

IDENTIFICAÇÃO DE DANOS CAUSADOS POR DELAMINAÇÃO UTILIZANDO CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS 3DMatheus T. M. Santos (IC)¹, Guilherme F. Gomes (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá¹Instituto de Engenharia Mecânica**Palavras-chave:** Laminados Compósitos. Delaminação. DIC. SHM. VBDD.**Introdução**

Com a ampla utilização de materiais compósitos no mercado e principalmente no mundo da engenharia devido as suas propriedades mecânicas satisfatórias e baixo peso, a necessidade por um estudo mais aprofundado sobre o tópico aumenta gradativamente. Com isso, foi descoberto o que é chamado o “Calcanhar de Aquiles” dos materiais compósitos, a chamada delaminação, que nada mais é do que a perda de contato entre as fibras do material, de modo que a transferência de carga se torna impraticável. curto prazo, a delaminação pode resultar em redução do suporte nas camadas de carga de um laminado, favorecendo a propagação dos danos e ocasionando falha prematura. A longo prazo, essa condição pode expor as camadas de carga a agentes ambientais, como umidade ou contaminantes. Assim, a detecção precoce e precisa desses danos é fundamental para assegurar a segurança da estrutura.

A fim de identificar possíveis danos ocultos, o presente trabalho se propõe a utilizar um método com base em vibrações (*Vibration-Based Damage Detection*) e com o auxílio do DIC (*Digital Image Correlation*) para que seja possível determinar a posição aproximada de delaminações em uma estrutura de um modo sem contato e global (aplicado em toda a peça).

Metodologia

Resumidamente, VBDD se baseia nas frequências naturais de um corpo e posteriormente na excitação do mesmo a fim de obter seus modos de vibração ou seus ODSs (*operational deflection shapes*), que são definidos como o padrão de vibração em uma determinada frequência. No geral, o uso de ODS para detecção de danos tem a função de prover uma interpretação visual dos dados de vibração para que seja possível identificar anomalias e falhas estruturais.

A detecção dos danos se baseia na redução de

rigidez causada pela presença de danos, o que afeta os modos de vibração causando irregularidades onde a delaminação se encontra, conforme sugere Wang *et al.* (2024)¹. Para que seja possível a análise visual da diferença causada pelos danos, são empregadas derivadas múltiplas sobre os dados numéricos a fim de se obter um resultado com mais destaque. Para isso, é aplicado um método chamado *Mode Shape Curvature* (MSC) que emprega a segunda derivada numérica do modo de vibração para maximizar a diferença devido a rigidez na estrutura. Porém, ao se amplificar a diferença de rigidez também se aumenta o ruído causado pelas vibrações.

A fim de diminuir o ruído causado pelas múltiplas derivadas, fora aplicado um método para “mascarar” o ruído utilizando uma Transformada *Wavelet* Contínua (CWT), que se baseia em decompor o sinal recebido analisando somente oscilações localizadas, o que permite isolar os dados desejados e ocultar os prováveis ruídos. Deste modo, a soma dos métodos citados gera o método proposto por Wang *et al.* (2024)², a *Wavelet Transform Mode Shape Curvature* (WT-MSC), que consiste em aplicar derivadas múltiplas por cima dos dados suavizados com a *Wavelet* selecionada de modo a mitigar futuros ruídos causados pelo processo de derivação.

Por fim, o DIC se baseia em uma sequência de imagens que capturam o deslocamento de pontos aleatórios pintados na superfície da estrutura a ser analisada. Tal análise é possível por meio da divisão da imagem em subáreas chamadas *subsets*, onde cada *subset* possui uma quantidade de pontos diferente e o deslocamento pode ser determinado pela correlação dos *subsets* pré e pós deformação. O 3D-DIC, composto por duas câmeras sincronizadas, pode capturar tanto componentes no plano quanto fora do plano (direções x, y e z), mas depende da análise de um par de imagens capturadas simultaneamente por um sistema estéreo calibrado. Esse sistema estéreo consiste em duas câmeras sincronizadas que registram uma região de interesse comum (ROI) a partir de direções específicas de visualização. Assim, é possível capturar os modos de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

vibração de uma determinada peça através de uma excitação e captura de imagens, determinando a frequência na qual há maior amplitude de deslocamento.

