

Investigação de danos em uma placa 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

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br¹

¹ Universidade 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 placa metálica engastada e sua função de resposta em frequência coletada experimentalmente com teste via martelo de impacto e pastilhas piezoelétricas. Um modelo em elementos finitos (MEF) da placa 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 plate was used as a case study and its frequency response function was collected experimentally with testing via impact hammer and piezoelectric diaphragms. A finite element model (FEM) of the plate 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 transdutores piezoelétricos) 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 e transdutores piezoelétricos estrategicamente posicionados.

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 e transdutores, 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 placa metálica engastada foi utilizada como estudo de caso. A placa, em sua configuração inicial sem danos, foi testada e sua função resposta em frequência (FRF) obtida experimentalmente com teste via martelo de impacto e pastilhas piezoelétricas. Em seguida, um modelo em elementos finitos (MEF) da placa 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 placa engastada, em sua configuração sem dano, é esquematizado nas Fig. 1 e Fig. 2. O *setup* de teste foi montado no Laboratório de Projeto Integrado do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar e foi composto por uma placa com formato de uma chapa chata de alumínio comercial com dimensões da seção transversal de 150 x 1,5 [mm] e comprimento do trecho em balanço com 195 [mm]. A placa foi engastada com auxílio de duas chapas de aço 1020, fixas com parafusos M10 e com torque de 40 Nm em cada um, e por uma prensa pneumática com 3 toneladas de pressão, da marca *Marcon*, modelo MPH-30.

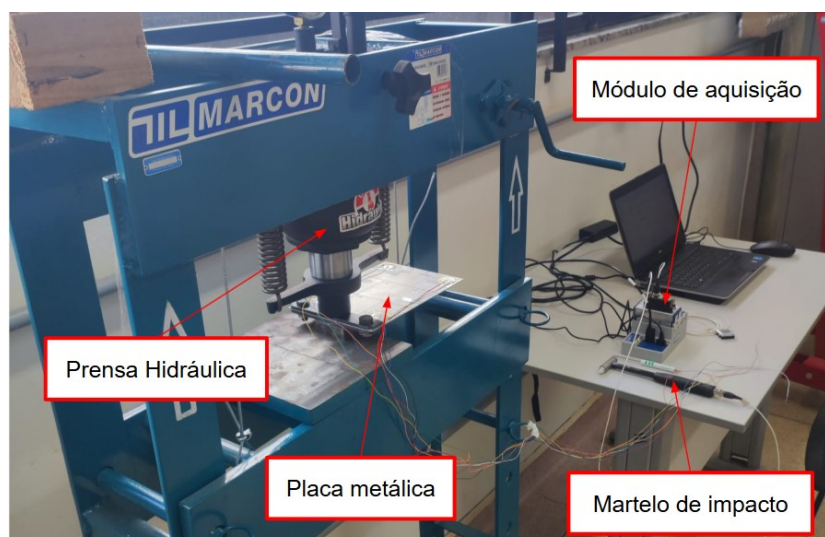


Figura 1. Configuração do teste experimental

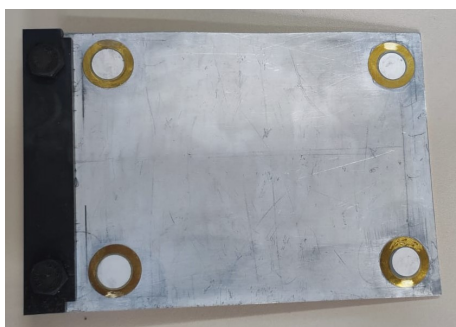


Figura 2. Distribuição das pastilhas piezoelétricas na placa

Para a excitação da placa, 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 foi medida por meio de 4 transdutores PZT de modelo 7BB-27-4 da marca *Murata*. Os dados de força e tensão elétrica foram coletados por uma placa de aquisição de dados da marca *National Instruments*, modelo NI-9201. A aquisição de dados foi feita a uma taxa de 12800 Hz com 38400 de amostras durante 3 segundos. A partir da força de entrada e da tensão elétrica 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 placa sem dano. A placa 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. Os transdutores PZT foram modelados utilizando elementos do tipo casca para o disco de latão e elementos sólidos de segunda ordem, denominados CHEXA20, para a região cerâmica, conforme a ilustrado na Fig. 3. 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*.

