



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

## ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL UTILIZANDO DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ONDAS GUIADAS

Leonardo do Prado Angelico, leonardoangelico@estudante.ufscar.br<sup>1</sup>

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br<sup>1</sup>

Anderson Antonio Ubices de Moraes, ubices@ufscar.br<sup>1</sup>

Vitor Ramos Franco, vrfranco@ufscar.br<sup>1</sup>

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

**Resumo.** Estrutura, seja desenvolvida na área da engenharia mecânica, civil, aeronáutica ou qualquer outra, fica submetida a esforços e ações das intempéries climáticas, que podem gerar danos. A avaliação periódica da integridade das estruturas é essencial para prevenir falhas que possam levar ao colapso. As técnicas de monitoramento da integridade estrutural (SHM, sigla do inglês Structural Health Monitoring) mostram-se eficientes para detectar, localizar e quantificar a falha de forma não destrutiva. Apesar de ser amplamente empregada, é importante considerar que a eficiência da técnica de SHM pode ser afetada pelas variações de temperatura. Neste trabalho verificou-se como a variação da temperatura afeta as diferentes configurações de ondas guiadas. As ondas guiadas foram geradas por um atuador piezelétrico, posicionado sobre uma placa de alumínio. Outros transdutores, também instalados sobre a placa, funcionaram como sensores, coletando os dados. Os experimentos foram desenvolvidos com todo o aparato experimental posicionado no interior de uma câmara projetada e construída para possibilitar variações de temperatura de 3 a 70 °C. Índices de dano, utilizados em diferentes configurações de ondas guiadas, mostraram que a temperatura influencia consideravelmente a eficiência na identificação do dano.

**Palavras chave:** Monitoramento estrutural, Placa de Alumínio, Material piezelétrico, Ondas guiada,. Temperatura.

**Abstract.** Any structure, whether developed in mechanical, civil, aeronautical, or any other engineering field, is subjected to the stresses and actions resulting from adverse weather conditions, which may cause damage. Periodic assessment of its integrity is essential to prevent failures that could lead to collapse. Structural Health Monitoring (SHM) techniques are efficient in detecting, locating, and quantifying failures in a nondestructive manner. Although widely used, it is important to consider that the efficiency of the SHM technique can be affected by temperature variations. In this study, we tested how temperature variation affects different guided wave configurations. In methodological terms, the guided waves were generated by a piezoelectric actuator placed on an aluminum plate. Other transducers installed on the board functioned as sensors and collected data. The experiments were conducted with the entire experimental apparatus positioned inside a chamber designed to allow temperature variations from 3 °C to 70 °C. Damage Indices used in different guided wave configurations showed that temperature significantly affects the damage identification.

**Keywords:** Structural Health Monitoring, Aluminum plate, Piezoelectric material, Guided Waves, Temperature.

### 1. INTRODUÇÃO

A detecção de danos em estruturas pode ser realizada pela técnica de monitoramento da integridade estrutural (SHM, sigla do inglês *Structural Health Monitoring*). Nesta técnica, dano é entendido como uma alteração do material ou da propriedade geométrica do sistema, incluindo: trincas, delaminações, alterações do contorno, acréscimo de material, ou seja, qualquer alteração que possa afetar a performance futura da estrutura. Por não inutilizar a estrutura após os experimentos é considerada uma técnica não destrutiva (Han *et al.*, 2021). Esta característica da técnica SHM permite sua aplicação em diferentes momentos, em uma mesma estrutura, quando o teste for recomendado. Segundo Rosa (2016) a técnica é de baixo custo e de aplicação rápida (demanda de tempo reduzida) e pode avaliar estruturas que estão em operação. Estas características da técnica SHM potencializaram sua aplicação nos últimos anos, conforme observado pela quantidade de artigos recentes que estão sendo publicados na área (Lai *et al.*, 2023; Rehman *et al.*, 2024; Kamali *et al.*, 2024).

A metodologia utilizada ao aplicar as técnicas SHM comumente segue as seguintes etapas: aquisição, validação e análise de dados técnicos. O objetivo é sempre o de facilitar e/ou aprimorar a tomada de decisão quanto a necessidade de

manutenção das estruturas avaliadas (Hall, 1999). As premissas adotadas em SHM são as alterações das propriedades físicas do sistema como, por exemplo, alteração da rigidez causada pelos danos. Para identificar um dano confrontam-se dados de experimentos realizados em condições sem danos, e em situações desconhecidas, podendo haver um dano ou não. As diferenças observadas podem indicar a existência ou não de um dano na estrutura.

De forma geral, os sistemas de SHM podem ser classificados em dois grupos: passivos e ativos. Os sistemas ativos realizam a excitação e sensoriamento da estrutura, sendo necessário utilizar atuadores e sensores. Ao se utilizar as técnicas de SHM de forma ativa é possível detectar, estimar as dimensões e localizar danos estruturais (Franco, 2009).

