

## ABORDAGEM COMPUTACIONAL PARA O DIAGNÓSTICO DE DANOS EM JUNTAS COLADAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS VIA MÉTODO BASEADO EM VIBRAÇÕES<sup>1</sup>

Lucas Locatelli Daufenback<sup>2</sup>, Ricardo de Medeiros<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vinculado ao projeto “Modelagem computacional e experimental de estruturas de material compósito”

<sup>2</sup> Acadêmico do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica– CCT – Bolsista PIBIC/CNPq

<sup>3</sup> Orientador, Departamento de Engenharia Mecânica – CCT – ricardo.medeiros@udesc.br

Os materiais compósitos têm se tornado cada vez mais relevantes na engenharia devido à sua combinação única de alta resistência e baixo peso, o que os torna ideais para aplicações em setores como aeroespacial e automotivo. Em particular, as juntas coladas fabricadas com esses materiais oferecem vantagens em termos de eficiência estrutural. No entanto, a modelagem e análise do comportamento dinâmico dessas juntas e o impacto da degradação das propriedades do adesivo são importantes para garantir a durabilidade e a segurança destas estruturas.

Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de investigar os efeitos da degradação das propriedades mecânicas do adesivo, em juntas laminadas coladas do tipo junta de sobreposição simples (*Single-Lap Joint – SLJ*), na resposta dinâmica da estrutura, tais como frequências naturais, modos de vibrar e Funções de Resposta em Frequências (FRFs). A degradação do material foi determinada em um ensaio de tração uniaxial na direção longitudinal da junta, gerando tensões na interface adesiva que resultaram na formação e propagação de falhas e trincas ao longo do plano de adesão.

O estudo abordou o modo de falha misto, utilizando dados experimentais da literatura sobre Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP) unidos por adesivos poliméricos, considerando diferentes níveis de degradação das propriedades. As simulações foram realizadas com base no Modelo de Zona Coesiva (CZM). O procedimento computacional empregou um modelo tridimensional de elementos finitos (3D) com extrusão de 24,75mm para simular a falha na junta SLJ. Na modelagem, foram empregados elementos do tipo C3D8R para o aderente e COH3D8 para o adesivo, utilizando o software Abaqus<sup>®</sup> (Figura 1). A configuração bi-engastada foi selecionada e a análise de convergência de malha resultou em 12775 elementos e 17472 nós.

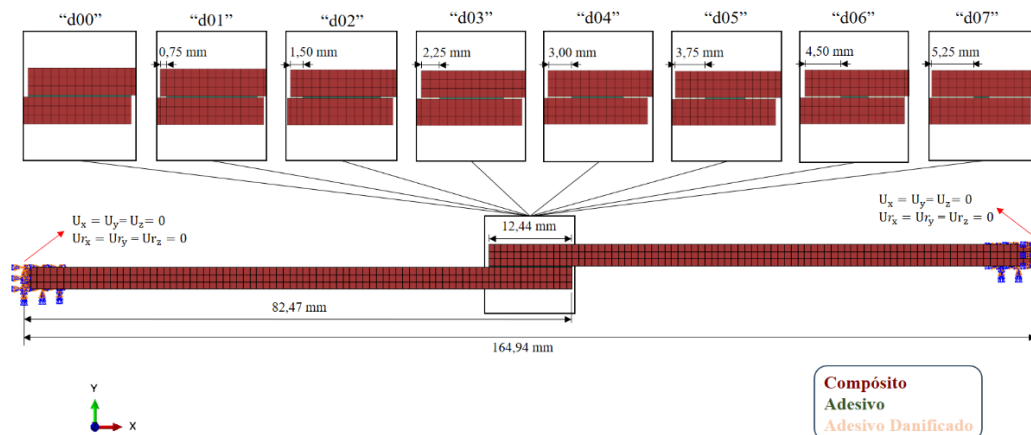


Figura 1. Modelo computacional.

