

Investigação de danos em uma viga engastada utilizando a técnica SHM baseada em vibrações e modelo de elementos finitos

Bruno Zanelli Vieira, brunozanelli@estudante.ufscar.br¹

Vitor Ramos Franco, vrfranco@ufscar.br¹

Anderson Antonio Ubices de Moraes, ubices@ufscar.br¹

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br¹

¹Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310, CEP 13565-905, São Carlos-SP.

Resumo. O monitoramento de danos em estruturas mecânicas é fundamental para garantir a segurança e a manutenção de suas funcionalidades durante a vida em operação. Em geral, o processo de monitoramento de danos é denominado como Monitoramento da Integridade Estrutural ou SHM (Structural Health Monitoring). Dentre as diversas técnicas de monitoramento baseada em dados experimentais destaca-se a SHM baseada em vibrações com a utilização da função de resposta em frequência (FRF) da estrutura. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal investigar a influência de danos presentes em uma estrutura através de curvas de função de resposta em frequência. Para tanto é utilizado um setup experimental no qual uma viga metálica engastada e sua função de resposta em frequência coletada experimentalmente com teste via martelo de impacto e acelerômetro. Um modelo em elementos finitos (MEF) da viga foi desenvolvido e ajustado com os dados experimentais para que simulações para geração de novas FRFs numéricas fossem realizadas considerando danos de diferentes intensidades e localizações na estrutura. Os resultados do modelo foram processados para a geração de índices de falha que permitiram quantificar a influência da intensidade e localização dos diferentes danos estudados.

Palavras chave: Monitoramento da integridade estrutural. Análise Modal. Modelo de elementos finitos

Abstract. Monitoring damage to mechanical structures is essential to ensure safety and maintenance of their functionality during their operational life. In general, the damage monitoring strategy is referred to as Structural Health Monitoring or SHM (Structural Health Monitoring). Among the various monitoring techniques based on experimental data, vibration-based SHM stands out with the use of the structure's frequency response function (FRF). In this context, this work's main objective is to investigate the influence of damage present in a structure through frequency response function curves. To this end, an experimental setup was used in which a fixed metal beam was used as a case study and its frequency response function was collected experimentally with testing via impact hammer and accelerometer. A finite element model (FEM) of the beam was developed and adjusted with experimental data so that simulations to generate new numerical FRFs could be carried out considering damages of different intensities and locations in the structure. The model results were processed to generate failure indices that made it possible to quantify the influence of the intensity and location of the different damages studied.

Keywords: Structural Health Monitoring, Modal Analysis, Finite element model

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de danos em estruturas civis, aeronáuticas e mecânicas (como pontes, barragens, turbinas eólicas, aeronaves e plataformas *offshore*) é fundamental para garantir a segurança e a manutenção de suas funcionalidades durante a vida em operação. Em geral, a estratégia de monitoramento de danos nestes sistemas é denominada Monitoramento da Integridade Estrutural ou SHM (Structural Health Monitoring). O SHM envolve a utilização de sensores, técnicas de monitoramento e algoritmos de análise para detectar e avaliar a ocorrência de danos, fadiga, degradação ou anomalias que possam comprometer a segurança e desempenho das estruturas.

No SHM, conforme Diao *et al.* (2018), duas categorias principais são empregadas para detecção de danos: a primeira baseada em uma abordagem numérica, podendo ser aplicado o método dos elementos finitos para identificar mudanças ou desvios em relação ao comportamento estrutural esperado, indicando a presença de danos ou deterioração. Já a segunda abordagem é baseada em dados experimentais onde medições por sensores (como, por exemplo, acelerômetros, extensômetros e termômetros) são utilizadas para avaliar tais desvios e variações.

Dentre as diversas técnicas de monitoramento baseada em dados experimentais destaca-se a SHM baseada em vibrações (Fang *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2021; Franco, 2009). Neste caso, busca-se relações entre parâmetros modais (como as frequências naturais e modos de vibrar) e físicos (como a rigidez estrutural) permitindo o monitoramento da estrutura

principalmente por meio de sensores como acelerômetros estrategicamente posicionados.