Dentre os sistemas ativos, existem diversas formas de excitar e fazer a aquisição de dados: mudanças nas formas modais, métodos baseados em FRFs (Função de Resposta em Frequência), utilização de vibrações, métodos baseados no domínio do tempo e da frequência e métodos baseados na impedância elétrica. Segundo Deng (2019), o método da propagação de ondas é o mais utilizado para o monitoramento de estruturas devido a sua eficiência relacionada às características de propagação das ondas.

Entretanto, a detecção de danos, utilizando técnicas de SHM, pode, em algumas situações, ficar comprometida devido as incertezas advindas das diferentes condições ambientais, como, por exemplo, as variações de temperatura e umidade que a estrutura experimenta nas medidas realizadas em diferentes momentos.

Neste contexto, este trabalho busca compreender, por meio de testes experimentais, como as variações de temperatura podem impactar nos resultados obtidos utilizando-se diferentes tipos de ondas guiadas aplicadas no monitoramento estrutural. Para isso, uma câmara com controle e monitoramento interno de temperatura foi projetada e construída, possibilitando que o monitoramento de uma estrutura formada por uma placa de alumínio fosse realizado em um intervalo de temperatura de 3 °C até 70 °C. Sobre a placa de alumínio, foram posicionadas pastilhas piezelétricas para enviar e realizar o sensoriamento de ondas na superfície da placa. Algoritmos para a aquisição e processamento dos dados foram confeccionados utilizando-se de softwares de engenharia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os experimentos propostos, foi necessário projetar e construir equipamentos e protótipos, além de criar a configuração necessária para que o monitoramento seja realizado. Sendo assim, este tópico aborda a construção da câmara responsável pelo controle da temperatura interna, a configuração experimental utilizada para gerar e sensoriar as ondas guiadas, o formato das ondas, os parâmetros utilizados no monitoramento e por último, os índices utilizados para detecção dos danos.

### 2.1. Câmara para controle de temperatura

A câmara utilizada para controle da temperatura foi manufatura utilizando chapas de MDF de 8 mm (nas paredes), isolante térmico, controlador de temperatura, pastilhas Peltier, lâmpada de aquecimento e dissipadores de calor, e a configuração é apresentada na Fig. 1.

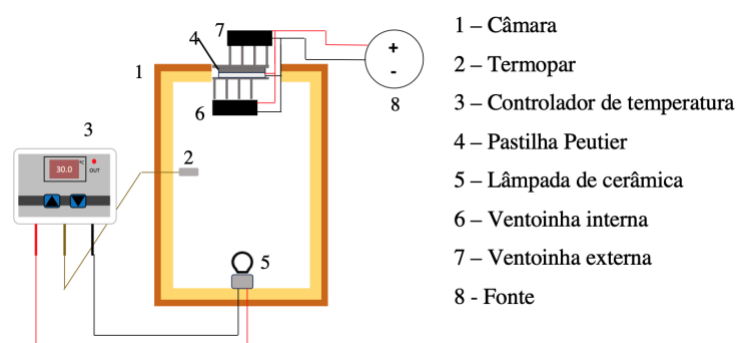


Figura 1. Configuração esquemática da câmara utilizada para controle de temperatura

Para realizar o isolamento, utilizou-se de uma manta de lã de vidro com espessura de aproximadamente 50 mm. Este material isolante foi, então, fixado nas paredes internas da caixa de MDF com cola de contato.

Para facilitar o resfriamento no interior da câmara, foram empregadas duas pastilhas Peltier de 70W cada posicionadas em uma abertura localizada na parte superior da câmara. As pastilhas foram “assentadas” sobre um dissipador de calor construído em alumínio e fixado no interior da câmara. Utilizou-se pasta térmica entre as pastilhas e o dissipador para facilitar a troca de calor. Além disso, foram utilizadas ventoinhas internas para melhorar a transferência de calor.

Para realizar o aquecimento interno da câmara, utilizou-se uma lâmpada de cerâmica de 100 W, do fabricante Fuxin, localizada na parte inferior da câmara a fim de atingir o regime permanente em menor tempo.

Um controlador de temperatura digital, modelo DM-W3001 foi utilizado para monitorar e controlar a temperatura interna da câmara. A escolha do controlador se deve a disponibilidade no mercado, baixo custo e simplicidade na programação. O controlador utiliza um termopar, que foi posicionado no interior da câmara, para medir as temperaturas e, assim, realizar o controle.

O sistema de aquecimento (lâmpada de cerâmica) foi acoplado ao controlador de temperatura que, com seu relé interno, atuou controlando o tempo de funcionamento da lâmpada e, conseqüentemente, a temperatura interna da câmara.