Inicialmente, foi realizada uma análise modal para avaliar os seis primeiros modos de vibração. Para a obtenção das FRFs, foram selecionados dois pontos coincidentes com nós da malha para aplicação do sinal de entrada e de saída, correspondendo, em testes laboratoriais, ao impacto do martelo e à posição do acelerômetro, respectivamente. Além disso, a simulação incluiu a danificação do adesivo, modelada para reproduzir condições de danos encontradas na literatura. O tamanho do dano foi considerado nas simulações através da degradação das propriedades do adesivo, observadas via simulação de uma sollicitação longitudinal da viga. Foram analisados oito modelos: um modelo intacto, sem degradação do adesivo, nomeado de “d00” e sete modelos danificados, com diferentes tamanhos de degradação, nomeados de “d01” a “d07” (Figura 1).

As frequências naturais e as respostas em aceleração foram obtidas, permitindo a análise do comportamento dinâmico das juntas SLJ (Figura 2).



**Figura 2.** Análise das frequências naturais e modos de vibrar para as diferentes vigas.

Após a análise da Figura 2, observou-se que a degradação das propriedades do adesivo resultou em alterações nos modos de vibrar. Essa mudança é atribuída à redução da rigidez global da junta, causada pela perda de integridade do adesivo devido à presença de trincas e falhas. Com a degradação do adesivo, a capacidade da junta de resistir a deformações diminuiu, levando a uma modificação nas frequências naturais e, conseqüentemente, nos padrões de resposta dinâmica da estrutura.

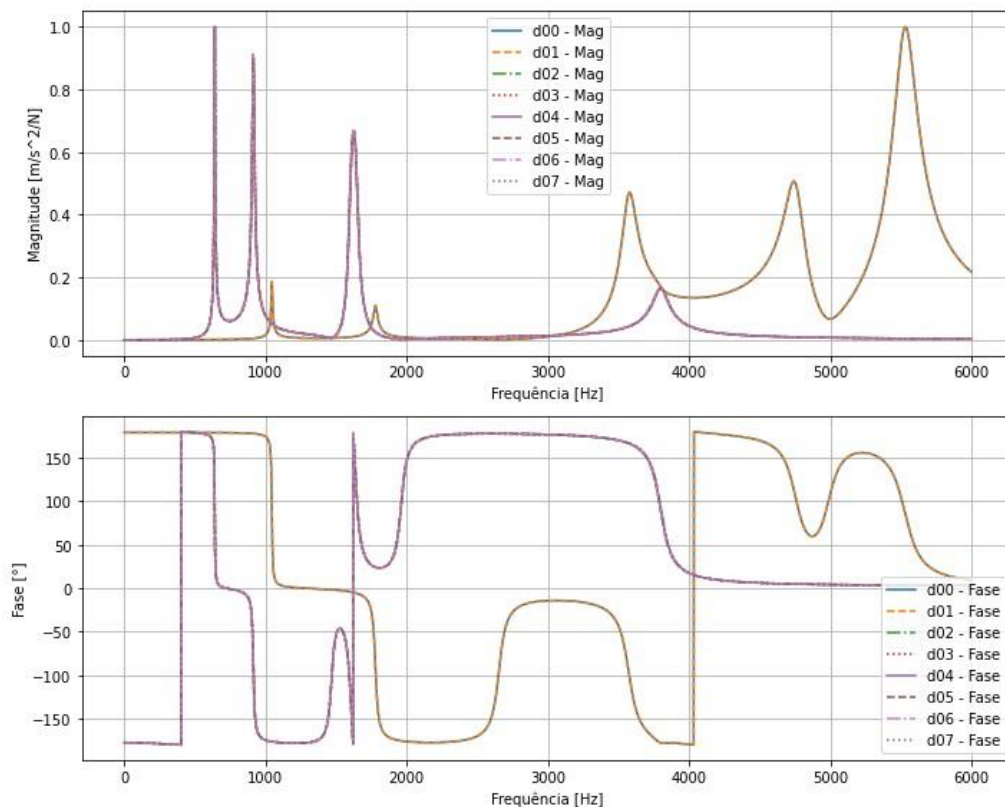
Para quantificar a extensão e a severidade do dano em estruturas, especialmente em compósitos danificados, utiliza-se métricas de dano conhecidas como índices de dano. Esse índice é calculado utilizando métodos de monitoramento de saúde estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM), como o método baseado em vibrações (*Vibration Based Method* - VBM). O índice de dano é determinado a partir da comparação das FRFs da estrutura intacta e da estrutura danificada. De Medeiros (2015) apresentou um índice de dano denominado  $DI_{GAP}$  (*global*

