

Avaliação de incertezas do amortecimento de placas compósitas por *Filament Winding* com o uso de técnica de transformada de Hilbert

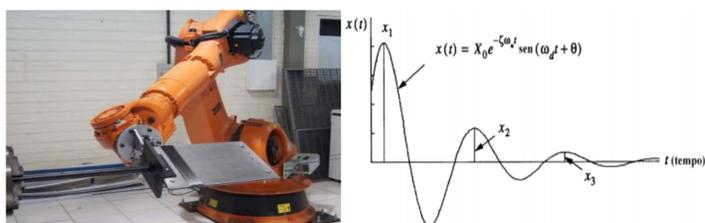
Autor: Enzo Costamilan

Orientador: Herbert Martins Gomes

Resumo

O objetivo desse trabalho é a análise das metodologias para o cálculo e avaliação da razão de amortecimento (ζ) em materiais compósitos na direção principal e ortogonal. Para esse estudo, utilizaram-se as técnicas de decremento logarítmico e envoltória calculada através da transformada de Hilbert. Foram ensaiados corpos de prova unidirecionais de fibra de carbono reforçada com epóxi confeccionados pelo método de enrolamento filamental (filament winding) em vibração livre. Após realizar o ensaio, o pós-processamento dos dados e análise ocorreu no software Matlab. Consistiu em utilizar um filtro passa-faixa para isolar a primeira frequência fundamental dos outros modos de vibração e interferências no sinal, utilizar a transformada de Hilbert para estimar o envelope das vibrações e ajustar curva exponencial ao envelope obtido, por fim, calcular a razão de amortecimento da estrutura. Comparações com modelos em Elementos Finitos dos corpos de prova empregados são utilizados para validação dos resultados obtidos.

Nas últimas décadas, a utilização de materiais compósitos como reforço estrutural vem crescendo uma vez que esses materiais oferecem elevada resistência mecânica combinado com significativa redução de peso da estrutura, essencial para componentes aeronáuticos. O método de enrolamento filamental (*filament winding*) vem ganhando espaço no mercado devido à crescente redução nos custos, a elevada velocidade e a grande precisão alcançada. Esse processo consiste na deposição orientada de fibras pré-impregnadas com resina (*pregreg*) em um mandril em rotação.



Decremento logarítmico

O método do Decremento Logarítmico permite avaliar a resposta de sistemas com vibração livre amortecida, especificamente a sua razão de amortecimento (ζ). O método é definido como o logaritmo natural da razão de quaisquer duas amplitudes sucessivas (BEARDS, 1988; HARRIS 2002). A figura abaixo mostra o sinal típico da resposta de um sistema que experimenta uma vibração livre com amortecimento subcrítico. A expressão que descreve a vibração de um sistema sob vibração livre amortecida pode ser descrita pela equação a cima.

Transformada de Hilbert para avaliação de envelopes

O primeiro passo na demodulação do sinal de amplitude é a filtragem com um filtro passa-banda, para eliminar as frequências associadas com efeitos que não são de interesse (como outros modos de vibração) e, então, extraí-las a partir do sinal original usando um filtro no domínio do tempo. Embora seja necessário utilizar técnicas para especificar a banda de filtragem adequada (para escolher a demodulação necessária para separar os sinais da vibração desejado dos ruídos e outros modos indesejados), isso pode ser feito com ensaios de vibração livre no sistema ou por análise numérica. Essas vibrações livres geradas pelos defeitos de rolamento são moduladas em amplitude pela sequência de impactos repetidos e pelo efeito de amortecimento e pela passagem na zona de carga. A análise direta de frequência dos sinais não fornece muita informação, porque o sinal de falha está misturado com o ruído outros defeitos. Essas frequências de repetição são, no entanto, facilmente medidas no envelope de sinal. O método de detecção de envelope (ou de demodulação de amplitude) fornece uma aproximação importante e eficaz para analisar sinais de falha em vibrações de alta frequência e pode ser calculado pela transformada de Hilbert. Dado um sinal $h(t)$ no domínio do tempo, a transformada de Hilbert é a convolução de $h(t)$ com o inverso do tempo.