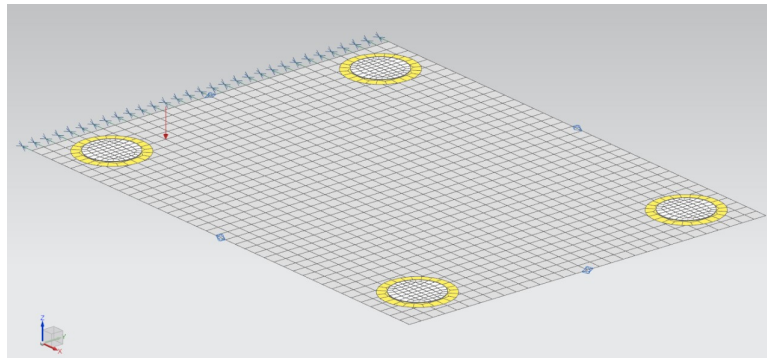


Figura 3. Malha do modelo de elementos finitos

Após a calibração do modelo de elementos finitos, novas simulações foram realizadas considerando danos com a adição de massa com 3 valores diferentes ($D1 = 4,756$ [g]; $D2 = 9,512$ [g]; $D3 = 14,268$ [g]), utilizando elementos 0D denominado CONM2 e elementos de conexões denominados RBE2 para representar a massa, distribuídos no centro de 3 zonas conforme esquematizado na Fig. 4. Para cada posição (zona) e intensidade (massa) do dano foi realizada uma simulação e obtida a sua FRF correspondente considerando sempre os mesmos pontos de excitação e de medição utilizados na geração da FRF de base do teste da placa sem dano.

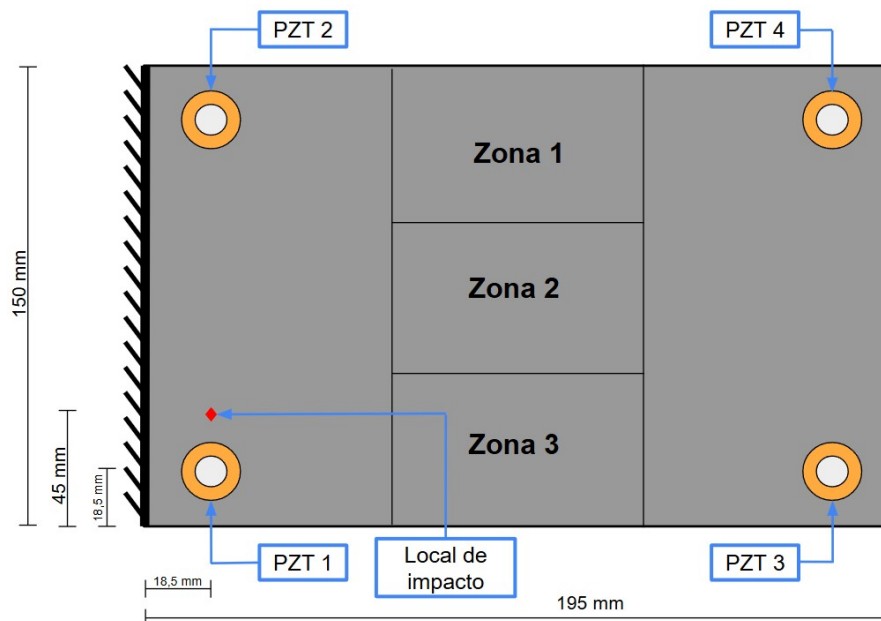


Figura 4. Detalhes das zonas e localização dos danos

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:

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

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

As FRFs experimentais da placa, obtida após o processamento dos sinais de força e tensão elétrica coletados, são apresentadas na Fig. 5. Pode-se observar os picos correspondentes as frequências naturais dos dois primeiros modos: o primeiro de flexão e o segundo, torção, para a faixa de frequência de 0 até 120 Hz considerada nas análises.

