

REDUÇÃO DE VIBRAÇÃO EM UMA VIGA UTILIZANDO NEUTRALIZADORES DINÂMICOS VISCOELÁSTICOS ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

Gabriel de Almeida Pereira, gabriel060599@gmail.com
Carlos Alberto Bavastrri, bavastrri@ufpr.br
Jucélio Tomás Pereira, prof_jucelio_tomas@hotmail.com
Thiago da Silva, silva.thiago2@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná, Rua Cel. Francisco H. dos Santos, s/n - Bloco IV, Caixa Postal 19.011.

Resumo. *Projetar neutralizadores dinâmicos viscoelásticos para controle de vibrações pode exigir testes experimentais de alto custo. Os softwares comerciais de elementos finitos (FEM) utilizam modelos de materiais viscoelásticos (MVEs) muito simplificados ou muito complexos, precisando, para o seu uso, de coeficientes que muitas vezes não estão disponíveis para o usuário. Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia simples, usando software comercial ANSYS, para prever o comportamento dinâmico de estruturas compostas com esses materiais. Para isso, são realizadas duas etapas. A primeira é modelar um sistema massa-MVE, cujo resultado será comparado com um modelo analítico de um grau de liberdade (1GL). A segunda é projetar, de forma ótima, um neutralizador viscoelástico para reduzir a amplitude de vibração de uma estrutura de MGL, usando software próprio, Lavibs-ND, e comparar com uma resposta equivalente obtida via ANSYS. As propriedades do material viscoelástico são introduzidas por meio de uma tabela, uma vez que elas são funções da temperatura e da frequência. Os resultados oriundos do modelo analítico e do software Lavibs-ND são comparados com os obtidos por meio do software comercial ANSYS. A comparação mostra que o modelo via ANSYS é consistente, sendo promissor para prever o comportamento dinâmico das estruturas de interesse.*

Palavras chave: *Controle passivo de vibrações, Elementos finitos, Materiais viscoelásticos, Neutralizadores dinâmicos, Otimização.*

Abstract. *Viscoelastic dynamic absorbers for vibration control can demand expensive experimental tests. Commercial finite element (FEM) software packages viscoelastic material models very simple or very complex, and required coefficients are not usually available for the user. This work aims to propose a simple methodology, using the commercial software ANSYS to predict the dynamic behavior of composite structures with those materials. For this, the work is carried out in two steps. The first is to model an MVE-mass system, result of which is compared with a single degree-of-freedom analytical model. The second, is to design an optimum viscoelastic absorber to reduce the vibration amplitude of a MGL structure, using a proprietary software, Lavibs-ND, and compare the associated prediction with an equivalent response obtained by ANSYS. The viscoelastic material properties are introduced through a table, once they are frequency and temperature functions. The results obtained from the analytical model and the software Lavibs-ND are compared with those obtained by ANSYS. The comparison shows that the Ansys model is consistent, being promisor to predict the dynamic behavior from the structures of concern.*

Keywords: *Dynamic neutralizers, Finite elements, Optimization, Passive vibration control, Viscoelastic materials.*

1. INTRODUÇÃO

Estruturas e sistemas mecânicos que apresentam vibrações elevadas podem ter seu funcionamento comprometido, seja proporcionando desconforto humano, seja reduzindo sua vida útil. Na presença de ressonância ou instabilidade dinâmica, o uso de neutralizadores dinâmicos é uma forma de controle altamente eficaz. Em muitas aplicações práticas, tais dispositivos podem ser construídos utilizando materiais viscoelásticos (MVEs). O comportamento dinâmico de tais materiais é demonstrado em Olienick (2019).

O modelo mais simples de um neutralizador dinâmico é de 1 GL. Há duas possibilidades fundamentais de trabalho de um MVE, quais sejam, compressão ou cisalhamento. Estes materiais podem ser altamente dependentes da temperatura e da frequência.

