab® pelo grupo de pesquisa (GVIBS/CNPq). Realizada essa etapa é implementado um modelo de derivadas fracionárias para o material viscoelástico, sendo feita correções na matriz de rigidez para ele, onde a influência da temperatura e da frequência são consideradas. Tendo as matrizes de massa e rigidez, é encontrada a solução para o problema de autovalores e feita a obtenção da resposta em frequência da estrutura para um dado ponto de excitação em resposta. A fim de validar a resposta numérica obtida foi construído um protótipo e realizado ensaios para a obtenção da resposta dinâmica experimental.

Foi utilizado para a obtenção do modelo de elementos finitos o elemento SOLID186 (hexaédrico quadrático) que possui 20 nós e 3 graus de liberdade, além de ser aplicada como condições de contorno livre-livre na viga composta. O material viscoelástico utilizado foi o C-1002 cujas propriedades foram previamente caracterizadas pelo grupo de pesquisa. Quanto para a obtenção da resposta em frequência, foi resolvido o problema de autovalor utilizando como matriz de rigidez uma sobreposição da matriz apenas da parte metálica com a do material viscoelástico com as propriedades de rigidez calculadas para a temperatura de realização do experimento e para uma frequência de referência escolhida.

Com essa resposta do problema de autovalor para a frequência de referência escolhida foi realizada aproximações lineares para os demais pontos da faixa de frequência de interesse, aplicando

para cada ponto variações na rigidez do material viscoelástico segundo a derivada de quatro parâmetros sem a necessidade de nova resolução do problema.

Resultados e Discussão

Por meio do modelo desenvolvido, apresentado anteriormente, obteve-se uma resposta numérica muito próxima a experimental como pode ser visto na figura 2. O erro relativo absoluto para as frequências naturais ficou como 4,7059 % para a primeira e 3,4737 % para a segunda.

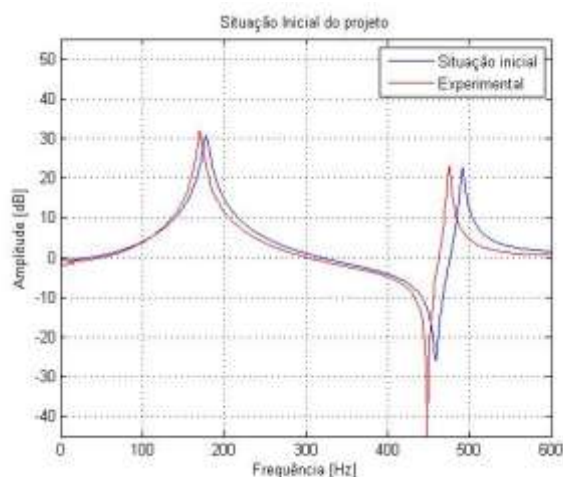


Figura 2 – Aplicação do modelo numérico desenvolvido (em azul) comparada com a curva experimental (em vermelho).

Após a obtenção desse resultado, foram realizadas pesquisas e modificações nos modelos a fim de obter erros menores e calibrar o modelo numérico. Inicialmente acreditava-se que uma medição imprecisa da temperatura experimental poderia ter impactado na resposta, então realizou-se um estudo variando a temperatura para resolução do problema de autovalores e verificar qual o impacto na resposta. A curva obtida nessa análise é mostrada na figura 3.

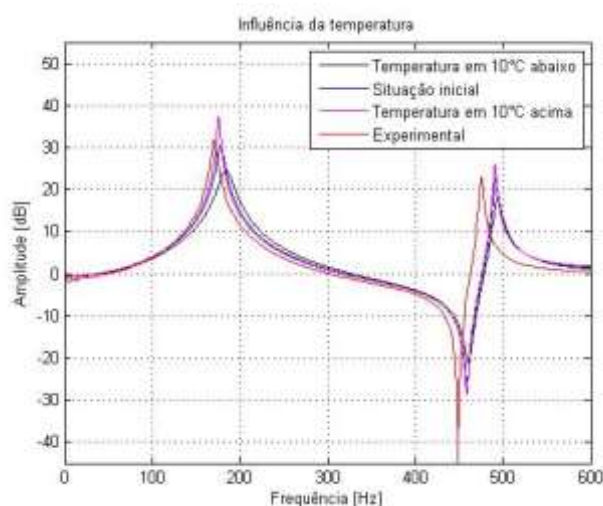


Figura 3 – Análise do impacto da temperatura na resposta.

Foi considerada para essa análise o caso onde o erro na medição da temperatura fosse de 10 °C e isso mostrou que a mudança na temperatura impacta de maneira mais intensa na primeira frequência

natural do que na segunda. Além disso, um erro de 10°C na temperatura é relativamente alto, implicando em dizer que erros na temperatura não são a principal componente no erro da curva numérica.