Para alimentar o sistema de resfriamento, utilizou-se uma fonte de 120 A e 12,5V da marca Spark. A escolha da fonte ocorreu devido a tensão requerida no sistema (12V) e a corrente necessária para alimentar o conjunto constituído por pastilhas Peltier e ventoinhas.

A câmara de controle de temperatura, depois de construída, é apresentada na Fig. 2.



Figura 2. Câmera de controle de temperatura utilizada nos experimentos

## 2.2. Configuração experimental para monitoramento

Para realizar o monitoramento estrutural, um protótipo formado por uma placa retangular (150 mm x 200 mm) de alumínio, sobre a qual foram posicionadas cinco pastilhas piezelétricas, constituídas de cerâmica PZT, foi mantido no interior da câmara de aquecimento e controle de temperatura. Para realizar a aquisição dos dados, foi utilizada uma placa de aquisição de sinais conectada a um notebook, no qual se realiza a análise e o processamento dos sinais utilizando-se de softwares específicos. A configuração experimental para monitoramento é apresentada na Fig. 3.

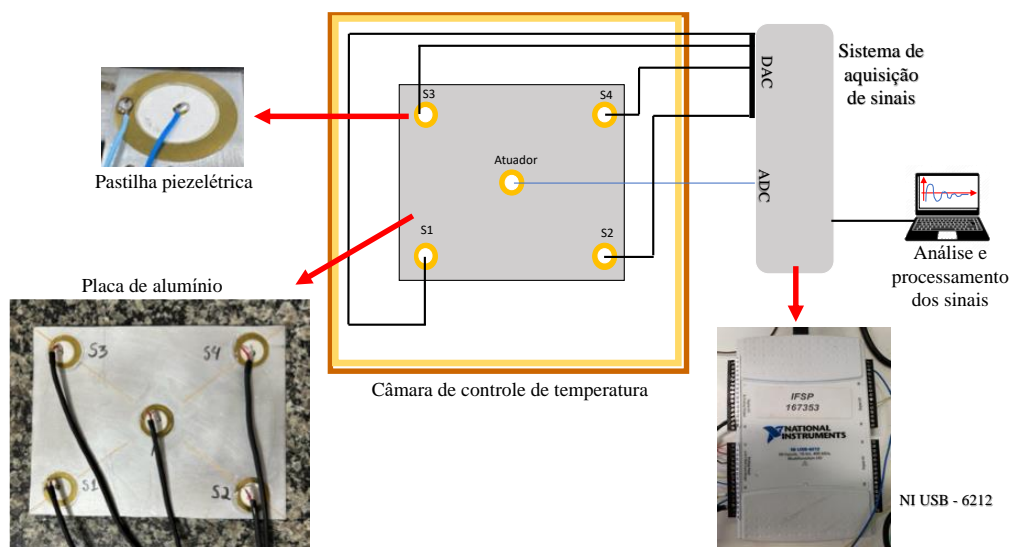


Figura 3. Configuração experimental utilizada no monitoramento de danos na estrutura

Conforme apresentado na Fig. 3, cinco pastilhas piezelétricas foram rigidamente acopladas na superfície da placa, sendo que a pastilha localizada no “centro” é utilizada como atuador, enviando as ondas guiadas na superfície da placa, as outras pastilhas (próximas aos cantos, e identificadas como S1, S2, S3 e S4) foram utilizadas como sensores.

Para a geração e sensoriamento das ondas, foi utilizada uma placa de aquisição de sinais fabricada pela National Instruments, modelo NI USB-6212, capaz tanto de enviar, quanto de medir os sinais relativos às ondas propagadas pela estrutura. Um algoritmo responsável pelo envio e coleta de dados foi confeccionado utilizando-se o software LabView® e o processamento dos sinais foi realizado por meio de um algoritmo confeccionado utilizando-se o software MatLab®.

### 2.3. Formato das ondas utilizadas

As ondas guiadas são amplamente utilizadas nas técnicas de SHM devido à sua capacidade de viajar por longas distâncias com perdas energéticas mínimas e de se propagarem em estruturas com curvaturas. Essas ondas se propagam entre os contornos do sólido, o que lhes confere propriedades vantajosas para diversos tipos de estruturas (Giurgiutiu, 2007).

A teoria de propagação de ondas em estruturas apresenta basicamente dois modos de vibração, longitudinais ou planas e transversais ou cisalhamento. Nas ondas longitudinais, as partículas oscilam paralelamente ao sentido de propagação da energia. Por outro lado, nas ondas transversais, as partículas oscilam perpendicularmente ao sentido que a energia se propaga (Franco, 2009).

