

Análise Modal Experimental em Estruturas Aeronáuticas: Uso de Acelerômetros e Martelos Instrumentados para Determinar Frequências Naturais

Eduardo Zambotti Marzocchi
Eduardo.marzocchi@aluno.ifsp.edu.br

Giovane José da Silva
Giovane.silva@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



Vibrações e Integridade Estrutural

Estruturas aeronáuticas estão sujeitas a carregamentos dinâmicos que geram vibrações, podendo comprometer a integridade, conforto e segurança.



Ressonância

Ocorre quando a frequência de excitação externa se aproxima da frequência natural da estrutura, causando aumento da amplitude de vibração, acelerando a fadiga e potencial ruptura.



Flutter Aeroelástico

Instabilidade dinâmica crítica, resultante da interação entre forças aerodinâmicas, inércia e elasticidade, que pode levar a oscilações autoalimentadas e falhas catastróficas.



A Solução: Análise Modal Experimental (AME):

Ferramenta essencial para determinar frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração de uma estrutura, e caracterizar as propriedades dinâmicas e validar modelos numéricos, garantindo a segurança e a manutenção.



Fundamentos Teóricos: Vibrações e Frequências Naturais



Vibrações: Oscilações de toda estrutura mecânica quando submetida a forças externas, resultando em movimento repetitivo



Frequências Naturais: Frequências próprias em que uma estrutura tende a vibrar quando excitada e liberada, dependendo de sua massa, rigidez e condições de contorno. Operar próximo delas gera ressonância.



Modos de Vibração: Padrões de deformação espacial da estrutura durante a oscilação (ex: flexão, torção ou combinação), cruciais para prever a resposta estrutural e evitar flutter.



Observação:

A operação próxima às frequências naturais (ressonância) amplifica as vibrações, aumentando o risco de falhas e reduzindo a vida útil dos componentes.



Equação De Frequência Natural



Relação Fundamental, onde a frequência é uma "batalha" entre a rigidez (que quer trazer a estrutura de volta à posição original) e a massa (que quer manter o movimento devido à inércia).

$$\text{Equação: } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



Fn (Frequência Natural): É a frequência em que a estrutura tende a vibrar livremente após sofrer uma excitação inicial. A unidade de medida padrão é o **Hertz (Hz)**, que representa oscilações por segundo.



k (Rigidez): Representa a rigidez equivalente da estrutura (ou "constante elástica"). Fisicamente, é a resistência que o material ou a estrutura oferece à deformação quando uma força é aplicada.

Relação: Quanto **maior** a rigidez (k), **maior** será a frequência natural (a estrutura vibra mais rápido).



m (Massa): Representa a massa equivalente da estrutura ou do ponto analisado.

Relação: Quanto **maior** a massa (m), **menor** será a frequência natural (a estrutura vibra mais lentamente).



$\frac{1}{2\pi}$, é o fator de conversão para transformar a frequência angular (radianos/s) para a frequência linear (Hertz/ciclos por segundo).



Métodos de Análise



Métodos Numéricos (MEF):

Utilizam modelos matemáticos e simulações (Método dos Elementos Finitos) para prever frequências e modos. São eficientes em análises preliminares, mas dependem da precisão dos parâmetros modelados (massa, rigidez, etc.).



Métodos Experimentais (AME):

Baseiam-se em medições reais com excitação controlada e sensores. São fundamentais para validar os modelos numéricos e representar o comportamento físico real da estrutura em suas condições efetivas.



Acelerômetro (Sensor de Resposta)



São Transdutores que convertem a aceleração mecânica em um sinal elétrico, permitindo a medição das respostas vibratórias da estrutura, onde uma massa interna reage à aceleração, gerando um sinal proporcional. ($F=ma$ – baseado na segunda lei de newton). **APLICAÇÕES AERONÁUTICAS:** **Asas:** prevenção de flutter aeroelástico, **Fuselagem:** análise de fadiga estrutural, **Motores:** diagnóstico de falhas, **Trens de pouso:** resposta dinâmica (impacto).