Para realizar os cálculos e obter a resposta analítica associada ao desempenho de um neutralizador de 1 GL viscoelástico, objeto da etapa 1, é utilizado um código desenvolvido no software MatLab. Para o projeto ótimo do neutralizador, visando controlar o segundo modo de uma viga metálica, objeto da etapa 2, é utilizado um software chamado de Lavibs-ND, que foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Vibrações e Som em Sistemas Mecânicos da UFPR (GVIBS). Este código foi desenvolvido em JAVA – FORTRAN. O modelo de elementos finitos para as etapas 1 e 2, é desenvolvido com auxílio do software comercial ANSYS APDL. Nesse software, são desenvolvidos três modelos, um para o sistema primário, necessário para o projeto ótimo do neutralizador dinâmico, um para o neutralizador e um para o sistema composto. Realizando uma análise harmônica no sistema primário e no sistema composto, é possível comparar as respostas em frequência e verificar se o modelo de elementos finitos representa de maneira adequada o comportamento dinâmico do neutralizador e deste quando fixado no sistema a controlar.

Mostra-se ~~abaixo~~ que os resultados obtidos por ambos modelos são satisfatórios, visto que as curvas de resposta em frequência obtidas através do Lavibs-ND e do modelo ANSYS APDL são muito próximas. Isso revela que o modelo de elementos finitos pode representar de forma adequada e mais robusta o comportamento de estruturas compostas com material viscoelástico.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais viscoelásticos

Materiais viscoelásticos (MVEs) são cada vez mais utilizados em controle de vibrações devido à elevada capacidade de dissipar energia vibratória e à facilidade de construção de dispositivos dinâmicos de diferentes tamanhos e complexidade geométrica através de técnicas de vulcanização direta. Para descrever o comportamento de tais materiais, pode-se utilizar, o modelo de derivada fracionária com 4 parâmetros (Castro, 2019), em que:

$$\bar{G}(\Omega, T) = \frac{G_0 + G_\infty b_1 [i\Omega\alpha(T)]^\beta}{1 + b_1 [i\Omega\alpha(T)]^\beta}, \quad (1)$$

onde G_0 e G_∞ representam os valores das assíntotas inferior e superior da parte real do módulo complexo, respectivamente, β é a ordem da derivada fracionária, Ω é a frequência de trabalho em radianos por segundo, b_1 está associado ao tempo de relaxação do material. Já a função $\alpha(T)$ é descrita pela Eq. (2) e representa o deslocamento em frequência causado pela variação da temperatura. Esta função é dada por:

$$\alpha(T) = 10^{-\theta_1 \left(\frac{T-T_0}{\theta_2+(T-T_0)} \right)}, \quad (2)$$

sendo que T é a temperatura de trabalho, T_0 é uma temperatura de referência e θ_1 e θ_2 são constantes que dependem do material. Separando a parte real da imaginária e dividindo esta por aquela, o módulo complexo pode ser reescrito como $\bar{G}(\Omega) = G(\Omega)[1 + i\eta(\Omega)]$, onde $\eta(\Omega)$ é denominado fator de perda. A Figura 1 mostra o nomograma do MVE utilizado.