As ondas guiadas se propagam por meio de dois mecanismos simultâneos: a flexão dos contornos e a reflexão das ondas longitudinais. Esse fenômeno permite a detecção de danos geométricos e variações de massa, bem como a identificação de defeitos com uma ampla gama de dimensões. Quando as ondas se deparam com um dano, ocorre uma alteração no modo de vibração e reflexão, resultando em uma mudança na direção de propagação. Ao comparar os dados captados pelos sensores, é possível detectar, quantificar e localizar os danos (Guan et al., 2017).

Na criação dessas ondas, diversos são os sinais que podem ser utilizados para excitar a estrutura. Segundo Franco (2009), alguns sinais que podem ser utilizados são o sinal senoidal, senoidal janelado (comumente utilizada a janela Hanning) e senoidal com frequência variável (Chirp), cujos formatos são apresentados na Fig. 4. A utilização de cada um dessas ondas depende das características da estrutura a ser monitorada. No presente trabalho, as três formas de onda apresentadas serão utilizadas.

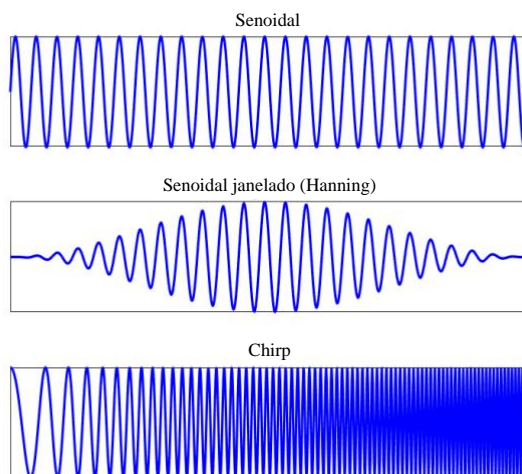


Figura 4. Tipos de ondas guiadas utilizadas para excitar a estrutura

### 2.4. Parâmetros utilizados no monitoramento

Conforme foi descrito, para realizar os experimentos de SHM, utilizou-se uma placa de aquisição de sinais fabricada pela National Instruments. O controle da placa de aquisição foi realizado por um algoritmo desenvolvido em LabView®, no qual são inseridos os parâmetros de excitação (frequência, amplitude e quantidades de iterações) e da aquisição dos dados (taxa de amostragem, número de amostras e quantidade de iterações). O algoritmo também realiza a média de 10 iterações consecutivas e salva os dados em um arquivo de texto. Além dos dados numéricos, o software apresenta, em tempo real, gráficos da excitação e das medições. Dessa forma, é possível analisar tanto os dados de forma numérica quanto de forma qualitativa.

De posse do algoritmo de geração e aquisição de sinais, insere-se a estrutura a ser monitorada no interior da câmara para início dos testes, os quais foram realizados em 8 temperaturas diferentes. Inicialmente a temperatura no interior da câmara foi reduzida até 3 °C, utilizando o sistema de resfriamento das pastilhas Peltier. Essa temperatura foi o limite mínimo que o sistema conseguiu atingir. Mantendo o sistema de resfriamento ligado, iniciou-se o aquecimento, utilizando a lâmpada de cerâmica, até atingir a temperatura de 10 °C. A temperatura no interior da câmara foi controlada a partir de uma rampa de aquecimento programada no controlador digital. O sistema de controle manteve oscilações de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$  em torno da temperatura desejada. Ao atingir a temperatura estabelecida, com o objetivo de o protótipo atingir o

equilíbrio térmico no interior da câmara, aguardou-se uma hora para iniciar os testes de monitoramento. O processo foi repetido, a cada 10°C, até atingir a temperatura máxima de 70°C, obtendo-se, assim, 8 diferentes temperaturas.

Para cada uma das temperaturas apresentadas, primeiramente, realizaram-se os testes na estrutura sem qualquer dano, obtendo-se os sinais de referência para a estrutura saudável (chamados de sinais *baseline*). Em seguida, para checar a repetibilidade dos resultados, realizam-se testes ainda sem qualquer dano na estrutura. Por fim, foram realizados testes em uma condição na qual danos estruturais foram adicionados na estrutura. Estes danos constam da adição de massas de 3 g (ímãs de neodímio) localizadas entre o atuador e cada um dos sensores. Os danos serão mantidos no mesmo local ao longo de todos os experimentos. Dessa forma, garante-se que as variações observadas nos diferentes experimentos sejam provenientes essencialmente das variações da temperatura e de eventuais interferências externas.

Para a detecção do dano, utilizaram-se índices de danos, os quais, neste trabalho, são computados utilizando-se das Funções de Resposta em Frequência (FRF) obtidas para cada condição de teste.