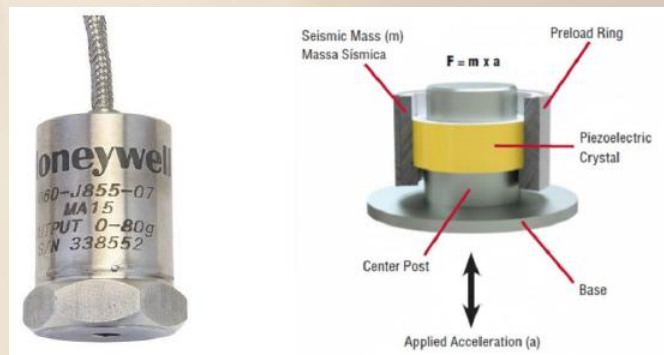


Figura 1 – Acelerômetro Piezoelétrico MA15 e esquema interno - Fonte: Technosupply (2025).



Piezoelétricos: Cristais geram carga elétrica sob deformação, ideais para altas frequências (mais usados em AME).

Capacitivos: Deslocamento da massa altera a capacitância, para medições sensíveis.

Resistivos: Medem deformações em elementos flexíveis, para baixas frequências.

MEMS: Sensores miniaturizados, comuns em drones e smartphones.



Martelos Instrumentados


 Fornece uma excitação mecânica controlada (um impulso) à estrutura durante o teste modal. Possui um transdutor de força (célula de carga) que mede a força de impacto aplicada, gerando um sinal elétrico proporcional. **Aplicações Aeronáuticas:** Asas e superfícies de controle, Fuselagem e cauda, Pás de hélices e turbinas e Componentes internos críticos. **Aplicação na AME:** O sinal do martelo (entrada de força) é comparado com o sinal dos acelerômetros (saída de resposta) para determinar a Função de Resposta em Frequência (FRF).



Figura 2 – Marreta modal (Médias e Grandes Estruturas) e Martelo de impacto - (Médias e Pequenas estruturas), Fonte: Brüel & Kjær (2025).



Rígidas: Para altas frequências, ideais para estruturas leves.

Macias: Para baixas frequências, indicadas para estruturas grandes ou flexíveis.

Massas Variáveis: Permitem ajustar energia do impacto conforme a estrutura.



Processamento de Sinais: Transformada de Fourier (FFT)



A Transformada Discreta de Fourier (DFT) converte sinais do domínio do tempo (Impacto e Vibração) para o domínio da frequência, identificando quais frequências estão presentes na resposta da estrutura durante a análise modal.



FFT - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A FFT é um algoritmo eficiente para calcular a DFT, reduzindo drasticamente o tempo de processamento e permitindo a análise rápida de sinais longos. Na análise modal, a FFT é utilizada para gerar espectros de frequência.



RESULTADO PRÁTICO

O resultado da FFT é o espectro de frequência, mostrando picos de energia nas frequências naturais da estrutura. Esses picos são indicadores das frequências em que a estrutura vibra naturalmente.











A fórmula da DFT pega cada ponto do nosso sinal de vibração medido no tempo ($[n]$) e calcula o quanto ele contribui para cada frequência específica ($[k]$). É isso que nos permite ver os picos de vibração no gráfico de espectro.



Fórmula da DFT




$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N-1)} \left[x[n] * e^{\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right)} \right]$$

-  **X[k] (Componente de Frequência):** Representa a amplitude e a fase do sinal na frequência específica de índice k. "Quanto dessa frequência k existe no meu sinal de vibração?" – O que queremos encontrar.
-  **$\sum_{n=0}^{(N-1)}$ (Somatório):** Percorre todo o sinal amostrado, ponto a ponto, do instante inicial (n=0) até o final (N-1).
-  **x[n] (Sinal no Domínio do Tempo):** É o dado bruto de entrada, [n] pode ser o valor da força medida pelo martelo ou a aceleração medida pelo acelerômetro num instante específico n.
-  **e^{-j} 9 (Exponencial Complexa):** Este termo vem da Fórmula de Euler e representa senoides e cossenos. Ele funciona como uma "sonda" que testa se o sinal de entrada [n] "combina" com uma frequência específica.
-  **j (Unidade Imaginária):** É necessária pois a DFT lida com amplitude e fase simultaneamente (nº complexos).
-  **N (Número Total de Pontos):** É a quantidade total de amostras coletadas durante o experimento.
-  **k (Índice de Frequência):** O índice da frequência que estamos analisando no momento (0 Hz, 1 Hz, 2 Hz...).
-  **n (Índice de Tempo):** O índice da amostra no tempo atual dentro do somatório.