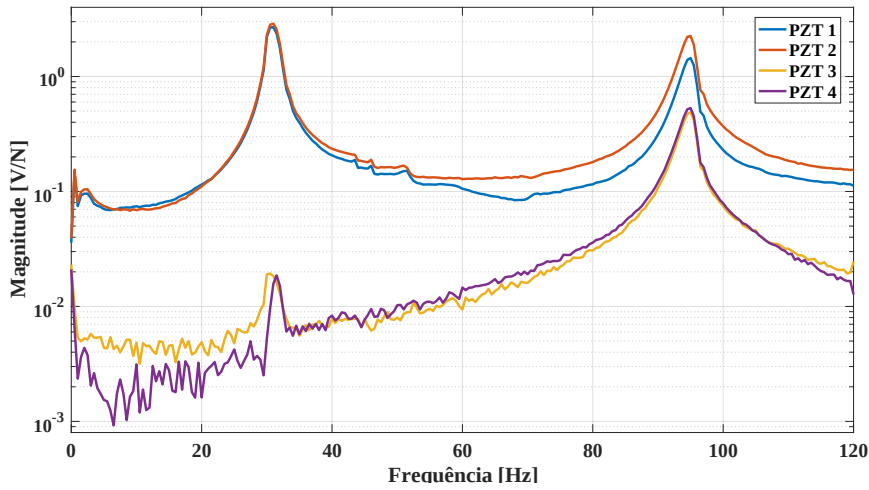


Figura 5. FRF experimental da placa engastada

Com a obtenção das FRFs experimentais, as FRFs do modelo de elementos finitos foram ajustadas alterando alguns parâmetro de rigidez do engaste e de amortecimento estrutural. A Fig. 6 mostra a comparação entre as FRFs experimentais 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.

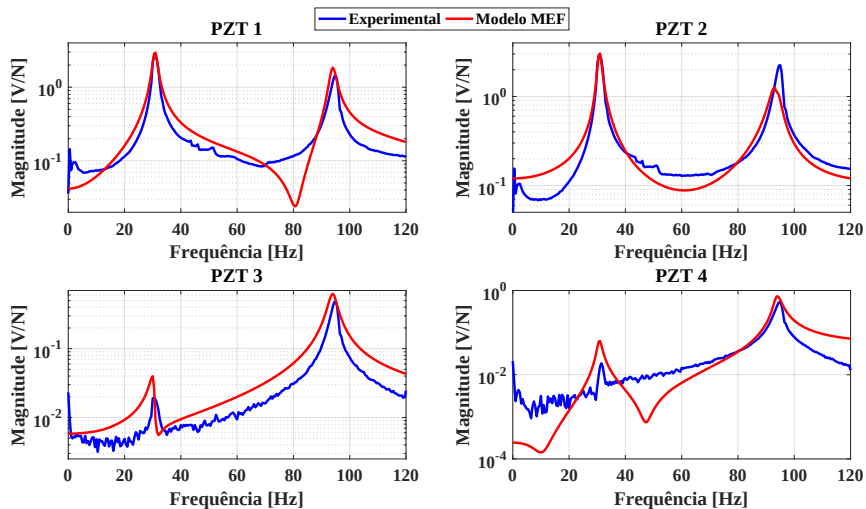


Figura 6. Comparação FRFs experimentais e modelo MEF

A partir do modelo ajustado (denominado de *baseline*) foram geradas as novas simulações da placa com os danos localizados nas zonas definidas na seção anterior. As Fig. 7 e Fig. 8 apresentam, com maior detalhe, as FRFs do modelo para dois picos distintos, comparando a condição *baseline* com três intensidades de dano, todos localizados na zona 1. No primeiro pico, observa-se que, em comparação à condição *baseline*, todas as FRFs dos casos com dano apresentam um deslocamento das frequências ressonantes para valores mais altos. No entanto, à medida que a severidade do dano aumenta, verifica-se uma tendência de redução dessas frequências. Além disso, para os PZTs 3 e 4, nota-se uma redução na magnitude da resposta. Quanto ao segundo pico, o dano D2 não ocasionou mudanças significativas na frequência, enquanto o D1 resultou em uma diminuição e o D3 em um aumento da frequência ressonante. Em alguns casos, também foram observadas alterações na magnitude das curvas, embora de forma menos expressiva.