Vale ressaltar que todos os testes foram realizados considerando-se os três tipos de ondas apresentadas. Para determinar os parâmetros de excitação de cada onda a ser utilizada neste trabalho, realizaram-se diversos testes iniciais com o intuito de encontrar os parâmetros que permitissem identificar os danos a temperatura ambiente. Sendo assim, os parâmetros utilizados em cada tipo de onda estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos experimentos

Parâmetro	Onda guiada		
	Senoidal	Senoidal Janelado	Chirp
Frequência de excitação [kHz]	3	3	---
Frequência inicial [kHz]	---	---	0,1
Frequência final [kHz]	---	---	5
Frequência de amostragem [kHz]	30	30	20
Número de amostras	3000	3000	1000
Amplitude [V]	5	5	5

Devido a particularidades do algoritmo utilizado e das limitações de processamento da placa de aquisição de dados, não foi possível trabalhar com taxas de aquisição de dados superiores. Uma vez que o trabalho utiliza quatro sensores, a capacidade de processamento da placa de aquisição é dividida entre os canais em que há sensores conectados, diminuindo a capacidade de se adquirir dados nas mais altas frequências da placa (taxa máxima da placa é de 420 kHz).

## 2.5. Índices de danos

A fim de detectar a presença ou não de um dano na estrutura, alguns índices são utilizados. Vale ressaltar, neste caso, a importância de se utilizar mais de um índice, a fim de se evitar falso diagnóstico, visto que os danos possuem diferentes sensibilidades na detecção. Neste trabalho, três diferentes índices foram utilizados e suas características são, brevemente, apresentados a seguir.

- *Root-Mean Square Deviation (RMSD)*

De acordo com Yu *et al.* (2011), O RMSD é um indicador estatístico altamente eficaz na detecção de alterações em uma estrutura, como aquelas causadas por danos. O valor do RMSD deve ser interpretado como o desvio médio entre os dados atuais e os dados previamente medidos. Quanto maior for o valor retornado pelo método, maior é a alteração na amplitude e na fase da onda, ou seja, maior é a influência do dano.

O índice  $I_{RMSD}$  pode ser obtido pela Eq. 1, na qual  $n$  é o número de amostras do sinal,  $G$  representa a FRF, medida na condição sem dano (subíndice *SD*) e em uma condição desconhecida (subíndice *CD*), podendo ou não conter o dano.

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

- *Índice Baseado na norma  $H_2$*

Para caracterizar um sistema, pode-se utilizar a norma  $H_2$ . O seu valor numérico, para um sistema SISO (*Single Input Single Output*), corresponde a área abaixo da curva da Função de Resposta em Frequência (FRF), numericamente calculada utilizando-se o método trapezoidal (Franco, 2009). Para determinação do índice baseado na norma  $H_2$ , é necessário encontrar a norma  $\|G\|_2^2$  para a situação em análise (condição desconhecida), denominada  $\|G_{CD}\|_2^2$ , e para o sinal *baseline*, denominado  $\|G_{SF}\|_2^2$ . Dessa forma, pode-se calcular o índice de dano  $I_{H_2}$  a partir da ponderação entre a diferença dos valores obtidos, conforme Eq. 2.

$$I_{H2} = \frac{||G_{SF}||_2^2 - |G_{CD1}|_2^2}{||G_{SF}||_2^2} \quad (2)$$

- *Correlation Coefficient Deviation Mean (CCDM)*

Outra possibilidade de identificar a presença de danos, é utilizando o índice da média de desvio do coeficiente de correlação,  $I_{CCDM}$ , definido na Eq. 3. Este índice indica se os dados analisados (dados com e sem danos) estão correlacionados ou não. Caso haja correlação, pode-se concluir que a probabilidade da existência de danos na estrutura analisada é pequena.

$$I_{CCDM} = 1 - \rho = 1 - \frac{1}{n-1} \frac{\sum (Z_{i,1} - Z_i)(Z_{i,2} - Z_2)}{S_{Z_1} - S_{z_2}} \quad (3)$$

Na Equação 3,  $\rho$  representa o coeficiente de correlação,  $n$  é o número de pontos da amostra,  $Z$  o módulo da FRF e  $S$  o desvio padrão. Considerando que  $\rho$  indica a relação entre os valores medidos e o *baseline*, quanto maior for seu valor, maior é a diferença entre os parâmetros e menor será o índice, indicando a possibilidade de haver um dano na estrutura analisada (Marqui, 2007).

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Os testes experimentais descritos anteriormente foram realizados para cada uma das 8 temperaturas e 3 ondas guiadas analisadas. Para cada sinal obtido por cada um dos 4 sensores, foram obtidas as FRFs utilizando-se estimadores espectrais (no software MatLab®). Sendo assim, é possível calcular os índices de danos tanto para a estrutura sem dano quanto para a estrutura com os danos simulados pela adição de massa.

Os resultados dos testes de monitoramento serão apresentados separadamente para cada tipo de onda guiada utilizada. Primeiramente, os dados do monitoramento realizado utilizando-se a onda senoidal são apresentados na Fig. (5).