Funções de Resposta em Frequência (FRF)

As FRFs é a principal ferramenta da análise modal, representam a relação entre a entrada (força do martelo (F)) e a saída (aceleração medida (X)) de um sistema linear no domínio da frequência. **(Processamento de Sinais). Utilizado para:**




-  **Frequências Naturais:** Identificadas pelos picos no espectro da FRF.
-  **Amortecimentos:** Determinado pela largura e forma dos picos.
-  **Modos de Vibração:** Comportamento relativo em diferentes pontos ((Analisando FRFs)

Essa é a equação fundamental da **Função de Resposta em Frequência (FRF)**, que descreve a dinâmica do sistema no domínio da frequência. A equação diz que a característica da estrutura (H) é a razão entre o quanto ela vibrou (X) dividida pela força que você aplicou (F).



Fórmula da FRF


$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\textit{Saída (Resposta)}}{\textit{Entrada (Excitação)}}$$


-  **$H(\omega)$ (Função de Resposta em Frequência):** É o valor que queremos encontrar. Ele descreve a "assinatura dinâmica" da estrutura. Matematicamente, é um número complexo que contém informações sobre a magnitude (o quanto vibra) e a fase (o atraso da vibração) para cada frequência ω .
-  **$X(\omega)$ (Transformada da Saída/Resposta):** É o sinal de **Aceleração** (medido pelo acelerômetro) convertido para o domínio da frequência através da FFT. Representa como a estrutura vibrou.
-  **$F(\omega)$ (Transformada da Entrada/Excitação):** É o sinal de **Força** (medido pelo martelo instrumentado) convertido para o domínio da frequência através da FFT. Representa o *quanto* de força foi aplicada.





Metodologia Experimental: O Estudo de Caso

Baseado no experimento de Raimundo (2025), sobre o projeto do Grupo Carancino Aerodesign (UFSM), Asa de aeromodelo simplificada.

 **Objetivo:** Determinar as frequências naturais, modos de vibração e amortecimento estrutural da asa, validando o comportamento dinâmico real da estrutura.

 **Método Experimental:** Teste por meio do martelo de impacto móvel, com acelerômetro fixado em ponto estratégico e impactos aplicados em múltiplos pontos.

 **Configuração Do Teste:**
Acelerômetro fixado sobre nervura da asa
Impactos distribuídos ao longo do extradorso
Condições de contorno: raiz fixa, ponta livre

 **Resultado Esperado:** Identificação dos modos de vibração flexionais e torcionais da estrutura, permitindo validar modelos numéricos e prever comportamento em operação.



Passo a Passo do Experimento



1º Preparação da Estrutura: Posicionar a asa simplificada em suportes fixos simulando as condições reais de contorno. Raiz fixa, ponta livre (condição típica), Identificar e marcar pontos estratégicos, Garantir estabilidade durante o teste.



2º Instalação dos Sensores: Fixar acelerômetros piezelétricos nos pontos marcados com contato firme. Garantir contato firme e sem folgas, Conectar ao Sistema de Aquisição (DAQ), Verificar calibração dos sensores
Registrar aceleração no domínio do tempo.






3º Aplicação de Excitação: Utilizar o martelo instrumentado para aplicar impactos controlados nos pontos definidos.
Célula de carga registra força aplicada, Variar ponteira (rígida ou macia), Ajustar energia conforme a estrutura.