Com toda a teoria em mente, o experimento se baseou na utilização do 3D-DIC com iluminação de alta frequência ligado através do software VIC-3D para capturar imagens de 3 placas de compósitos laminados (sendo 2 de fibra de carbono e 1 de aramida, respectivamente) distintas em diferentes condições de contorno. As placas 1 e 2 (Figura 1) possuem as mesmas medidas (1mx1m), com a diferença que a placa 1 possui 8 delaminações induzidas de diferentes tamanhos e em diferentes camadas. Ambas foram analisadas em uma condição livre. Já na placa 3 (Figura 2) foram induzidos danos de baixo impacto e a análise se deu em uma condição engastada.

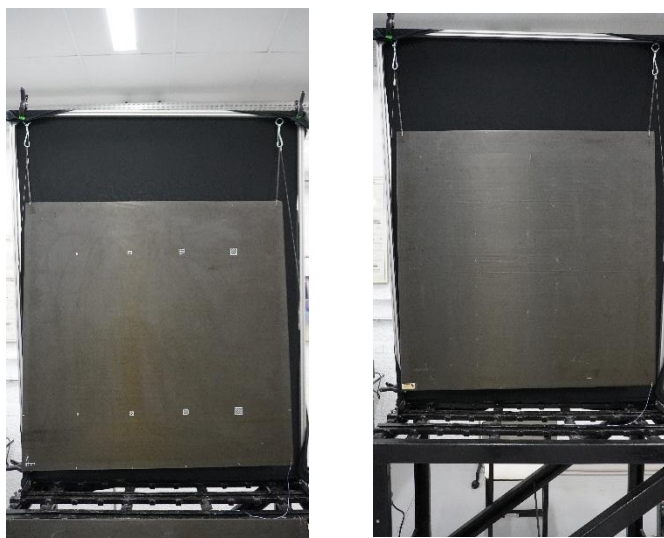


Figura 1 – Placa 1 (esquerda) vs. 2 (direita)

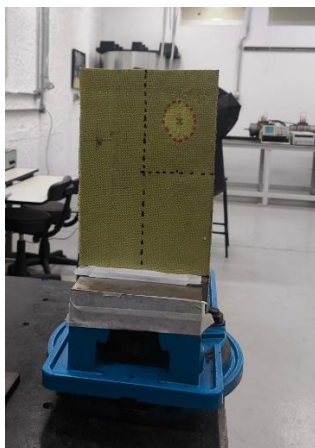


Figura 2 – Placa 3

Em um primeiro momento foi feita a análise das placas 1 e 2 completas, em uma frequência de 1 a 300Hz

por um sinal do tipo *sweep* (onde a frequência aumentou gradativamente em um intervalo de 1 segundo), induzida por um *shaker* fixado à extremidade da peça. Após isso, foi realizado um novo experimento com a placa 1 dividida em duas partes, onde a frequência variou de 1 a 800 Hz, com o intuito de aumentar a frequência ao diminuir a resolução, sempre se baseando no princípio de Nyquist-Shannon, que indica que só é possível identificar vibrações com a metade da taxa de amostragem do sistema de aquisição.



Figura 3 – Setup utilizado

Para que a análise seja possível, é necessário que cada *subset* (grupo de pixels utilizados para rastrear o movimento) deve ser único. Com isso em mente, as placas foram pintadas com um fundo branco e então aplicado um padrão aleatório utilizando os rolos disponibilizados pela *Correlated Solutions* de acordo com o tamanho da peça.



Figura 4 – Padrão de pontos aplicado à superfície da placa

Além disso, é necessária uma calibração minuciosa para garantir que ambas as câmeras possuem

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

um nível de iluminação próximo e rastreiem os mesmos *subsets*. Para isso foram utilizadas placas disponibilizadas pela fabricante do DIC que permitiram que as distâncias entre pontos fossem calibradas corretamente.

Para avaliar o método em diferentes condições de contorno, foi realizada a análise da placa 3 engastada, excitando a peça a uma frequência de 1 a 500 Hz, mantendo o mesmo tipo de onda, intervalo de tempo e posição do *shaker*.

Após a correlação, os dados de deslocamento ao longo do tempo foram processados por um programa atrelado ao software utilizado onde foi aplicada uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) para adquirir a resposta no domínio da frequência e enfim obter as frequências naturais e os modos de vibração da peça.