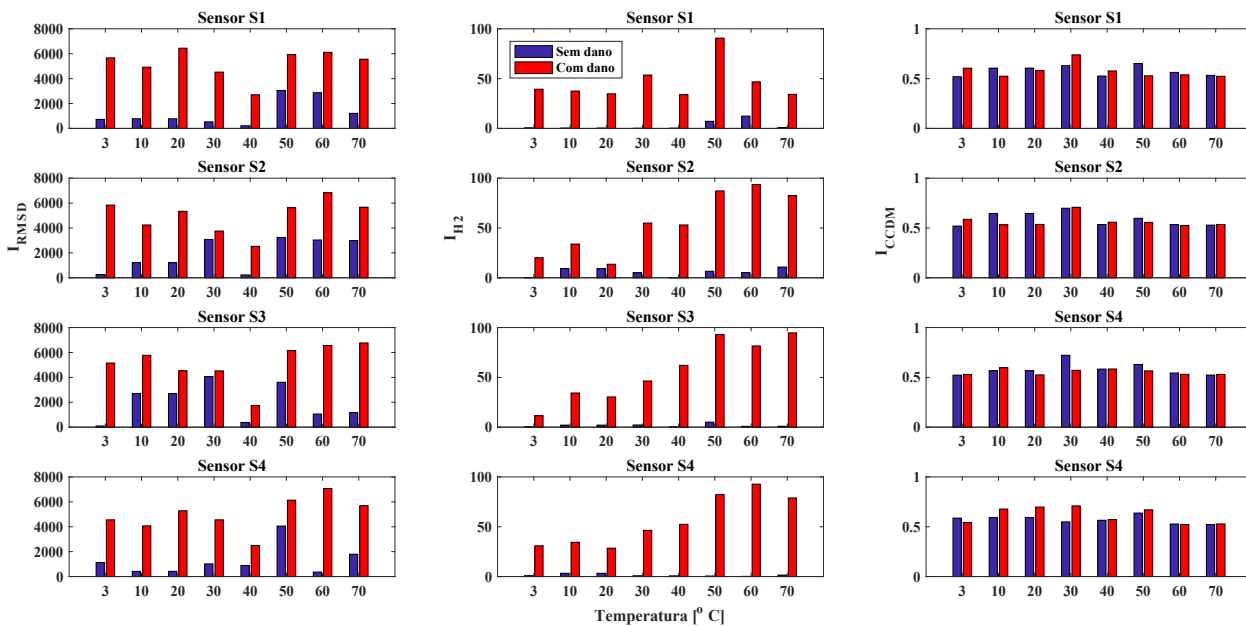


Figura 5. Índices de dano calculados para cada temperatura – monitoramento via onda senoidal

Pela observação da Fig. 5, é possível notar que, para os índices  $I_{RMSD}$  e  $I_{H2}$ , os índices para a situação com dano se apresentam maiores para todas as temperaturas, indicando que não houveram falsos diagnósticos. Para o caso do índice  $I_{RMSD}$ , alguns índices na condição sem dano apresentaram valores altos em algumas situações, sendo necessária a criação de um valor limite acima do qual pode-se diagnosticar o dano (valor *threshold*). Para o caso do índice  $I_{H2}$ , os valores com e sem dano apresentaram a maior discrepância, mostrando claramente a influência do dano na estrutura. Para o caso do índice  $I_{CCDM}$ , é possível notar que, alguns casos com dano apresentaram índices menores, indicando falso diagnóstico. Além disso, para este índice, não é possível diferenciar as condições, ou seja, não é possível detectar a presença do dano.

De uma maneira geral, para o caso de onda senoidal, o índice  $I_{H2}$  mostrou ser a melhor opção entre as apresentadas. Além disso, foi possível notar que a temperatura possui influência nos valores dos índices, mas não foi possível identificar uma tendência na variação dos índices.



Os dados do monitoramento realizado utilizando-se a onda senoidal janelado são apresentados na Fig. (6).