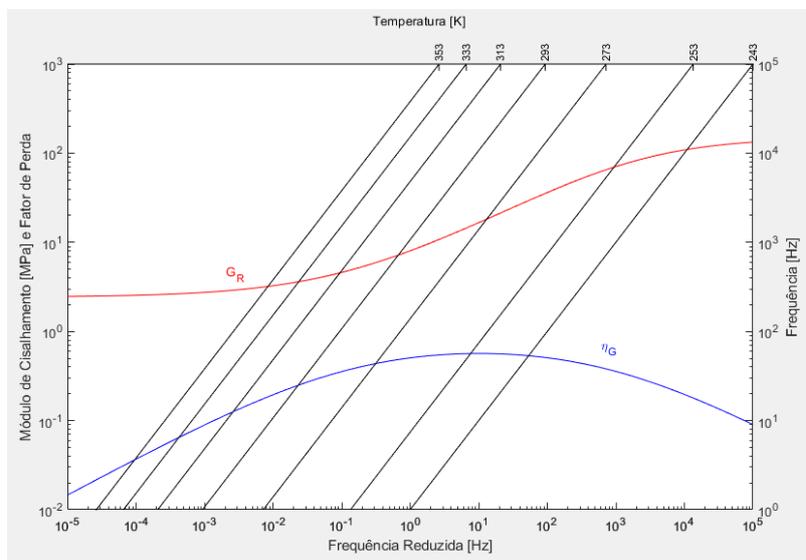


Figura 1. Nomograma da borracha butílica BT806-55

A rigidez de um elemento de MVE é definida através de um parâmetro geométrico L , que pode assumir valores distintos dependendo se o MVE está exposto a esforços de compressão ou de cisalhamento. Para o caso de cisalhamento têm-se que $L = \frac{A}{h}$; para o caso de compressão, $L = \frac{2(1+\nu)A}{h}$ (Bavaresco, 2018), sendo ν o coeficiente de Poisson.

2.2. Sistemas de 1GL

A maneira mais simplificada de se representar um sistema é através de um modelo equivalente de 1GL, como mostrado na Fig. 2.

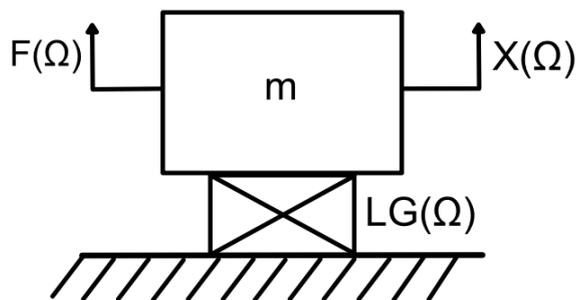


Figura 2. Modelo equivalente de 1 grau de liberdade

A partir do diagrama de corpo livre na massa e aplicando-se a 2ª lei de Newton (Bavastri, 1997), a função resposta em frequência (receptância) é dada por:

$$H(\Omega) = \frac{X(\Omega)}{F(\Omega)} = \frac{1}{-m^2\Omega^2 + LG(\Omega)(1 + i\eta(\Omega))} \quad (3)$$

Considerando borracha butílica BT806-55 (Olienick, 2019), a temperatura de trabalho de 40°C, o fator geométrico de 0,149 e a massa de 1,089 kg, a resposta em frequência da Eq. (3) é representada na Fig. 3.

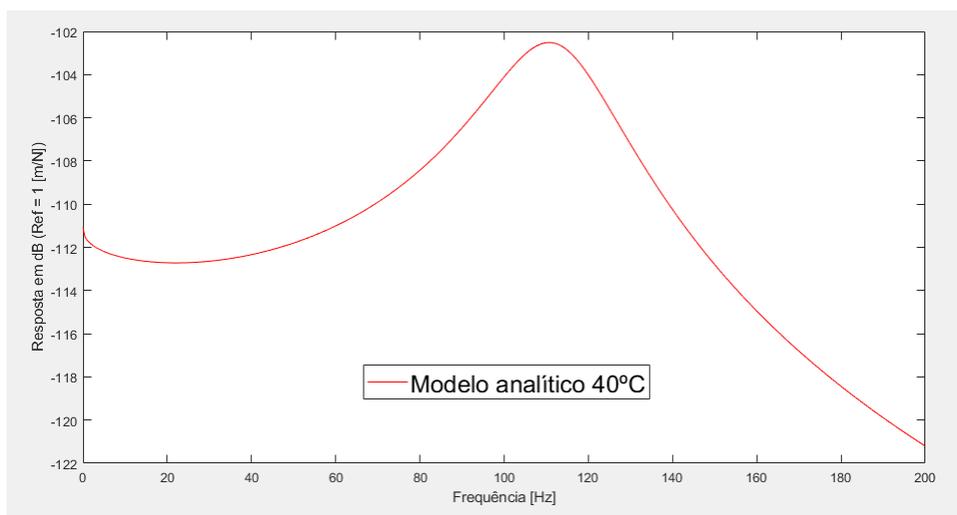


Figura 3. Resposta em frequência para um modelo de 1GL

Por definição, sabe-se que a frequência natural do sistema é dada por (Bavaresco, 2018):