Após essa análise, estudou-se a otimização da rigidez do material viscoelástico introduzido para a construção da matriz inicial do material viscoelástico bem como a variação da frequência de referência utilizada sobre o comportamento da resposta numérica. Entretanto, essa análise mostrou que a resposta independe dos parâmetros de referência para a frequência e rigidez do MVE, visto que não houve deslocamento na resposta numérica. Também se variou o coeficiente de Poisson do MVE a fim de verificar a influência, mas não houve nenhuma modificação na resposta (a análise foi feita em ambiente ANSYS® não havendo gráficos ou tabelas para expor).



Figura 4 – Comportamento do material viscoelástico com a variação da frequência para uma temperatura fixa (a ambiente do experimento)

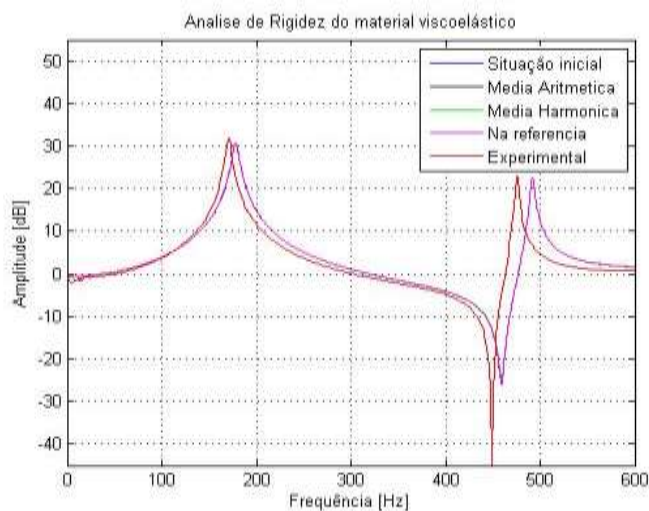


Figura 5 – Otimização do módulo de elasticidade do material viscoelástico introduzido para obtenção da resposta em frequência inicial.

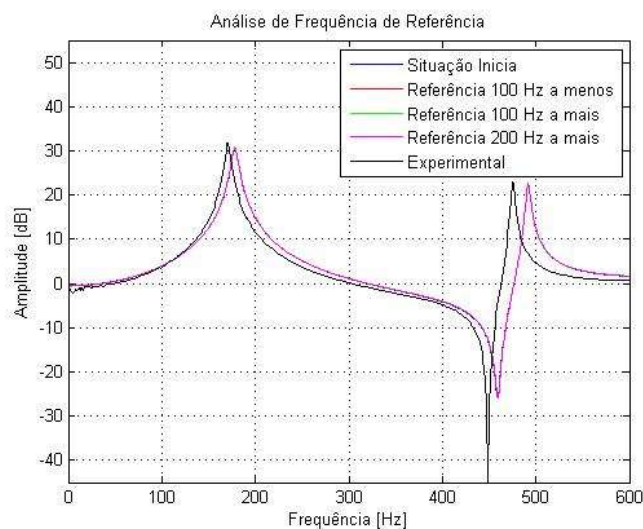


Figura 6 – Análise da variação da frequência de referência utilizada.

Estudou-se também refino da malha de elementos finitos e uma otimização do módulo de elasticidade do alumínio. Tanto o primeiro estudo quanto o segundo não impactaram sobre a resposta de maneira significativa. Isto é, utilizando um refino de malha menor e uma malha com a menor quantidade de elementos possível obteve-se uma resposta com o mesmo erro da utilizada inicialmente (não foi testado um refino de malha maior, pois isso aumentava o tempo computacional além de haver limite para o tamanho das matrizes lidas pelo Matlab®). E, uma otimização no módulo de elasticidade do alumínio não conferiu nenhuma mudança na resposta numérica.

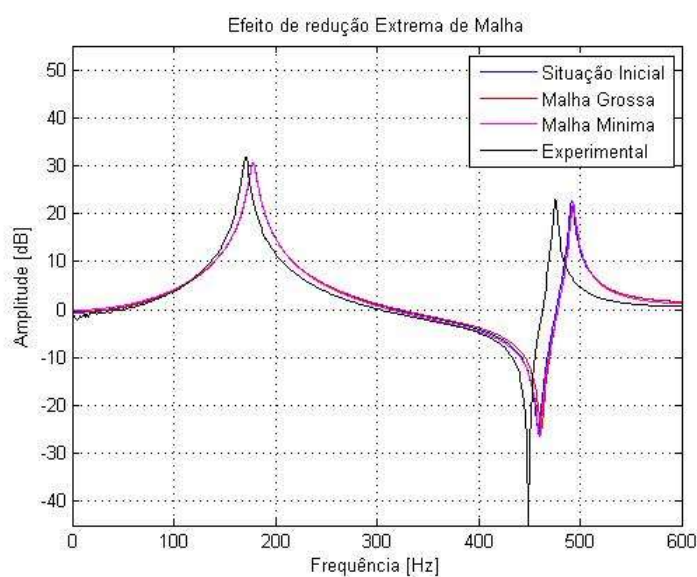


Figura 7 – Utilizando uma malha mais grossa e uma com a quantidade mínima de elementos possível obteve-se a mesma resposta com uma diferença insignificante apenas para a segunda frequência natural.