4º Aquisição de Dados: Registrar simultaneamente o sinal de força do martelo e a resposta de aceleração dos acelerômetros, Realizar múltiplos impactos em cada ponto para aumentar a confiabilidade, Sincronização: Sistema DAQ registra força e aceleração com mesma taxa de amostragem, Reduzir ruído ambiental e garantir contato firme dos sensores.



Passo a Passo do Experimento

-  **5º Processamento de Dados: FFT (Transformada Rápida de Fourier) :** Aplicar FFT aos sinais de tempo (força e aceleração), Converter para domínio da frequência, Resultado: Espectros de frequência mostrando componentes presentes nos sinais. **FRFs (Funções de Resposta):** Calcular FRFs como razão entre saída (aceleração) e entrada (força), Gerar gráficos de amplitude e fase, utilizando $H(\omega) = Y(\omega) / X(\omega)$ para cada ponto de medição.
-  **6º. Análise Modal: Identificação de Frequências Naturais:** Localizar picos nas FRFs que correspondem às frequências naturais, Registrar amplitude e frequência de cada pico.
-  **Com isso realizar o Mapeamento de Modos de Vibração:** Analisando a forma dos picos (largura = amortecimento), Comparando respostas em diferentes pontos para mapear padrões de deformação. Cada modo corresponde a um padrão de vibração específico (flexão, torção, etc.).



Imagens do Procedimento



Figura 3 – Visão do extradorso e intradorso da asa com o acelerômetro instalado - Fonte: Raimundo (2025).



Link Vídeo - Teste com acelerômetro e martelo

<https://www.youtube.com/watch?v=5wrYc5rZeLc>

Momento 00:56 – 01:03



Resultados Obtidos e Validação




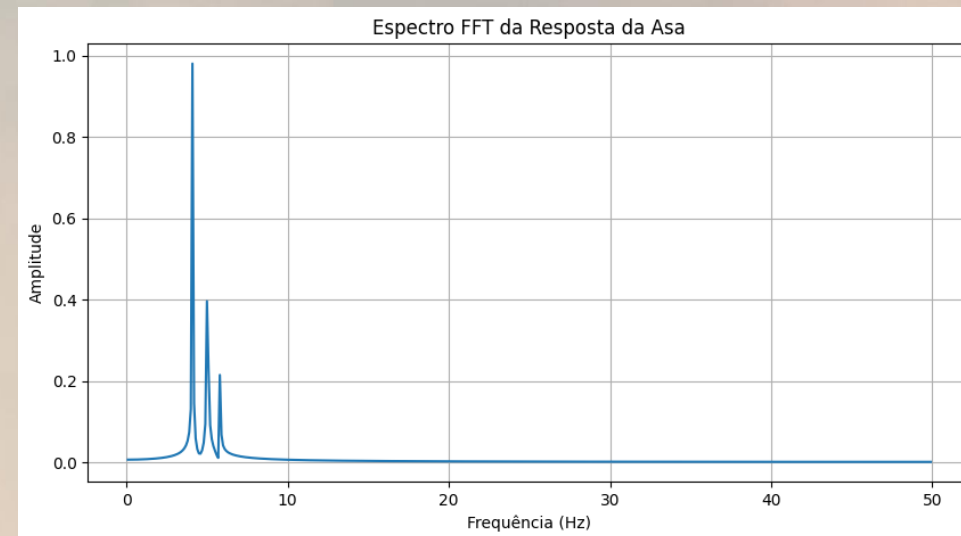
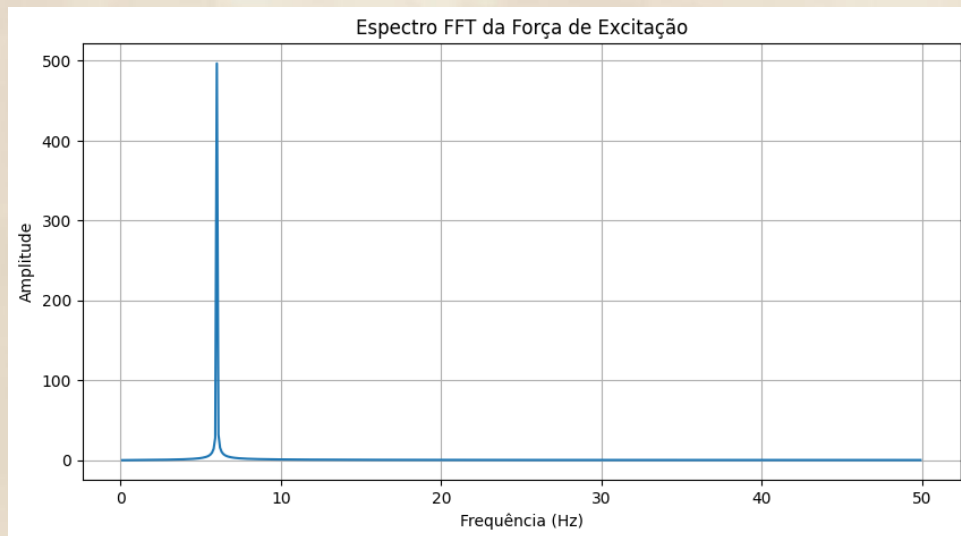
-  **Identificação Modal Eficiente:** A metodologia aplicada (martelo instrumentado e acelerômetros) foi eficaz na extração das Funções de Resposta em Frequência (FRFs).
-  **Modos Críticos Identificados:** Foram isolados com clareza os 3 modos de vibração fundamentais da asa: **Flexão Fundamental (~5,81 Hz)** - **Torção (~5,03 Hz)** - **Modo Combinado (~4,11 Hz)**.
-  **Consistência Teórica:** Os dados experimentais apresentaram alta correlação com os cálculos teóricos (modelo massa-mola), validando a consistência do ensaio.