$$\Omega_n = \sqrt{\frac{LG(\Omega)}{m}} \quad (4)$$

3. Metodologia

Este trabalho pode ser dividido em duas partes: na primeira, uma comparação de um modelo de elementos finitos 1GL equivalente analítico com um modelo de 1GL equivalente analítico-elementos finitos; na segunda, o projeto ótimo do dispositivo de 1 GL para reduzir o nível de vibração associado à segunda frequência natural de uma viga metálica. Esta segunda etapa é realizada através de um software próprio e um software comercial de elementos finitos, ANSYS Mechanical APDL (ANSYS *Parametric Design Language*).

Tal escolha foi feita devido à capacidade do software em trabalhar com propriedades dos materiais dependentes da frequência em análises harmônicas. Para obter estas propriedades, o software utiliza da série de Prony (Pacheco, 2013), sendo que, para tanto, é preciso conhecer os coeficientes do modelo da série. Também, é possível utilizar os dados fornecidos em uma tabela, indexada pela frequência, método que é utilizado neste trabalho.

3.1. Modelo de 1GL versus modelo de elementos finitos

Para verificar a capacidade do modelo de elementos finitos de representar o comportamento dinâmico do material viscoelástico, foi realizado um modelo do sistema de 1 GL e seu resultado comparado com o calculado analiticamente pela eq. (3). O modelo de elementos finitos foi desenvolvido da seguinte maneira: o material viscoelástico e a massa são volumes exatamente iguais de formato cúbico e lado 0,05m. Esta foi realizada desta forma para facilitar a criação de uma malha de melhor qualidade e evitar erros associados à conectividade de ambos elementos. Para que o modelo de elementos finitos se comporte da maneira similar ao modelo analítico foram implementados planos de simetria na base do MVE e nas laterais da massa. A densidade da massa é de 7850kg/m^3 e o MVE é a borracha butílica BT806-55 trabalhando a uma temperatura de 40°C . Sendo o modelo obtido o da Fig. 4.

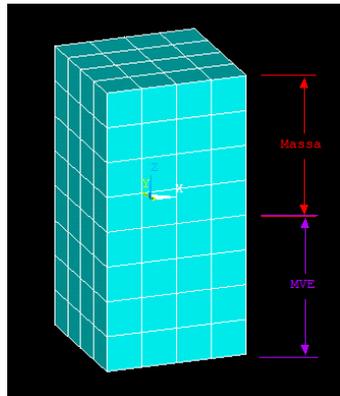


Figura 4. Modelo de um sistema de 1 GL composto por uma massa e uma manta de MVE

3.2. Projeto ótimo de um neutralizador viscoelástico

O projeto ótimo de um neutralizador dinâmico pode ser dividido em três partes, quais sejam: obtenção dos parâmetros modais do sistema primário ou sistema a controlar (viga metálica), cálculo dos parâmetros ótimos do neutralizador e a construção e inserção deste na viga, para verificar a eficácia do dispositivo de controle.

3.2.1. Modelo da viga

A viga ou sistema primário possui dimensões de $0,6\text{m} \times 0,06\text{m} \times 0,01\text{m}$, sendo o modelo 3D realizado a partir do próprio APDL, como visualizado na Fig. 5. O material considerado é o aço comum, com as propriedades descritas na Tab.1.

Tabela 1. Propriedades do material da viga

Densidade [kg/m^3]	7850
Módulo de elasticidade [Pa]	$2,1 \cdot 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	0,3

Para realizar a análise modal no software ANSYS, é necessário definir alguns parâmetros tais como tipo de elemento utilizado, tamanho da malha e condições de contorno. O elemento escolhido neste trabalho é SOLID185 (elemento do tipo sólido e linear com 8 nós). O tamanho do elemento é definido como igual a $0,005\text{m}$, ou seja, dois elementos ao longo da espessura da viga, já que simulações realizadas com elementos menores que não resultaram em diferenças significativas. A viga está engastada na base e livre no outro extremo. Aplicando tais parâmetros, obtém-se o modelo da

Fig. 5, com o qual foram obtidos os parâmetros modais (frequências naturais e modos de vibrar), adotou-se um amortecimento modal de 0,001.