Por fim, esses dados foram exportados para um ambiente em *Python* em processados em um computador pessoal para que fosse possível aplicar os métodos de pós-processamento descritos anteriormente.

Além dos métodos descritos anteriormente, o presente trabalho se propõe a analisar 3 novas possibilidades que se baseiam no princípio da diferença de rigidez causada pela presença da delaminação. O primeiro é a diferença dos dados da placa sem danos e com danos (nessa ordem), constituindo um método comparativo com *baseline* (dado inicial a ser comparado com o final) centrado na ideia de que puramente o modo de vibração é capaz de evidenciar a diferença de rigidez. Já o segundo e o terceiro são bem próximos, consistem na curvatura da diferença dos modos de vibração e a diferença da curvatura dos modos, para que seja possível comparar a eficácia dos métodos *baseline-free* e com *baseline*.

Resultados e discussão

Após a obtenção de dados via *software*, os modos de vibração obtidos para duas primeiras estão ilustrados nas figuras 1 e 2. Com isso, os primeiros métodos se deram com a simples diferença das duas tabelas geradas com os dados extraídos e não se mostraram muito eficazes para evidenciar os danos da maneira esperada, como pode ser observado pela figura 3. Para as placas 1 e 2, mesmo quando utilizado o método inicial proposto (WT-MSD) os danos não se mostraram evidentes, uma vez que apenas vibrações nas extremidades foram detectadas, o que pode ser resultado de ruídos. Como pode ser observado na figura 4, os picos de vibração não coincidem com os danos indicados na figura 6. Além disso, os métodos propostos baseados na diferença entre

os modos de vibração se mostraram insuficientes para evidenciar o dano na placa, uma vez que a diferença de deslocamento é de ordem tão baixa que se torna impossível identificar sem pós processamento.

Com isso foram levantadas hipóteses sobre a causa do erro e as principais foram um possível desvio na programação do pós processamento ou diferença causada pelas condições de contorno. Após a análise minuciosa do código redigido, a análise da placa 3 engastada demonstrou a diferença do método quando se estuda em diferentes condições de contorno. Outro fator que afetou a análise principalmente na placa 1 foi o tamanho do dano, uma vez que o maior dano presente era de 1x1pol, o que corresponde a aproximadamente 1% da área total da placa.

Ao observar os dados de curvatura da placa 3, uma descontinuidade nas fibras foi destacada como um maior índice de deslocamento, juntamente de um maior deslocamento próximo a área do dano. Como pode ser observado pela figura 7, o aumento do deslocamento no canto esquerdo revela a descontinuidade das fibras que pode ser observada na figura 2.

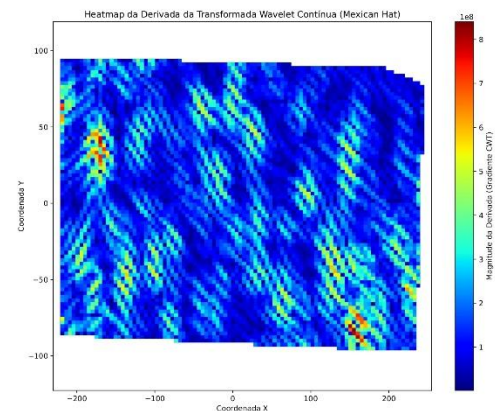


Figura 4 – WT-MSD da placa 1 (620.45 Hz)

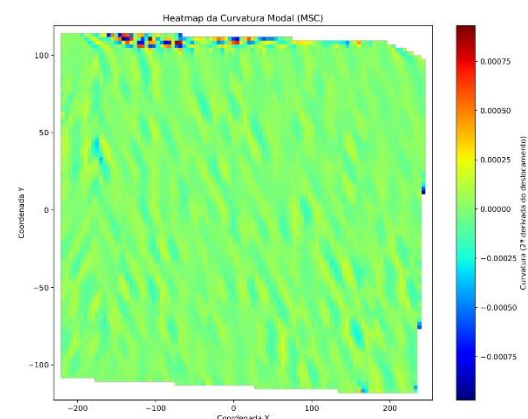


Figura 5 – MSC da placa 1 (620.45Hz)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