Uma abordagem específica, dentro do campo do SHM experimental baseado em vibrações, é aquela que utiliza a Função de Resposta em Frequência (FRF) da estrutura. Neste caso, são instalados sensores estrategicamente posicionados na estrutura para medir a resposta à excitação. Esses sensores capturam os sinais de excitação no domínio do tempo da estrutura durante sua operação normal. Através do processamento desses sinais, obtém-se a função de resposta em frequência, que representa a relação entre a entrada e a saída da estrutura em diferentes frequências (McConnell and Varoto, 2008).

Comparando as FRFs medidas com FRFs de referência ou modelos teóricos, é possível identificar alterações significativas e potenciais danos na estrutura. O SHM baseado em FRF permite uma abordagem não invasiva e contínua, possibilitando um monitoramento em tempo real das estruturas. Porém, esta abordagem ainda enfrenta desafios técnicos, como a seleção adequada dos sensores, a implementação eficiente de sistemas de aquisição, a calibração precisa e a análise dos dados. Além disso, a interpretação correta das FRFs e a distinção entre mudanças devido a danos e variações normais são áreas de pesquisa em desenvolvimento contínuo. Recentemente, para aprimorar a capacidade de detecção e prognóstico de danos estruturais, diversas pesquisas vem empregando a aprendizagem de máquina (*Machine Learning* – ML) como ferramenta complementar para o monitoramento de danos de estruturas civis e mecânicas (Malekloo *et al.*, 2022; Kot *et al.*, 2021; Bao and Li, 2021; Toh and Park, 2020).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal investigar a influência de danos presentes em uma estrutura através de curvas de função de resposta em frequência. Para tanto foi utilizado um *setup* experimental no qual uma viga metálica engastada foi utilizada como estudo de caso. A viga, em sua configuração inicial sem danos, foi testada e sua função resposta em frequência (FRF) obtida experimentalmente com teste via martelo de impacto e acelerômetro. Em seguida, um modelo em elementos finitos (MEF) da viga foi desenvolvido e ajustado com os dados experimentais. Após a calibração do modelo, simulações para geração de novas FRFs numéricas foram realizadas considerando-se diferentes danos na estrutura. Estes resultados do modelo foram processados para a geração de índices de falha que permitiram quantificar a influência da intensidade e localização dos diferentes danos estudados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O teste experimental de impacto (*Impact Hammer Modal Testing*) da viga engastada, em sua configuração sem dano, é esquematizado na Fig. 1. O *setup* de teste foi montado no Laboratório de Engenharia Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar e foi composto por uma viga com formato de uma barra chata de alumínio comercial com dimensões da seção transversal de 30 x 3 [mm] e comprimento do trecho em balanço com 350 [mm]. A viga foi engastada com auxílio de blocos de aço inox fixos com um sargento.



Figura 1. Configuração do teste experimental

Para a excitação da viga, foi utilizado um martelo de impacto da marca PCB *Piezotronics*, modelo 086C03, com sensibilidade de 2,25mV/N, o qual permite a medição da força aplicada. Já a resposta da estrutura, em termos de aceleração, foi medida por meio de um acelerômetro também da marca PCB, modelo 333B30, com sensibilidade de 100,2 mV/g. Os dados de força e aceleração foram coletados por uma placa de aquisição de dados da marca *National Instruments*, modelo

NI-9234. A aquisição de dados foi feita a uma taxa de 6400 Hz com 192000 de amostras durante 30 segundos. A partir da força de entrada e da aceleração medida como saída, foi possível obter a Função de Resposta em Frequência para cada um dos testes realizados utilizando-se de comandos disponíveis no *software* MatLab.