amplitude phase damage indicator), que leva em consideração os efeitos da amplitude e da fase da FRF obtida através do VBM, definido por

$$DI_{GAP_j} = \left| 1 - \frac{\sum_{\omega} (H_{jk}^d(\omega) - P_{jk}^d(\omega))}{\sum_{\omega} (H_{jk}^i(\omega) - P_{jk}^i(\omega))} \right| \quad (1)$$

onde os sobrescritos *i* e *d* representam as estruturas intactas e danificadas, respectivamente. E, os subscritos *j* e *k* denotam a localização da medição e da força aplicada, respectivamente. *H*( $\omega$ ) denota a amplitude, *P*( $\omega$ ) denota a fase, e  $\omega$  denota a faixa de frequência. A expressão *DI*<sub>GAP</sub> retorna um valor igual a 'zero' se não houver variação no comportamento dinâmico da estrutura, ou seja, se não houver dano na estrutura.

Figura 3 mostra as funções de resposta em frequência numéricas para a estruturas intacta e danificadas. Pode-se observar que os picos de ressonância são muito próximos tanto para a estruturas intacta e danificada (d00 e d01), quanto para as estruturas danificadas, d02, d03, d04, d05, d06 e d07). Isto está associado à danificação e, conseqüentemente, à mudança na rigidez das estruturas.



**Figura 3.** FRFs para as estruturas intacta e danificadas.

Considerando a FRF de 0 a 6.000 Hz, conclui-se que a estrutura apresenta uma pequena diferença entre o comportamento entre d00 e d01 para as d02 até d07. O próximo passo consiste em usar outra metodologia para detectar o dano. De fato, é difícil identificar o dano apenas pela

inspeção visual das FRFs; por isso, é necessário introduzir métricas de dano para identificar a presença ou não do dano. O método de identificação de dano é aplicado (Tabela 1). E, a métrica de dano é baseada na frequência medida dos CDPs de compósito.

**Tabela 1.** *Índice de Dano.*

<b>Intacto</b>	<b>Danificado</b>	<b>Índice de Dano (DI)</b>
d00	d01	0,0
d00	d02	0,9934
d00	d03	0,9937
d00	d04	0,9938
d00	d05	0,9933
d00	d06	0,9934
d00	d07	0,9938

A Tabela 1 apresenta os Índices de Dano (DI) comparando o estado intacto da estrutura (d00) com diferentes estados danificados (d01 a d07). Observa-se que o Índice de Dano para o estado intacto e D01 é 0,0, enquanto os índices para os estados danificados variam entre 0,9933 e 0,9938. Isso indica que há uma diferença no comportamento estrutural entre a condição intacta e as condições danificadas, sugerindo que os danos introduzidos na estrutura afetam sua integridade. A variação nos valores de DI também sugere que o método utilizado é sensível para detectar a presença de danos, mesmo que esses valores sejam muito próximos entre si.

O projeto demonstrou a eficácia da metodologia adotada para a detecção de danos em juntas coladas do tipo SLJ, evidenciando que, embora as diferenças entre as condições intacta e danificada sejam pequenas, o uso de métricas como o Índice de Dano (DI) permite uma identificação dos danos. A análise das Funções de Resposta em Frequência (FRF) revelou que a detecção de danos com base apenas na frequência natural pode ser limitada, mas a integração de métodos complementares, como o método baseado em vibração, fortalece a confiabilidade dos resultados. Em síntese, o projeto comprova a viabilidade de técnicas de monitoramento por vibração para detectar danos em materiais compósitos, oferecendo uma base promissora para futuras aplicações em uma metodologia para análise da integridade estrutural.

**Palavras-chave:** Juntas Coladas, Materiais Compósitos, Método Baseado em Vibrações, Índice de Dano, Análise Computacional.

De Medeiros, R., Lopes, H. M., Guedes, R. M., Vaz, M. A., Vandepitte, D., & Tita, V. (2015). A new methodology for structural health monitoring applications. *Procedia Engineering*, 114, 54-61.