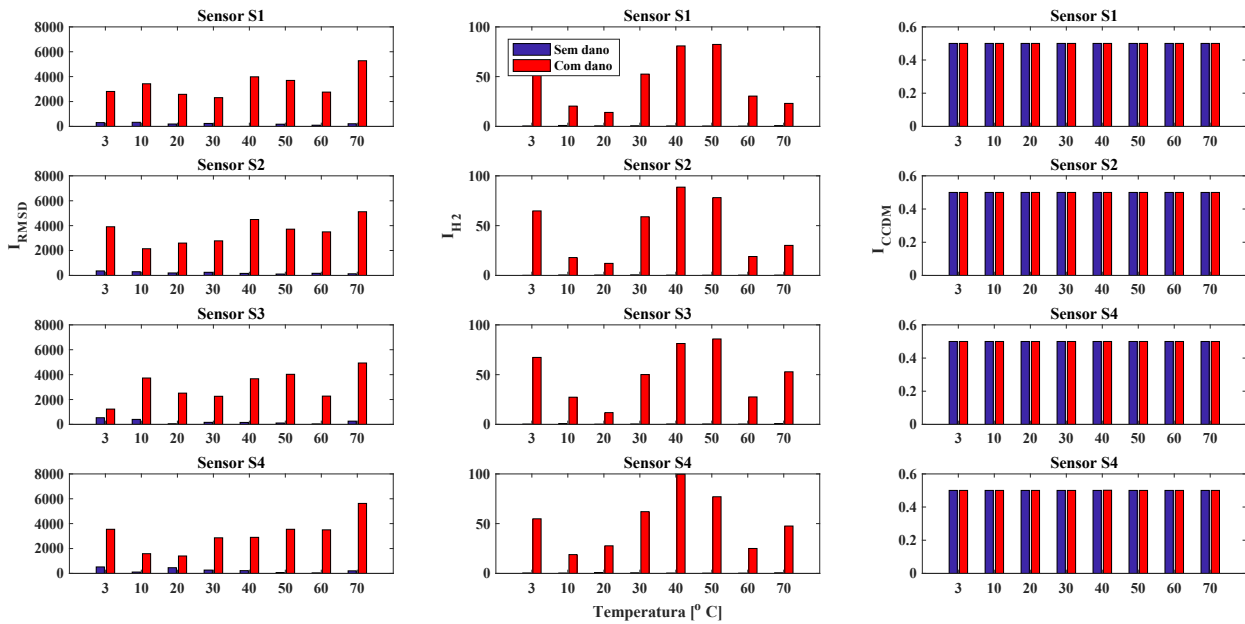


Figura 6. Índices de dano calculados para cada temperatura – monitoramento via onda senoidal janelado

Pela observação da Fig. 6, é possível notar que os índices  $I_{RMSD}$  e  $I_{H2}$  foram capazes de identificar o dano sem qualquer falso diagnóstico. Nota-se também que, dessa vez, houve uma maior diferença entre os valores com o sem dano para estes índices, indicando ser um tipo de onda mais adequado do que o senoidal puro. Para o caso do índice  $I_{CCDM}$ , não foi possível identificar o dano. De uma maneira geral, para o caso de onda senoidal janelado, apesar do índice  $I_{RMSD}$  apresentar bons resultados, o índice  $I_{H2}$  mostrou ser a melhor opção entre as apresentadas, sendo os valores na condição sem dano quase nulos. Além disso, foi possível notar que a temperatura possui influência nos valores dos índices, possuindo maior influência na temperatura mais baixa, na mais alta e na faixa de 40 a 50 °C.

Por fim, os dados do monitoramento realizado utilizando-se a onda Chirp são apresentados na Fig. 7.