O modelo de elementos finitos foi desenvolvido utilizando o módulo de simulação de resposta em frequência do *software* NX12 para simular a sollicitação dinâmica da viga sem dano. A viga foi modelada com elementos do tipo casca (*shell*) e o engaste com elementos de conexão denominados CBUSH os quais permitem a edição e ajustes de rigidez em todos os graus de liberdade. Além disso, foram utilizados um elemento 0D denominado CONM2 e elementos de conexões denominados RBE2 para representar a massa de 4 [g] do acelerômetro sobre a viga, conforme a ilustrado na Fig. 2. Em seguida, o modelo de elementos finitos teve os valores de rigidez e amortecimento ajustados até a obtenção de uma boa correlação com a FRF experimental, adotando como qualidade do ajuste o erro relativo entre os dados numérico e experimental calculado via norma H2. A solução utilizada no *software* NX12 foi a denominada SOL 111 *Modal Frequency Response*.

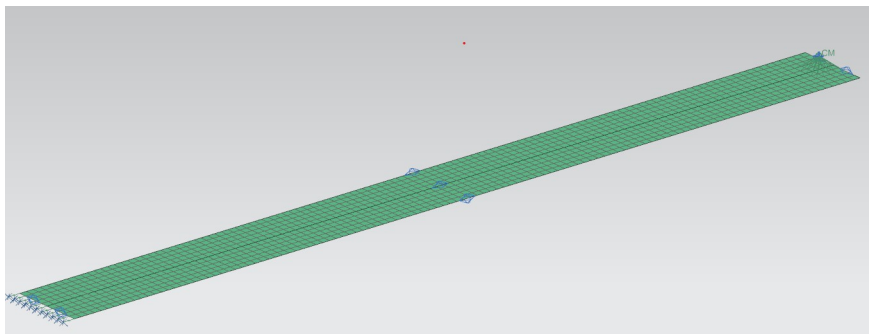


Figura 2. Malha do modelo de elementos finitos para ajuste com teste

Após a calibração do modelo de elementos finitos, novas simulações foram realizadas considerando danos em formatos de furos com 3 diâmetros distintos ($D4 = 4$ [mm]; $D10 = 10$ [mm]; $D13 = 13$ [mm]) distribuídos no centro de 3 zonas de 50 [mm] conforme esquematizado na Fig. 3. Para cada posição e intensidade (diâmetro) do dano foi realizada uma simulação e obtida a sua FRF correspondente considerando sempre o mesmo ponto de excitação e de medição utilizado na geração da FRF de base do teste da viga sem dano. A Fig. 4 ilustra uma malha típica dos casos modelados mostrando um dano localizado na zona 1.

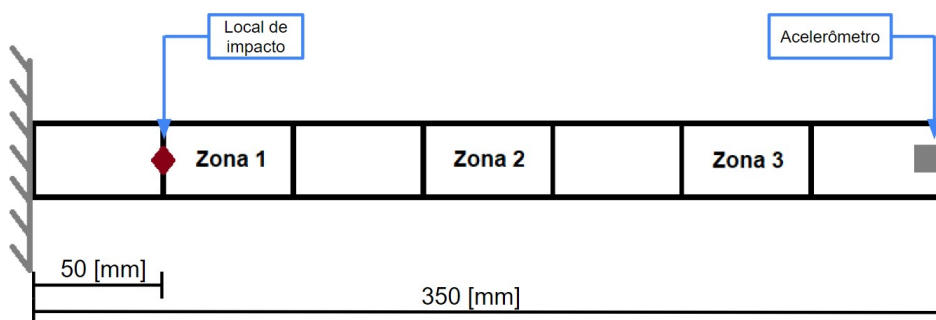


Figura 3. Detalhes das zonas de localização dos danos

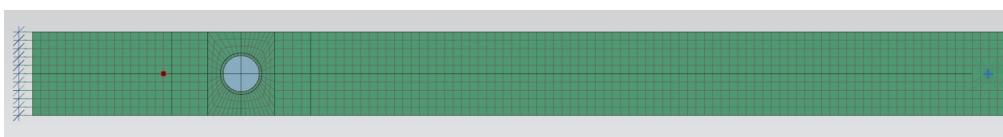


Figura 4. Exemplo de malha do modelo com dano localizado na zona 1

Finalmente, para poder quantificar o quanto o comportamento da estrutura altera com a presença de danos foi utilizado um índice numérico que é baseado em uma comparação entre a FRF da estrutura na condição saudável (*baseline*) e da estrutura em condições normais de operação (condições com presença de dano). O índice utilizado foi o *Root-Mean-*