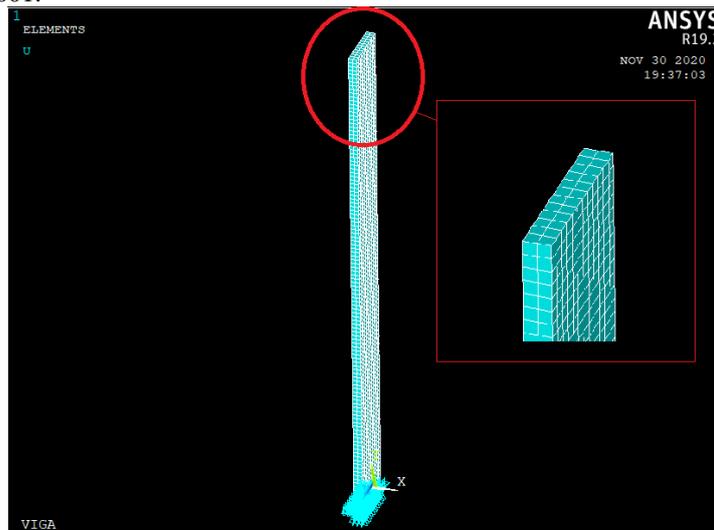


Figura 5. Viga com malha de 0,005m

3.2.2. Parâmetros do neutralizador

Após obter os parâmetros modais da viga, pode-se realizar o projeto ótimo do neutralizador usando-se para tal o Lavibs-ND. Como resultado, obtém-se a frequência natural do neutralizador e a massa. Através desses parâmetros é obtido o fator geométrico L e definida, as dimensões do MVE, dimensões essas necessárias para a construção física do dispositivo. No software em questão, é possível construir o gráfico da receptância com e sem a presença do neutralizador.

3.2.3. Modelo da viga com o neutralizador

Inserindo o NDV no modelo de elementos finitos da viga no ANSYS e fazendo uma análise harmônica, é possível verificar qual é a redução obtida na resposta. Para gerar o contato do NDV com a viga, é necessário que os nós das malhas coincidam. O tipo de contato é “bonded”, o que impede que MVE deslize ou se separe da viga.

4. Resultados

4.1. Modelo de 1GL x Modelo de elementos finitos

Após realizar a análise harmônica do modelo de elementos finitos e calcular a resposta em frequência do modelo equivalente de 1GL, encontra-se a curva preta na Fig. 6. A curva em vermelho é obtida através do modelo analítico, Eq. (3).

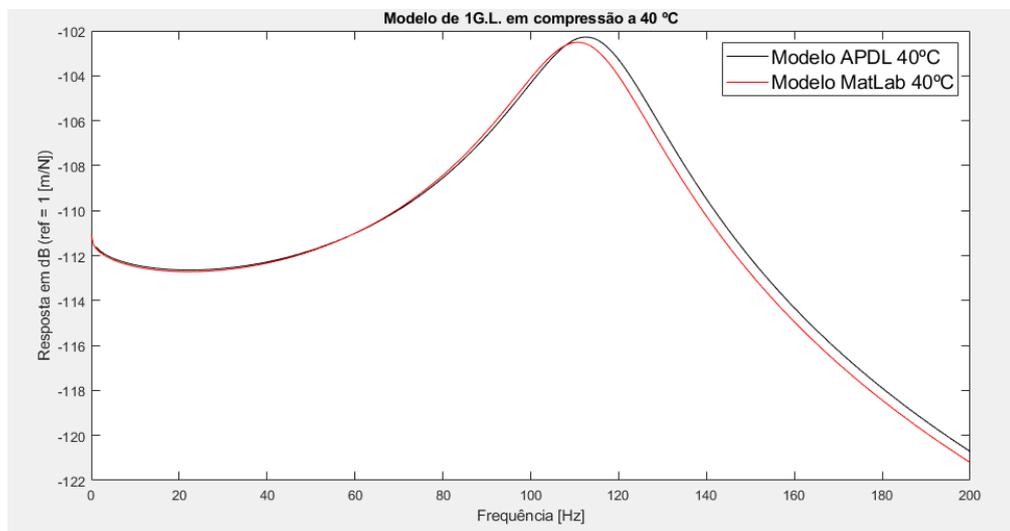


Figura 6. Comparação da resposta entre o modelo de elementos finitos e o modelo de analítico