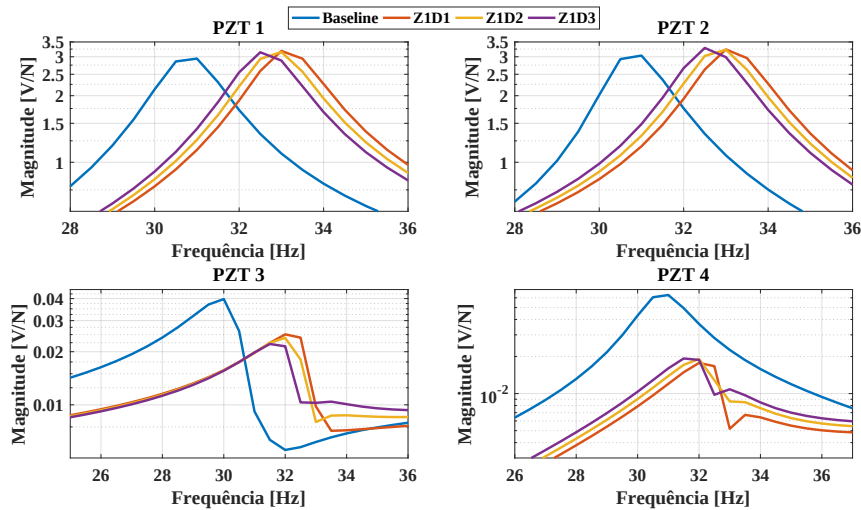


Figura 7. Comparação *baseline* e danos na zona 1 - primeiro pico

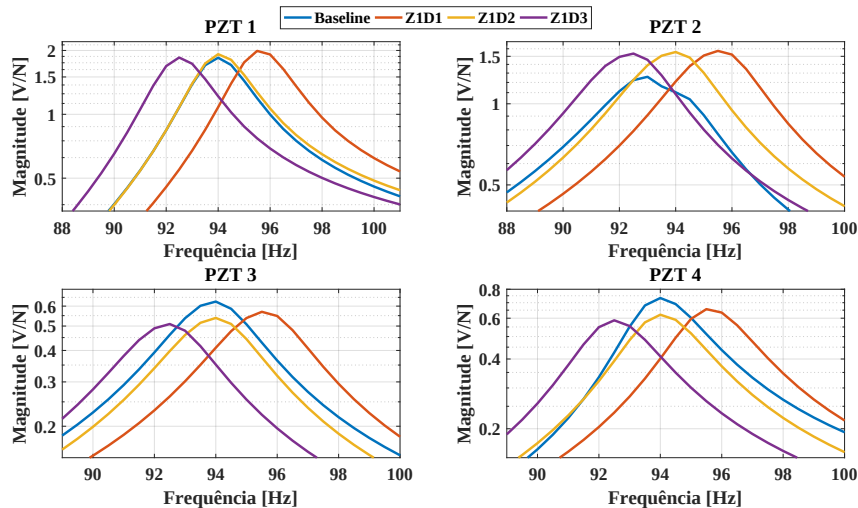


Figura 8. Comparação *baseline* e danos na zona 1 - segundo pico

As FRFs para os danos localizados na zona 2 são mostradas nas Fig. 9 e Fig. 10. Nesse caso, o comportamento das FRFs no primeiro pico foi semelhante ao observado na zona 1, apresentando o mesmo padrão de deslocamento inicial para frequências mais elevadas, seguido de uma tendência de redução com o aumento da severidade do dano, além de alterações discretas na magnitude da resposta em alguns transdutores. Já no segundo pico, a presença do dano resultou em um deslocamento das ressonâncias para valores mais altos; entretanto, não houve distinção entre as curvas com diferentes severidades, como evidenciado pela sobreposição das respostas.

Os resultados dos danos localizados na zona 3 são apresentados nas Fig. 11 e Fig. 12. Para o primeiro pico, observa-se novamente um comportamento semelhante ao registrado nas zonas 1 e 2: um deslocamento inicial das frequências ressonantes para valores mais elevados em relação à condição *baseline*, seguido de uma tendência de redução dessas frequências com o aumento da severidade do dano. Além disso, foram notadas alterações discretas na magnitude da resposta para alguns transdutores, mantendo o mesmo padrão observado anteriormente. Quanto ao segundo pico, o comportamento observado na zona 3 foi semelhante ao registrado na zona 1. O dano D2 não causou mudanças significativas