Square Deviation (RMSD), que pode ser determinado, conforme Lopes Jr *et al.* (2000), como:

$$I_{RMSD} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[(G_{i,B}) - (G_{i,CD})]^2}{[G_{i,CD}]^2}} \quad (1)$$

onde $G_{i,B}$ é a magnitude da FRF medida no sinal de referência (*baseline*), ou seja, da estrutura saudável (sem falha), $G_{i,CD}$ é a magnitude da FRF medida em condições com parâmetros desconhecidos no intervalo de frequência i e n é o número de amostras utilizados na determinação da FRF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A FRF experimental da viga, obtida após o processamento dos sinais de força e aceleração coletados, é apresentada na Fig. 5. Pode-se observar os picos correspondentes as frequências naturais dos três primeiros modos de flexão para a faixa de frequência de 0 até 400 Hz considerada nas análises.

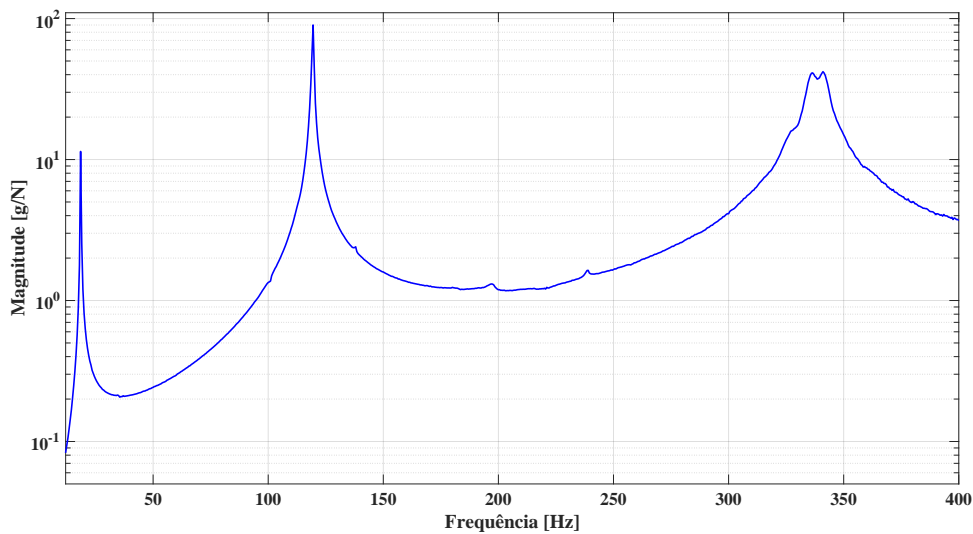


Figura 5. FRF experimental da viga engastada

Com a obtenção da FRF experimental, a FRF do modelo de elementos finitos pode ser ajustada alterando alguns parâmetro de rigidez do engaste e de amortecimento. A Fig. 6 mostra a comparação entre a FRF experimental e do modelo MEF já ajustado. O ajuste apresentou uma satisfatória correlação com os dados experimentais, capturando tanto a posição como a magnitude dos picos.