Tabela 1 – Frequências Naturais, Amplitudes e Tipos de Vibração dos Modos Principais da Asa.

Modo	Frequência Natural (Hz)	Amplitude de Deslocamento (m)	Tipo de Vibração
1	5,81	0,002	Flexão fundamental
2	5,03	0,001	Torção
3	4,11	0,0005	Combinado (flexão+torção)









Gráficos - Resultados Obtidos e Validação





Impacto na Engenharia e Segurança

-  **Segurança Operacional:** A identificação precisa dessas frequências é vital para evitar fenômenos catastróficos como **ressonância** e **flutter aeroelástico**.
-  **Correlação Numérico-Experimental:** A Análise Modal Experimental (AME) mostrou-se indispensável para validar e refinar modelos numéricos (Método dos Elementos Finitos - MEF), reduzindo incertezas de projeto.
-  **Ciclo de Vida da Aeronave:** Os dados servem de base não apenas para a certificação, mas para a manutenção preditiva e monitoramento de degradação estrutural.
-  **Ferramenta Essencial:** A AME consolida-se como uma etapa obrigatória no design aeronáutico, unindo a teoria à realidade física da estrutura.
-  **Limitações e Cuidados:** O estudo destacou a importância da fixação correta dos sensores e das condições de contorno para evitar erros de medição.
-  **Análise de Impacto:** A integração entre métodos experimentais e simulações garante projetos mais robustos, otimizados e, acima de tudo, seguros para a operação de voo.



Conclusões



A Análise Modal Experimental (AME) realizada permitiu identificar com clareza os três modos de vibração críticos (flexão, torção e combinado) e suas respectivas frequências naturais, comprovando a eficácia da metodologia com martelos de impacto e acelerômetros na caracterização dinâmica da estrutura. Os resultados obtidos, consistentes com a teoria, são fundamentais para a segurança do projeto, pois permitem prever fenômenos como o *flutter* e evitar a ressonância. Ao validar modelos numéricos (FEM) e simulações, a AME não apenas otimiza o ciclo de projeto e certificação, mas também assegura o cumprimento de requisitos rigorosos de engenharia, consolidando-se como um pilar indispensável para a inovação, desempenho e confiabilidade operacional no setor aeroespacial.

Obrigado Pela Atenção