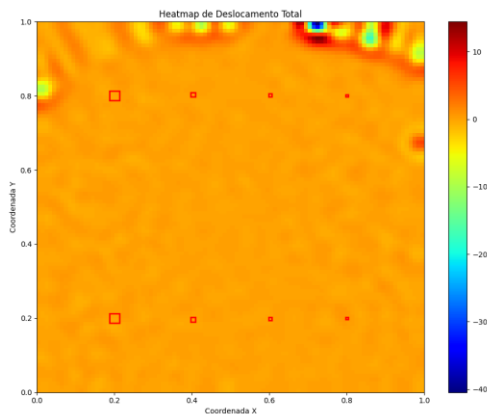


Figura 6 – MSC da placa 1 (479.73Hz)

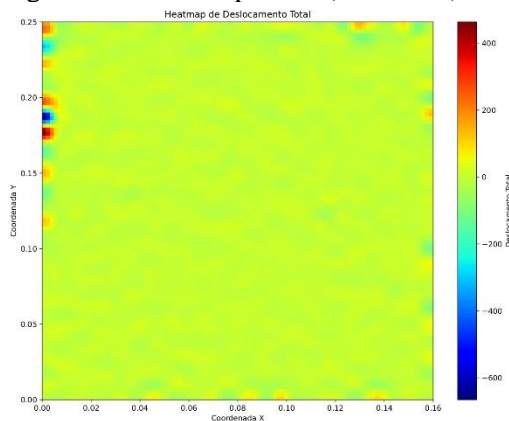


Figura 7 – WT-MSD da placa 3

Conclusões

Este trabalho mostrou a aplicação de um método global e sem contato para análise de delaminações em estruturas de laminados compósitos baseado na metodologia VBDD aplicada ao 3D-DIC. O objetivo geral desta pesquisa era identificar múltiplos danos em uma placa de grande porte utilizando o método proposto medindo os ODSs da peça sob vibração sem a necessidade de uma baseline.

Foi apresentada uma prova de conceito envolvendo o sistema proposto, composto por um par estéreo de câmeras digitais, DIC de alta velocidade e uma condição de imageamento de danos sem necessidade de referência (*baseline-free*) para visualização global de danos, baseada no método WT-MSD para obtenção do MSD via WT. Um estudo de viabilidade foi conduzido em chapas de fibra de carbono danificadas utilizando a técnica WT-MSD proposta.

Ao longo de 3 segundos, as câmeras digitais capturaram os ODSs dinâmicos na superfície da estrutura. A partir desse vasto conjunto de dados

distribuídos espacialmente e variantes no tempo, as frequências naturais e as formas modais operacionais foram extraídas por meio de algoritmos FFT. Uma 2D-CWT com a *wavelet Mexican Hat* foi aplicada às X primeiras formas modais de vibração para obter o WT-MSD.

Os resultados mostraram que regiões de dano começaram a aparecer nos MSDs operacionais computados usando WT-MSD a partir do quinto modo natural, quando a curvatura é maior e, portanto, mais sensível a irregularidades. Foi então analisada a diferença causada pela condição de contorno que revelou que a condição engastada se provou mais apropriada para esse tipo de análise.

Agradecimentos

Gostaria de realizar um agradecimento especial ao professor Dr. Guilherme F. Gomes pelo auxílio e orientação durante o processo de pesquisa e pela liberdade criativa para o desenvolvimento da mesma.

Obrigado à Universidade Federal de Itajubá por fornecer uma excelente infraestrutura e ambiente para o desenvolvimento da pesquisa.

Obrigado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Referências

1. WANG, Shaohan; ABBOTT, Trenton Bryce; FONG, Rey-Yie; XU, Cheryl; YUAN, Fuh-Gwo. Vibration-based hidden damage imaging using stereo cameras with digital image correlation. *Structural Health Monitoring*, v. 23, n. 3, p. 1779-1799, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217231191102>.
2. WANG, Shaohan; ABBOTT, Trenton Bryce; FONG, Rey-Yie; XU, Cheryl; YUAN, Fuh-Gwo. Damage detection using digital image correlation and stereo cameras. *Structural Health Monitoring*, v. 23, n. 1, p. 294-308, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217231191101>.
3. RASTIN, Reza; CAI, Yuqing; NING, Han; LI, Wenxi; YUAN, Fuh-Gwo. A review of structural health monitoring techniques as applied to composite structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 181, p. 109484, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109484>.