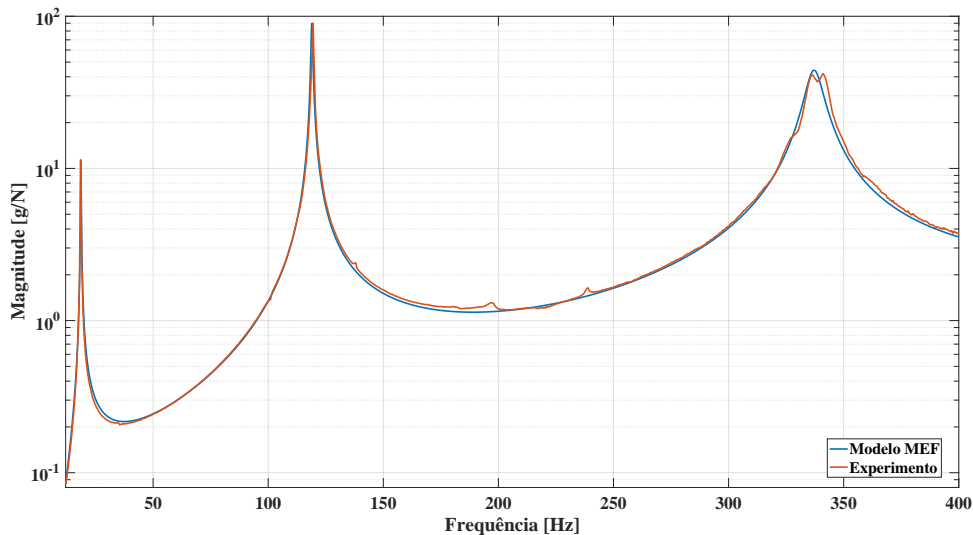


Figura 6. Comparação FRF experimental e modelo MEF

A partir do modelo ajustado (denominado de *baseline*) foram geradas as novas simulações da viga com os danos localizados nas zonas definidas na seção anterior. A Fig. 7 apresenta as FRFs do modelo comparando a *baseline* com as três intensidades de danos, todos localizados na zona 1. É possível notar que para o primeiro pico de ressonância houve uma leve tendência de diminuição da frequência de ressonância conforme o aumento do dano. Já para o segundo pico, houve tendência de aumento da frequência de ressonância conforme o aumento do dano. Por fim, no terceiro pico, não houve mudanças significativas na frequência de ressonância, porém houve alteração do ganho, o que reflete na mudança de magnitude conforme o dano.

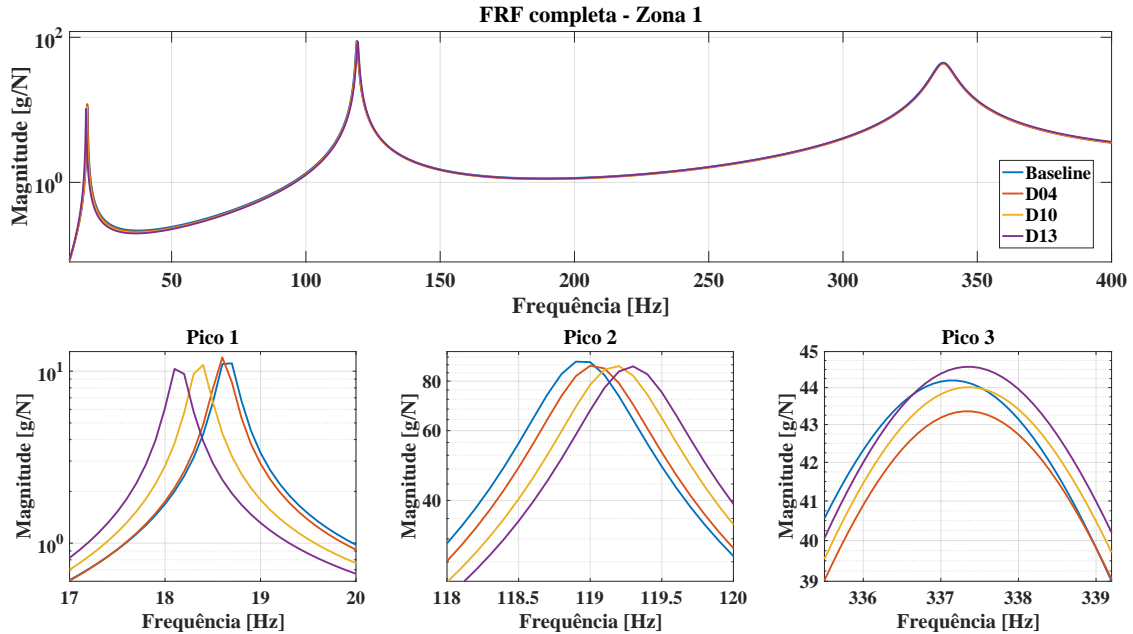


Figura 7. Comparação *baseline* e danos na zona 1

As FRFs para os danos localizados na zona 2 é mostrada na Fig. 8. Neste caso, nota-se que o primeiro pico não apresenta diferenças significativas na frequência de ressonância, apenas uma leve tendência de diminuição da frequência conforme o aumento do dano. No segundo pico, houve diminuição da frequência acompanhado por um leve aumento do ganho conforme aumento do dano. Por fim, no terceiro pico, houve aumento do ganho para todos os casos com dano e houve uma pequena diminuição da frequência de ressonância.