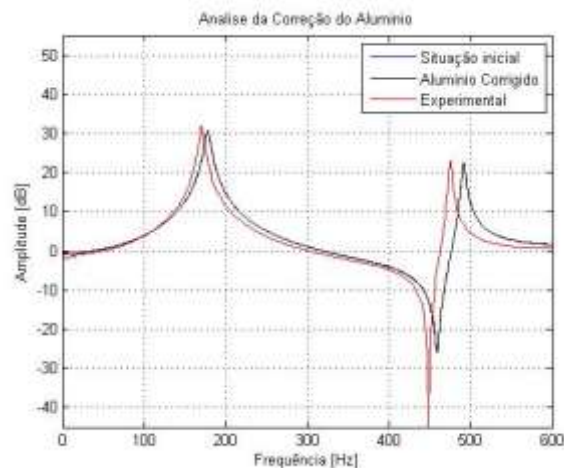


Figura 8 – Otimização do módulo de elasticidade do material viscoelástico.

Por último, buscou-se melhorar a resposta com a substituição do elemento sólido utilizado por um elemento de placa, mas a implementação desse não foi possível até o momento, visto que esse tipo de elemento possui características de utilização diferentes, não compreendidas ainda pelo grupo de pesquisa.

Conclusões

O modelo numérico desenvolvido permitiu a obtenção de uma resposta boa com um erro relativo para a frequência natural baixo, sendo ele menor que 5%. Além disso, descobriu-se que mudanças no refino de malha, na frequência e temperatura de referência e no coeficiente de Poisson não impactam de maneira significativa na resposta, bem como na otimização dos módulos de elasticidade do alumínio e do inicial para o material viscoelástico.

Então, possivelmente, os erros para a resposta podem ter sido ocasionados por uma caracterização imprecisa das propriedades do material viscoelástico ou por problemas no modelo físico de validação. Portanto, caso busque-se calibrar de maneira melhor o modelo pode ser interessante a confecção de um modelo físico de maneira mais adequada substituindo a colagem do material viscoelástico por uma vulcanização do mesmo a fim de evitar bolhas. Outra sugestão seria a aplicação de outro MVE ou a recharacterização do utilizado.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP -, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI, bem como da Petrobrás.

Referências Bibliográficas

Arvin, H.; Sadighi M.; Ohadi, A.R., 2010. An Numerical Study of Free and Forced Vibration of Composite Sandwich Beam with Viscoelastic Core. *Composite Structures*, vol .92, pp. 996–1008.

- Bagley, R.L., Torvik, P.J., 1983. On the Fractional Calculus Model of Viscoelastic Behavior. *Journal of Rheology*, vol. 30, n. 1, pp. 133-155.
- Bagley, R.L., 1991. The Thermorheologically Complex Material. *International Journal of Engineering Science*, vol. 29, n. 7, pp. 797-806.
- Bavastri, C.A., 1997. *Redução de Vibrações de Banda Larga em Estruturas Complexas por Neutralizadores Viscoelásticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina/Florianópolis.
- Cai, C.; Zheng, H.; Liu, G.R., 2004. Vibration Analysis of a Beam with PCLD Patch. *Applied Acoustics*, vol. 65, pp. 1057–1076.
- Espindola, J.J.; Floody, S.E., 1999. On the Modelling of Metal-Elastomer Composite Structures: a Finite elements Method Approach. In *Applied Mechanics in the Americas (PACAM IV)*, vol. 8, pp. 1335-1342.
- Lifshitz, J.M.; Leibowitz, M., 1987. Optimal Sandwich Beam Design for Maximum Viscoelastic Damping. *Int. J. Solids Structures*, vol. 23, n. 7, pp. 1027–1034.
- Malheiros, C.L., 2006. *Modelagem de Vigas Sanduíche em Flexão e Compressão*. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica/São José dos Campos.
- Pritz, T., 1996. Analysis of Four-Parameter Fractional Derivative Model of Real Solid Materials. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 195, n. 1, pp. 103-115.
- Rett, S.R., 2011. *Modelagem e Análise de Vigas Multicamadas Incluindo Efeitos Viscoelásticos e Piezoelétricos*. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica/São José dos Campos.
- Zheng, H.; Cai, C.; Tan, X.M., 2004. Optimization of Partial Constrained Layer Damping Treatment for Vibrational Energy Minimization of Vibrating Beams. *Computers and Structures*, vol. 82, p. 2493–2507.