4.2. Projeto ótimo do neutralizador

4.2.1. Análise modal da viga

Para realizar a análise modal da viga, foi escolhido o método de “Block Lanczos” e retirados os 10 primeiros modos ortonormalizados em relação à massa. Na Tabela 2, podem ser observadas as primeiras 10 frequências naturais, enquanto que, na Fig. 8 ilustram-se os modos de vibrar 1, 3 e 4.

Tabela 2. Frequências naturais.

Modo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Freq. [Hz]	23,452	138,51	146,82	410,54	429,93	803,03	831,11	1295,8	1324,4	1972,7

No presente trabalho, a faixa de frequência de interesse inicial encontra-se de 0 a 500 Hz. Os graus de liberdade a controlar são de deslocamento na direção X. Portanto, só são de interesse os 5 primeiros modos, dos quais o 2 não apresenta deslocamento em X e o 5 é um modo de torção. Assim, os modos de interesse são o 1,3 e 4 (vide Fig. 7).

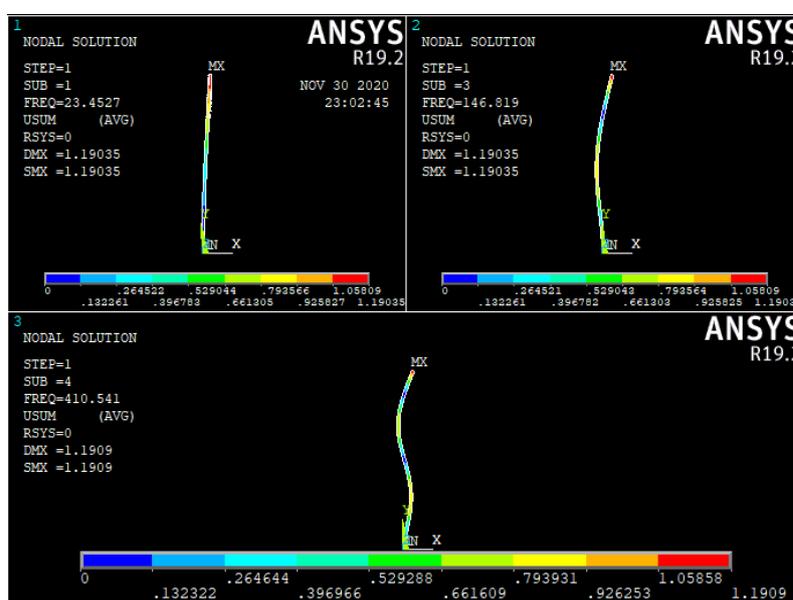


Figura 7. Modos 1,3 e 4 da viga.

4.2.2. Parâmetros para projeto do neutralizador

Obtidos os parâmetros modais da viga metálica engastada livre, o software Lavibs-ND é capaz de calcular o valor ótimo da frequência natural do neutralizador, além de fornecer também a usa-sua massa. Para tal, é necessário definir alguns parâmetros, tais como:

- Ponto de excitação: nó 2875 (nó no centro da extremidade livre da viga na face inferior);
- Ponto de resposta: nó 2898 (nó no centro da extremidade livre da viga na face superior);
- Localização nodal do NDV: nó 710 (nó alinhado com o ponto de resposta deslocado de 20mm na direção Y);
- Material viscoelástico do NDV: Borracha butílica BT806-55;
- Faixa de frequência a controlar: 125-175 Hz, ou seja, apenas o terceiro modo;
- Parâmetros de otimização para algoritmos genéticos: n° gerações = 20, taxa de mutação = 4%, n° de indivíduos = 60, crossover = 40%. Para o método Quasi-Newton, o critério de parada foi estabelecido como $1 \cdot 10^{-9}$.