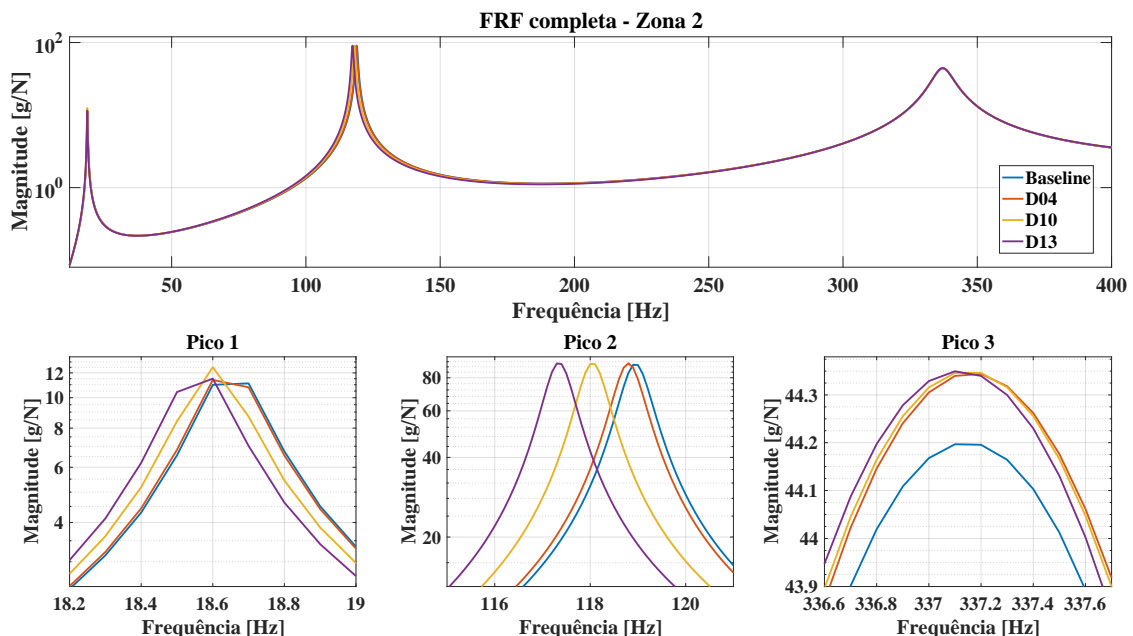


Figura 8. Comparação *baseline* e danos na zona 2

Os resultados dos danos localizados na zona 3 são apresentados na Fig. 9. Observa-se que no primeiro pico houve um pequeno aumento da frequência de ressonância acompanhado de aumento de magnitude. Entretanto, no segundo e terceiro pico houve diminuição significativa da frequência de ressonância conforme aumento do dano. Houve também um ligeiro aumento da magnitude em ambos os picos.