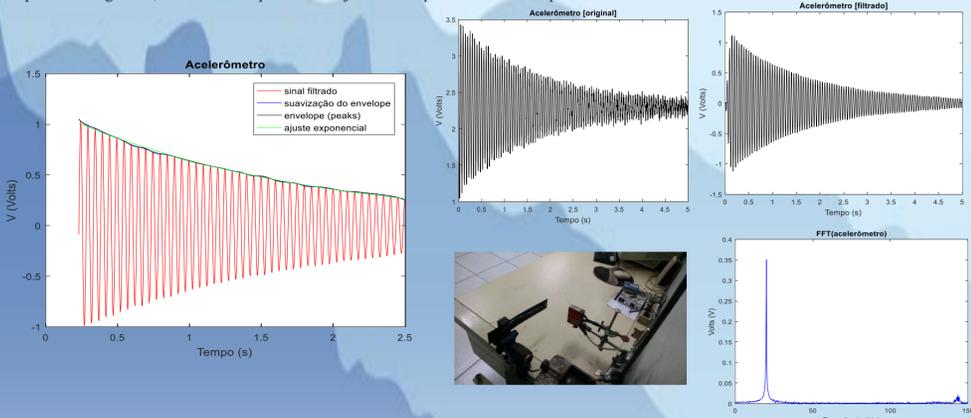
Metodologia

Para a realização dos testes towpregs de carbono / epóxi de TCR Composites foram utilizados. A fibra de carbono é utilizada foi a Toray T700-12K -50C ao passo que a resina epoxi é do tipo UF3369. Os laminados foram enrolados em um mandril rectangular de aço inoxidável (Figura 1) usando um robô KUKA KR 140 L100 com o controle e os dispositivos periféricos de MFTech. Par a o projeto e programação do robô, foi utilizado o programa CADWind2007, que é um software de CAD e CAM para enrolamento filamental.

As amostras foram cortadas com estilete no formato retangular e colocadas para ensaio em uma bancada na condição de engastada livre. Na tabela abaixo estão indicadas as dimensões assim como configurações de orientação das vigas que foram ensaiadas em vibração livre. Foram utilizados dois tipos de sensores para a medição das vibrações na extremidade livre das vigas. Um acelerômetro Analog Devices ADXL 213 (2010), com sensibilidade nominal de 970mV/g e limites de vibração de $\pm 1,7g$, não linearidade de $\pm 3,4 \times 10^{-3}g$ e massa de 0,3 gramas. Também foi utilizado o sensor laser MicroEpsilon optoNCDT 1300 (2009) modelo ILD 1300-20 com resolução de $10 \times 10^{-6}m$ para faixa de medição dinâmica de $\pm 10mm$ e sensibilidade de 250 mV/mm, a fim de fazer as medições de deslocamento na extremidade livre das vigas sem contato ou interferência originado por massas (como no caso do acelerômetro

As medições foram feitas com o sistema Agilent Vee (2009) da empresa Keysight usando uma placa de aquisição e dados Measurement Computing (2012) modelo1208FS de 12 bits, 8 canais analógicos de entrada e faixa de medição de $\pm 1,0V$. Para garantir os critérios amostrais, foi repetido o ensaio 10 vezes para cada amostra. Para o pós-processamento dos dados coletados, o software Matlab, 2012 foi empregado. O pós-processamento consistiu em filtrar os sinais para a frequência fundamental da viga, recortar trecho do sinal em que há vibração livre com amortecimento, através de um filtro passa-banda, utilizar a transformada de Hilbert para detectar o envelope das vibrações e ajustar curva exponencial ao envelope obtido para, por fim, calcular a razão de amortecimento.

Indicadodocado na Figura está o resultado do pós-processamento do sinal original utilizando a técnica do decremento logarítmico e da transformada de Hilbert para avaliação do envelope do sinal de vibração livre da mesma amostra anteriormente indicada. Percebe-se que praticamente todos os testes feitos para cálculo do envelope fornecem a mesma curva de decaimento exponencial e correspondentes razões de amortecimento. A curvas variam levemente pois, durante a transformada de Hilbert, é considerado nos cálculos os picos inferiores, o que faz com que a curva não coincida exatamente com o valor no pico superior. Ao passo que o decremento logarítmico utiliza os picos superiores do gráfico, fazendo com que a curva ajustada se aproxime mais dos picos analisados.



Simulação em Elementos Finitos

Empregou-se um elemento finito degenerado de 4 nós com efeitos de flexão e torção e combinação entre eles, juntamente com um modelo que incorpora a teoria de corte de 1ª. ordem para o efeito cisalhante em placas laminadas delgadas a moderadamente espessas. Nesta teoria, o campo de deslocamentos é o mesmo dado pela teoria de Mindlin para placas:

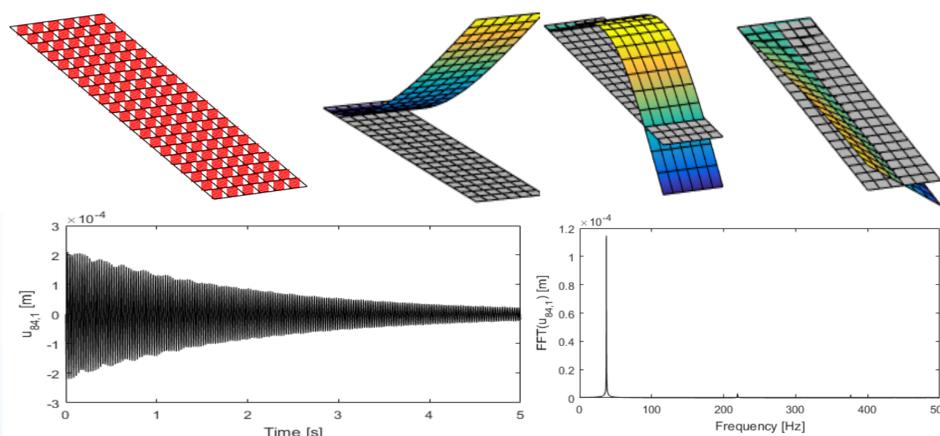
$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z\theta_x(x, y) \quad v(x, y, z) = v_0(x, y) + z\theta_y(x, y) \quad w(x, y, z) = w_0(x, y)$$

A matriz de rigidez é obtida da forma usual por integração numérica em pontos de Gauss e ao longo das camadas do material composto (espessura) a partir da energia de deformação, sendo então decomposta em cada uma das componentes. Assim, para componente de acoplamento flexão-membrana a matriz é definida como:

$$K_{mf}^{(e)} = \sum_{k=1}^{nc} \int_A B_m^T D B_m (z_{k+1} - z_k) dA$$

onde nc denota o número de camadas ao longo da espessura do material composto, D a matriz constitutiva (já rotacionada para a direção das lâminas) e z_k e z_{k+1} , as coordenadas da face inferior e superior da camada k . Juntando-se todas as componentes, tem-se a matriz de rigidez completa.

$$K^{(e)} = K_{mm}^{(e)} + K_{mf}^{(e)} + K_{fm}^{(e)} + K_{ff}^{(e)} + K_{cc}^{(e)}$$



Resultados

Repetição	Amostra 9		Amostra 10		Amostra 11		Amostra 12	
	f1	z	f1	z	f1	z	f1	z
1	41,66	0,0042	20,23	0,0062	40,45	0,0187	19,63	0,0137
2	41,66	0,0066	20,43	0,0056	40,05	0,0271	19,43	0,0136
3	41,66	0,0043	20,23	0,0066	39,45	0,0162	19,63	0,0141
4	41,86	0,0083	20,23	0,0062	39,25	0,0181	19,43	0,0141
5	41,86	0,0114	20,23	0,0060	39,25	0,0187	19,43	0,0134
6	41,86	0,0117	20,23	0,0057	39,25	0,0190	19,43	0,0131
7	41,86	0,0087	20,03	0,0050	39,05	0,0183	19,43	0,0125
8	41,86	0,0081	20,03	0,0045	39,25	0,0154	19,43	0,0135
9	41,86	0,0097	20,03	0,0045	40,25	0,0140	19,63	0,0129
10	41,86	0,0090	20,03	0,0042	40,25	0,0110	19,43	0,0131
Média	41,8	0,008	20,2	0,005	39,7	0,018	19,5	0,013
Desvio	0,097	0,003	0,135	0,001	0,534	0,004	0,097	0,001
CV	0,002	0,311	0,007	0,153	0,013	0,238	0,005	0,039

Conclusão

A técnica da transformada de Hilbert se mostrou bastante prática (e automatizável) para o cálculo da razão de amortecimento em materiais compostos e é de fato uma alternativa para a avaliação deste parâmetro na caracterização de materiais compósitos. A estabilidade do método pode ser verificada através da baixa dispersão obtida dentro repetições de um mesmo experimentos (baixo CV). Como era de se esperar, baseado nos resultados experimentais, pode-se verificar que o amortecimento variou de forma proporcional à quantidade de camadas, a sua orientação e de forma menos evidente referente ao comprimento da amostra de material composto. A rigor, a baixa variabilidade de amortecimento entre amostras de mesma sequência de empilhamento, mas de comprimentos diferentes, pode ser atribuída à mudança do amortecimento proporcional viscoso de arrasto do ar na situação de vibração livre, já que uma área de exposição ao ar sujeito ao arrasto gera alterações neste amortecimento, principalmente em estruturas que sejam singelas e de baixa massa como são as amostras ensaiadas.

Conclui-se que o modelo de elementos finitos pode ser utilizado visto que os resultados se mostraram bastante próximos daqueles obtidos experimentalmente ao menos na faixa de frequência medida. Este é um indicativo de que estes modelos podem vir a substituir os ensaios experimentais em casos em que o amortecimento seja conhecido ou se deseje avaliar geometrias de materiais compósitos mais complexas, evitando ensaios experimentais mais dispendiosos, visto que o comportamento numérico se mostrou bastante próximo do medido experimentalmente. Mais testes comparativos entre o resultados numéricos e os experimentais para outras faixas de frequências de vibração são necessárias e também são motivos de investigações futuras.