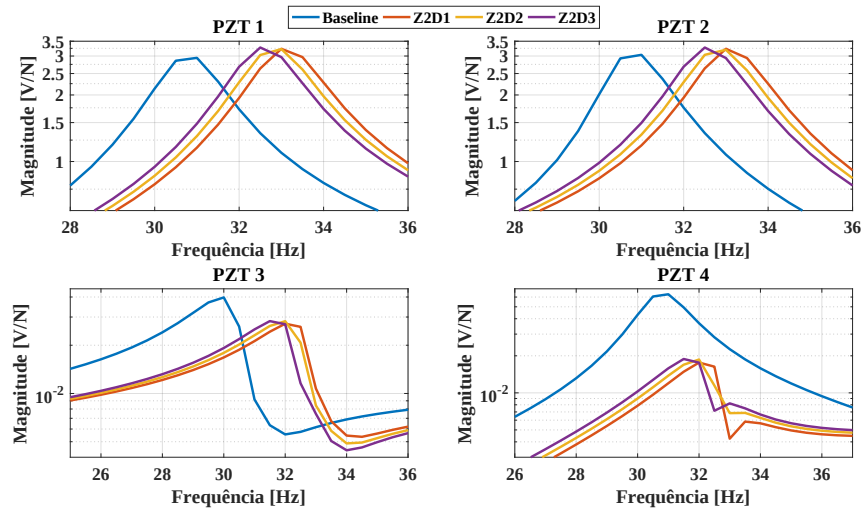


Figura 9. Comparação *baseline* e danos na zona 2 - primeiro pico

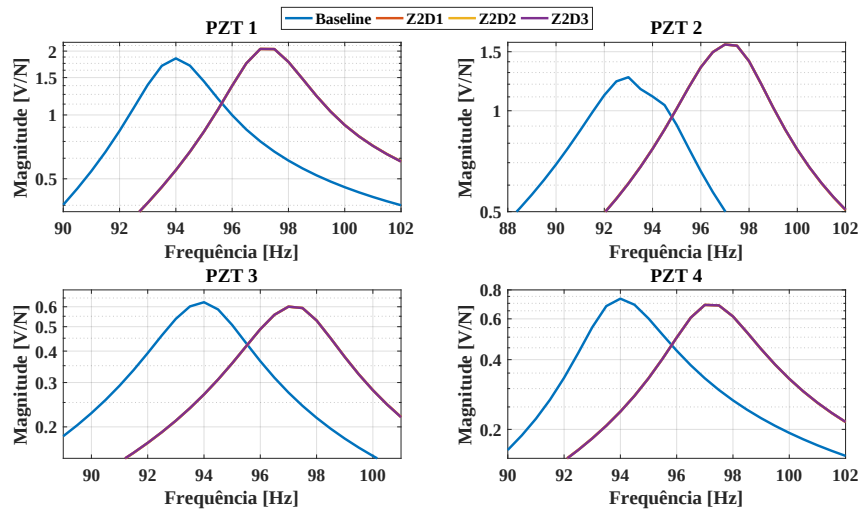


Figura 10. Comparação *baseline* e danos na zona 2 - segundo pico

na frequência, enquanto o dano D1 resultou em uma diminuição e o D3 causou um aumento na frequência ressonante. Em alguns casos, também foram observadas alterações na magnitude das curvas, embora de forma menos expressiva.