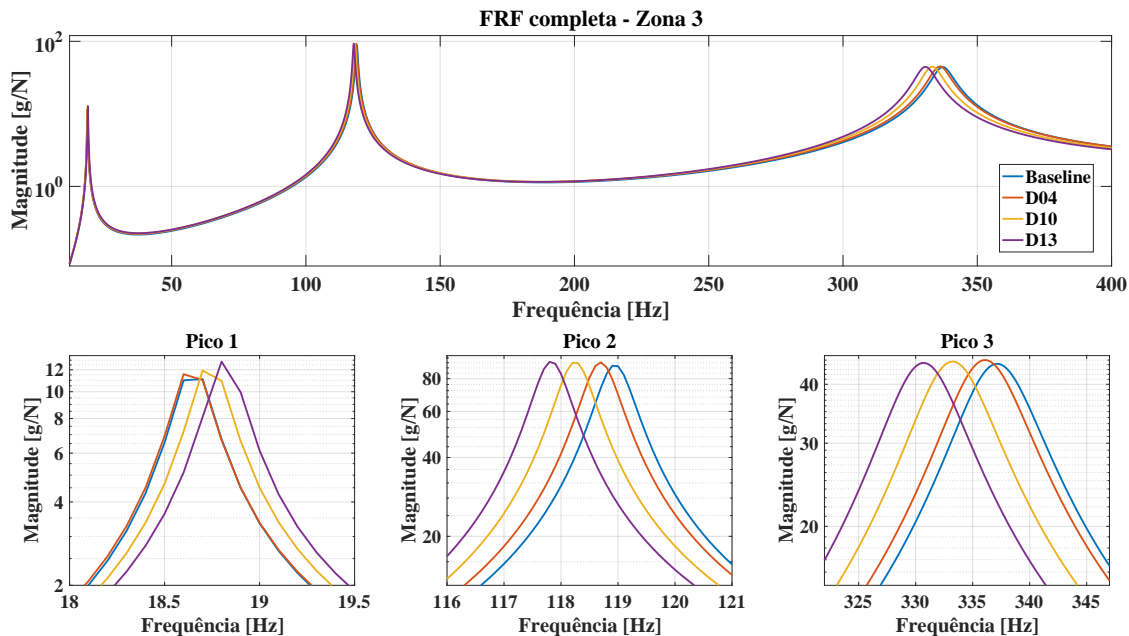


Figura 9. Comparação *baseline* e danos na zona 3

Após gerada todas as FRFs numéricas, foi utilizado o índice RMSD para quantificar a mudança de comportamento observada nos gráficos anteriores. Para melhor visualização, a Fig. 10 apresenta o valor do índice para cada intensidade de dano em cada zona da viga. Nota-se que os danos aplicados na zona mais próxima ao engaste (zona 1) apresenta os menores índices, mas que tendem a aumentar conforme aumento do dano. Já nas zonas mais distantes do engaste (zonas 2 e 3) é possível observar que a intensidade do dano influencia significativamente o comportamento da estrutura, principalmente a partir dos danos mais severos (D10 e D13).