Os resultados do neutralizador obtidos do Lavibs_ND são: massa de 0,11 kg e frequência natural de 130,06 Hz. Por meio da Eq.(4), encontra-se o parâmetro $L = 0,018$, o que permite definir a área em contato com a viga, sendo esta quadrada, com lado de 0,0075m. Já a altura da manta de material viscoelástico, tem valor de 0,0094m.

4.3. Viga com neutralizador

Ao modelar e inserir o NDV na viga com os parâmetros obtidos do Lavibs-ND, resulta o modelo de elementos finitos mostrado na Fig. 8.

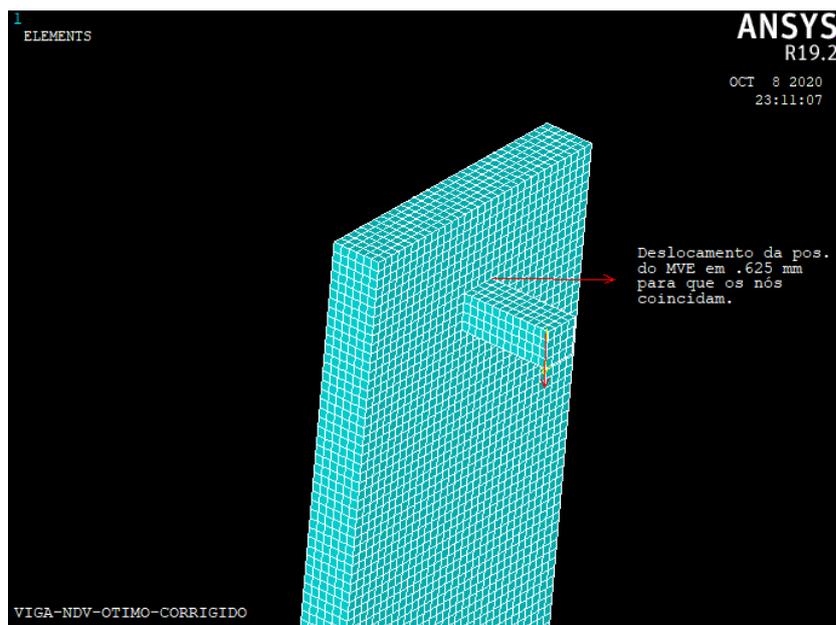


Figura 8. Extremidade da viga com o neutralizador

Realiza-se, então, uma análise harmônica na viga, sendo que a excitação e resposta estão localizadas da mesma maneira que o proposto no Lavibs-ND. Na Figura 9, podem ser visualizadas as curvas de receptância da viga engastada-livre sem e com o neutralizador ótimo fixado nela, usando o Lavibs-ND e o software ANSYS. Ao observar as curvas obtidas com as duas simulações, Lavibs-ND e ANSYS, percebe-se a similitude dos resultados e a concordância entre ambos os códigos. Em ambos, pode visualizar-se que a redução de vibração alcançada com o dispositivo de controle, é da ordem de 40 dB, redução esta que depende muito do amortecimento modal do sistema a controlar.