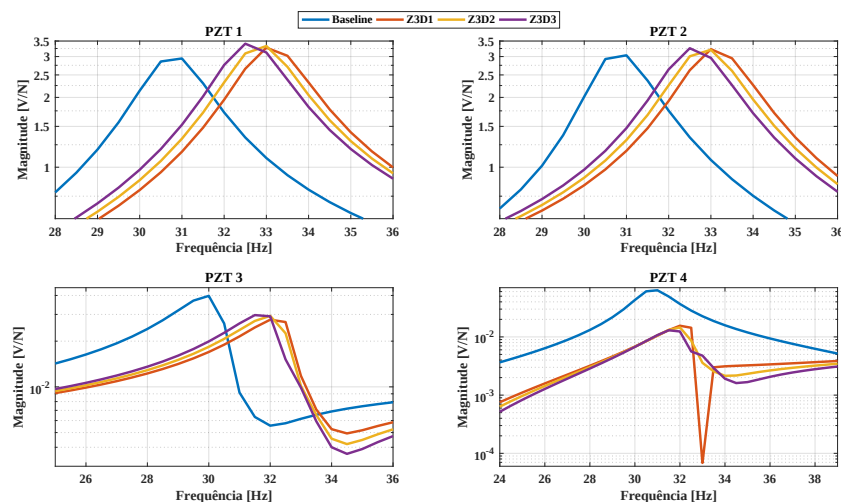


Figura 11. Comparação *baseline* e danos na zona 3 - primeiro pico

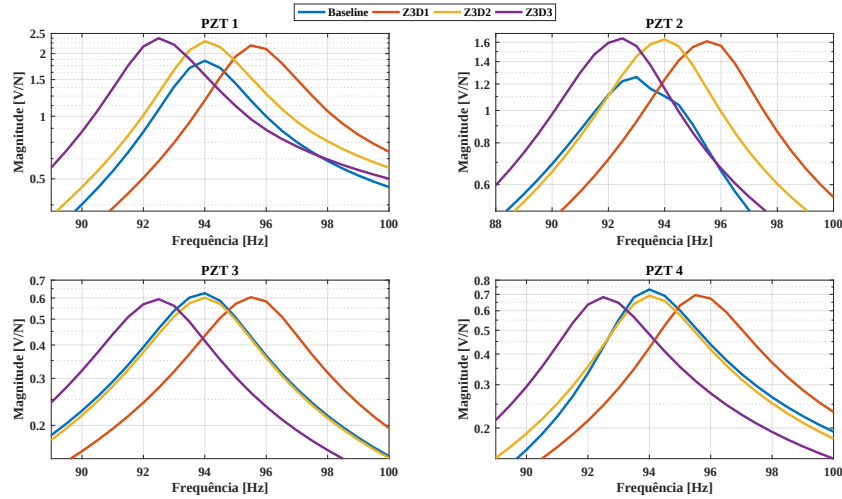


Figura 12. Comparação *baseline* e danos na zona 3 - segundo pico

A Fig. 13 apresenta os valores do índice RMSD obtidos para os sensores PZT 1 a PZT 4, considerando os danos D1, D2 e D3 aplicados nas zonas 1, 2 e 3 da estrutura. Para o PZT 1, os maiores valores do índice foram observados nos danos localizados na zona 2, enquanto os menores valores ocorreram para a zona 1. O PZT 2 apresentou índices elevados, com destaque para a zona 2, onde os três níveis de dano resultaram em valores altos e relativamente próximos entre si. No PZT 3, os índices foram similares entre as zonas, com ligeira predominância da zona 2. Já o PZT 4 apresentou os maiores valores globais do índice RMSD, principalmente para os danos na zona 1, com destaque para o dano D3. Em todos os transdutores, observam-se variações do índice conforme a severidade do dano.

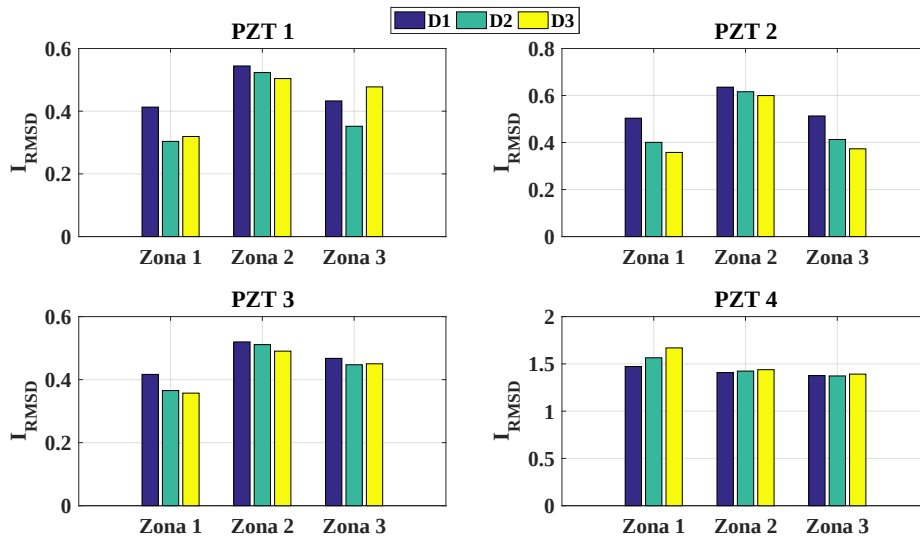


Figura 13. Comparação do Índice I_{RMSD} por zona

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 placa 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 pastilhas piezoelétricas, 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 com a adição de massa com valores de D1 = 4,756 [g], D2 = 9,512 [g] e D3 = 14,268 [g] 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 obtidos demonstram que o índice RMSD é eficaz na identificação da presença e severidade de danos estruturais, refletindo variações significativas conforme a intensidade e a localização dos danos. Observou-se que a Zona 2, por estar mais centralizada em relação aos PZTs e coincidir com regiões de maior amplitude modal nos modos mais baixos, gerou os maiores valores de em praticamente todos os transdutores. Além disso, os sensores mostraram respostas mais intensas aos danos mais próximos de sua posição: o PZT 1 apresentou valores elevados para a Zona 3, enquanto o PZT 2 reagiu de forma mais sensível aos danos na Zona 1. Os PZTs 3 e 4, posicionados na extremidade livre da estrutura, apresentaram respostas mais homogêneas entre as zonas, o que pode estar associado à sua menor exposição à flexão direta.

5. 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.
- 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.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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