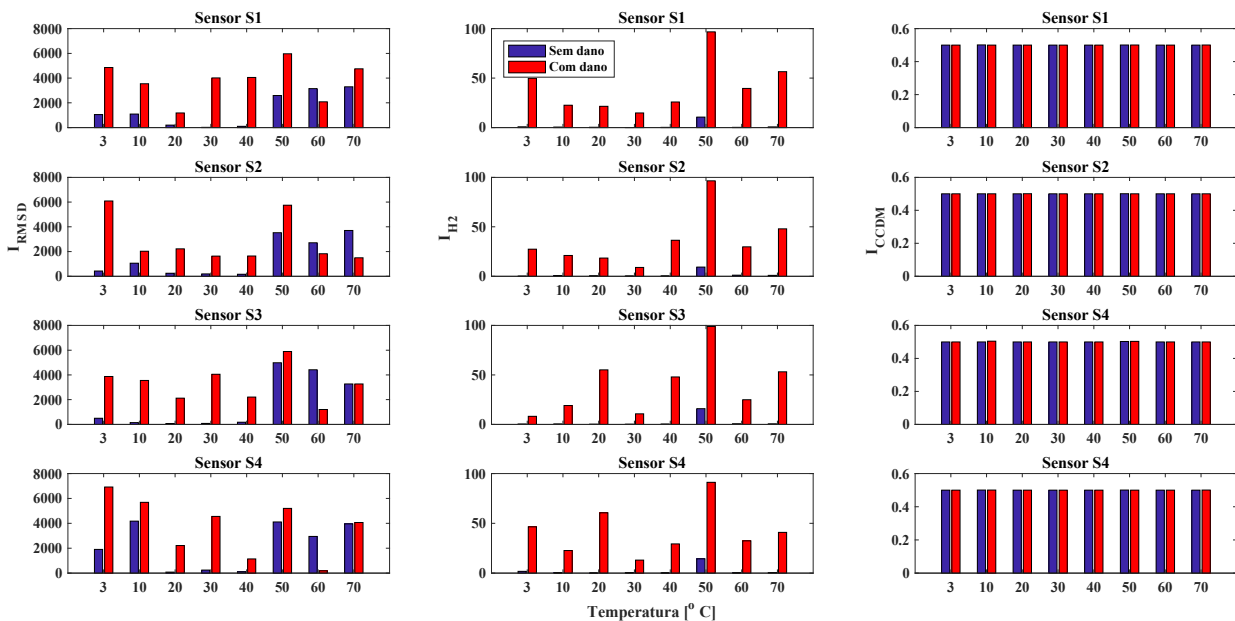


Figura 7. Índices de dano calculados para cada temperatura – monitoramento via onda Chirp

Pela observação da Fig. 7, é possível notar que o índice  $I_{RMSD}$  apresentou falso diagnóstico, o índice  $I_{CCDM}$  não foi capaz de identificar o dano na estrutura e que o índice  $I_{H2}$  apresentou os melhores resultados. Para este caso de onda, nota-

se que os maiores índices foram obtidos para temperatura próxima de 50 °C, tanto para a condição com dano quanto para a condição sem dano.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que:

para o intervalo de temperatura de 3 °C a 70 °C, o índice  $I_{CCDM}$  não foi eficiente na detecção dos danos na estrutura analisada, independentemente do tipo de onda utilizada;

- o índice  $I_{RMSD}$  mostrou-se capaz de detectar danos em praticamente toda faixa de temperatura analisada e para todas as formas de onda (salvo algumas exceções para a onda Chirp). Observou-se que os melhores resultados foram apresentados para a onda na forma senoidal janelado;
- dentre os 3 índices analisados, o índice  $I_{H2}$  mostrou-se o mais eficiente na detecção de danos, sendo capaz de detectar o dano em todas as temperaturas e ondas analisadas;
- dentre as 3 formas de onda analisadas, a onda senoidal janelado foi a que apresentou melhores resultados no monitoramento realizado.

Com isso, pode-se concluir que a temperatura e a forma de onda influenciam na detecção de danos em estruturas, sendo necessário definir mais de um índice de dano para se evitar falso diagnóstico. Além disso, para alguns casos, é necessário, também, definir valores limites acima do qual o dano pode ser identificado. Esses valores, juntamente com a utilização de múltiplos índices para detecção, podem ser úteis nos casos em que parâmetros ambientais (como a temperatura) influenciam nos resultados, criando uma uniformidade nos dados e garantindo confiabilidade na aplicação de técnicas de detecção, localização e quantificação de danos.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Deng, P., 2019. *Numerical simulation of Lamb wave propagation in CFRP skin/stringer structures for ultrasonic SHM systems to detect impact damage*. Tese de doutorado, University of Tokyo, Japan.
- Franco, V.R., 2009. *Monitoramento da integridade em estruturas aeronáuticas*. 202 f. 2009. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Brasil.
- Giurgiutiu, V., 2007. *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Elsevier, ISBN: 9780124201026.
- Guan, R.; Lu, Y.; Duan, W.; Wang, X., 2017. “Guided waves for damage identification in pipeline structures: a review”. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 24, n. 11, p. e2007.
- Hall, B. D., 1999. *Numerical simulations of the Aeroelastic Response of an Actively Controlled Flexible Wing*. Dissertação de mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Han, Q.; Ma, Q.; Xu, J.; Liu, M., 2012. “Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review”. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 11, n. 1, p. 149-173.
- Kamali, S.; Quqa, S.; Palermo, A.; Marzani, A., 2024. “Reducing false alarms in structural health monitoring systems by exploiting time information via Binomial Distribution Classifier”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 207, p. 1-16.
- Lai, X.; Yang, L.; He, X.; Pang, Y.; Song, X.; Sun, W., 2023. “Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: An aircraft wing example”. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 69, p. 76-90.
- Marqui C.R., 2007. *Modelagem de estruturas piezelétricas para aplicação em localização de falhas*. Tese de, Universidade Estadual Paulista, Brasil.
- Rehman, S. Ur.; Usman, M.; Toor, M. H.; H., Ali, Q, 2024. “Advancing structural health monitoring: A vibration-based IoT approach for remote real-time systems”. *Journal Sensors & Actuators A: Physical*, Vol. 369, p. 1-12.
- Rosa, V.A.M., 2016. *Localização de danos em estruturas anisotrópicas com a utilização de ondas guiadas*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Brasil.
- Yu, L.; Giurgiutiu, V.; Shin, Y.-J., 2011. “Corrosion detection with piezoelectric wafer active sensors using pitch-catch waves and cross-time–frequency analysis”. *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, p. 83-93.

#### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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