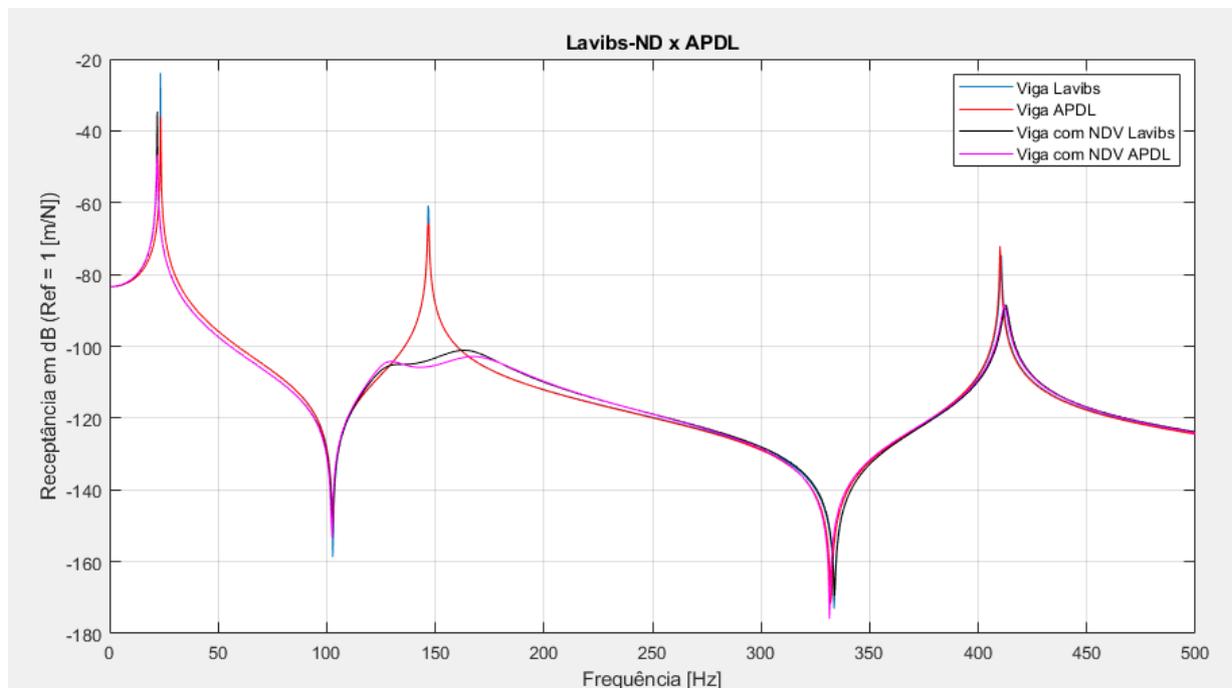


Figura 9. Comparação entre as curvas de resposta da viga sem e com neutralizador obtidas via Lavibs-ND e ANSYS

5. Conclusões

Foi proposto um método no software comercial ANSYS para prever o comportamento dinâmico de uma estrutura composta com material viscoelástico, material este cujas propriedades dependem da frequência e da temperatura. Foram modelados um sistema simples massa-material viscoelástico e uma estrutura mais complexa, qual seja, viga engastada-livre, em que foi fixado um neutralizador dinâmico. Os resultados de ambos modelos foram comparados com outras abordagens de uso já consagradas.

Os resultados obtidos com as distintas abordagens mostraram uma boa concordância, o que torna o método proposto promissor.

Esses resultados permitem que no futuro, modelar, com software comercial, estruturas complexas compostas com materiais viscoelásticos, permita a predição com precisão, do seu comportamento.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Prof. Eduardo Marcio Lopes de Oliveira, pelos ótimos conselhos durante a execução e escrita do trabalho.
A Petrobras pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Bavaresco, M. W., 2018. “Desenvolvimento de um Neutralizador Ajustável para Controle de Vibrações”. Curitiba, Brasil.
- Bavastri, C. A., 1997. “Redução de Vibrações de Banda Larga em Estruturas Complexas por Neutralizadores Viscoelásticos”. Florianópolis, Brasil.
- Castro, F. E. S., 2019. “Projeto Ótimo de Neutralizadores Dinâmicos com Múltiplos Graus de Liberdade Considerando os Parâmetros Físicos, Localização e Material Viscoelástico”. Curitiba, Brasil.
- Olienick, E.G. F., 2019.” Caracterização Dinâmica Integrada de Materiais Viscoelásticos Termo-Reologicamente Simples, Contabilizando Efeitos de Frequência, Temperatura e Pré-Carga. Curitiba, Brasil.
- Pacheco, J. E. L., “Caracterização de Materiais Viscoelásticos com Aplicação de Séries de Prony e Análise por Elementos Finitos. Curitiba, 2013.