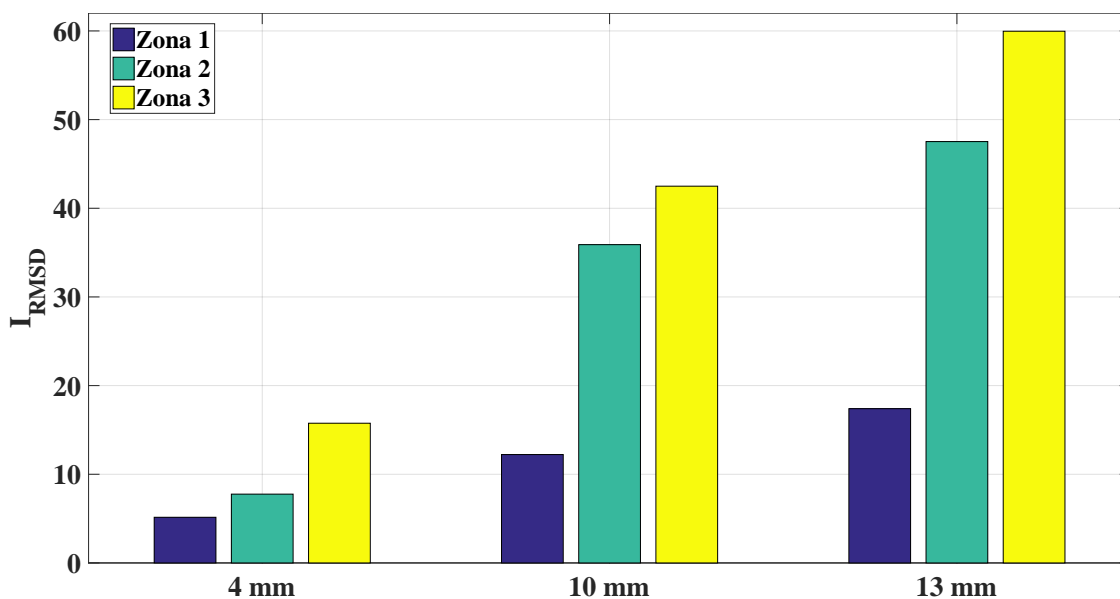


Figura 10. Comparação do Índice I_{RMSD} por zona

4. CONCLUSÕES

O monitoramento de danos em estruturas, com a técnica SHM baseada em vibrações, é muito utilizado para garantir a segurança e a manutenção de suas funcionalidades durante a vida em operação. No presente trabalho, utilizou-se uma viga engastada como estudo de caso para aplicar a técnica SHM baseada em vibrações via função de resposta em frequência (FRF). A partir da FRF experimental obtida via teste com martelo de impacto e acelerômetro, foi possível ajustar um modelo de elementos finitos para representar o comportamento dinâmico da estrutura. O modelo MEF apresentou um resultado semelhante ao experimental.

Após a calibração do modelo, simulações para obtenção de novas FRFs numéricas foram realizadas considerando-se danos no formato de furos com diâmetros de 4 [mm], 10 [mm] e 13 [mm] representando sua intensidade e distribuídos em três zonas da estrutura. As respostas do modelo de elementos finitos para cada um dos casos (intensidade e localização) foram obtidas e comparadas com a FRF ajustada do caso sem dano (*baseline*).

A comparação das FRFs permitiu avaliar o comportamento dos picos de ressonância em termos de sua magnitude e frequência. Para quantificar este comportamento foi calculado para cada caso o índice *Root-Mean-Square Deviation* (RMSD) o qual comparou a FRF da estrutura na condição saudável (*baseline*) e da estrutura em condições normais de operação (condição em que há dano).

Os resultados mostraram que o índice RMSD apresenta valores proporcionais com a intensidade do dano (quanto menor o dano menor o valor do índice obtido). Em termos da localização, danos mais próximos da região do engaste (zona 1) apresentaram índices menores quando comparados com os danos localizados em regiões mais afastadas do engaste (zonas 2 e 3).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo suporte e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bao, Y. and Li, H., 2021. "Machine learning paradigm for structural health monitoring". *Structural Health Monitoring*, pp. 1353–1372.
- Diao, Y., Men, X., Sun, Z., Guo, K. and Wang, Y., 2018. "Structural damage identification based on the transmissibility function and support vector machine". *Shock and Vibration*, Vol. 2018, p. ID 4892428.
- Fang, Y., Liu, X., Xing, J., Li, Z. and Zhang, Y., 2023. "Substructure damage identification based on sensitivity of power spectral density". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 545, p. 117451.
- Franco, V.R., 2009. *Monitoramento da integridade em estruturas aeronáuticas*. Master's thesis, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Iha Solteira, São Paulo.
- Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G.S., Hashim, K. and Yeboah, D., 2021. "Recent advancements in non-destructive testing techniques for structural health monitoring". *Applied Sciences*, Vol. 229, pp. 1–28.
- Lopes Jr, V., Park, G., Cudney, H.H. and Inman, D.J., 2000. "Impedance-based structural health monitoring with artificial neural network". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 206–214.
- Malekloo, A., Ozer, E., Alhamaydeh, M. and Girolami, M., 2022. "Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and highdimensional data source highlights". *Structural Health Monitoring*, pp. 1906–1955.
- McConnell, K. and Varoto, P., 2008. *Vibration Testing: Theory and Practice*. Wiley.
- Toh, G. and Park, J., 2020. "Review of vibration-based structural health monitoring using deep learning". *Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 1–24.
- Yang, Y., Zhang, Y. and Tan, X., 2021. "Review on vibration-based structural health monitoring techniques and technical codes". *Symmetry*, Vol. 13, pp. 1–18.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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