

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL NA LINGUAGEM PYTHON

Adriano Diegues da Silva Rocha, adrianorocha0252@gmail.com¹

Antonio Carlos Quaresma Junior, antoniocqjr99@gmail.com²

Fábio Antônio do Nascimento Setúbal, fabioans@ufpa.br³

Alexandre de Moura Magno, alexandremouramagno⁴

Mateus Moreira Ferreira, mateusmoreiraferreira23@gmail.com⁵

Rian Marques, rian.marques@itec.ufpa.br⁶

¹Universidade Federal do Pará - UFPA. Endereço: Rua Augusto Corrêa, nº 01 - Bairro: Guamá. CEP: 66075. Belém -

Resumo. A análise modal é fundamental para identificar e mitigar o fenômeno da ressonância, prevenindo falhas estruturais significativas. Entretanto, os altos custos de muitos softwares comerciais dificultam o acesso de pesquisadores e profissionais a essas ferramentas. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo acessível para análise modal, utilizando Python e as bibliotecas SDyPy e Kivy. Para validar sua eficácia, foi realizado um ensaio experimental em uma viga biapoiada, submetida ao teste do martelo de impacto. Os sinais obtidos foram processados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), possibilitando a extração da Função Resposta em Frequência (FRF) e a identificação dos parâmetros modais pelo método LSCF. Os resultados mostraram boa precisão na determinação das frequências naturais dos quatro primeiros modos, em comparação com o modelo analítico. Além disso, o Coeficiente de Correlação Modal (MAC) indicou alta correlação entre os modos experimentais e analíticos. Assim, o aplicativo se apresenta como uma alternativa viável, de baixo custo e fácil acesso para a análise modal, atendendo às necessidades da comunidade acadêmica e profissional.

Palavras chave: Análise Modal Experimental. Aplicativo. Método LSCF

Abstract. Modal analysis is essential for identifying and mitigating the phenomenon of resonance, thus preventing significant structural failures. However, the high cost of many commercial software solutions limits access for researchers and professionals. In this context, this study proposes the development of an accessible application for modal analysis using Python and the SDyPy and Kivy libraries. To validate its effectiveness, an experimental test was conducted on a simply supported beam using an impact hammer test. The acquired signals were processed using the Fast Fourier Transform (FFT) to extract the Frequency Response Function (FRF), enabling the identification of modal parameters through the LSCF method. The results demonstrated good accuracy in determining the natural frequencies of the first four modes when compared to the analytical model. Additionally, the Modal Assurance Criterion (MAC) showed high correlation between the experimental and analytical modes. Thus, the application proves to be a viable, low-cost, and accessible alternative for modal analysis, benefiting both academic and professional communities.

Keywords: Experimental Modal Analysis. Application. LSCF Method

1. INTRODUÇÃO

A análise modal desempenha um papel fundamental na identificação e mitigação do fenômeno da ressonância, que ocorre quando uma estrutura é excitada em sua frequência natural. Nesse cenário, a amplitude de vibração pode aumentar significativamente, resultando em falhas estruturais severas ou até mesmo no colapso da estrutura. Assim, a determinação precisa das frequências naturais e dos fatores de amortecimento é essencial para o desenvolvimento de sistemas mais seguros e confiáveis (SANTOS, 2007).

Embora existam diversos softwares comerciais para análise modal, muitos exigem licenças pagas, o que limita o acesso de pesquisadores, estudantes e profissionais que não dispõem dos recursos financeiros necessários para adquiri-los. Essa restrição dificulta o avanço do conhecimento e a aplicação prática dessa tecnologia. Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo acessível para análise modal, utilizando a linguagem de programação Python. O aplicativo emprega a biblioteca SDyPy para os cálculos de ajuste de curva e a biblioteca

Kivy para a construção da interface gráfica, proporcionando uma ferramenta eficiente e de fácil uso para a comunidade acadêmica e profissional.

Para validar o funcionamento do aplicativo, foi realizado um ensaio experimental em uma viga biapoada, dividida em nove pontos para a aplicação do teste com martelo de impacto. O teste do martelo de impacto é uma técnica amplamente utilizada na análise modal experimental, consistindo na aplicação de um impacto controlado com um martelo instrumentado, enquanto sensores, como acelerômetros, medem a resposta da estrutura. Os sinais coletados são processados por um analisador de dados, onde a Transformada Rápida de Fourier (FFT) converte as informações do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo a obtenção da Função Resposta em Frequência (FRF) e a identificação dos parâmetros modais (DAINESE, 2023).

O método de Ajuste de Curva por Mínimos Quadrados na Frequência Complexa (LSCF – *Least Squares Complex Frequency*) é uma técnica utilizada na análise modal experimental para estimar parâmetros como frequências naturais, amortecimento e formas modais a partir das FRFs. Trabalhando no domínio da frequência, o LSCF ajusta modelos matemáticos aos dados experimentais, sendo robusto contra ruídos e eficaz na identificação de múltiplos modos. Segundo Rusovici et al. (2021), ele facilita a distinção entre modos reais e não físicos por meio de diagramas de estabilização, sendo útil especialmente em estruturas com modos próximos em frequência.

A partir dos dados coletados no ensaio, as FRFs foram processadas e utilizadas no aplicativo para a realização dos cálculos de ajuste de curva por meio do método LSCF, com o objetivo de extrair os parâmetros modais, como frequências naturais e fatores de amortecimento. Os resultados obtidos no aplicativo foram comparados aos valores analíticos para verificar sua precisão e confiabilidade. Os resultados demonstraram baixo erro relativo nos valores das frequências naturais.

Além da obtenção dos parâmetros modais por meio do ensaio com martelo de impacto, foi realizada a validação dos resultados experimentais com o modelo analítico utilizando a Matriz de Correlação Modal (MAC – Modal Assurance Criterion). Essa técnica compara os vetores modais obtidos experimentalmente com aqueles provenientes de um modelo teórico ou numérico, permitindo avaliar a similaridade entre os modos. A análise MAC apresentou valores próximos de 1 na diagonal principal, indicando alta correlação entre os modos correspondentes, e valores próximos de 0 fora da diagonal, evidenciando a ortogonalidade entre modos distintos. Esse comportamento é característico de uma boa correspondência entre os modelos, conforme discutido por Singh et al. (2023), sendo amplamente aceito como critério de validação na análise modal experimental. Dessa forma, o aplicativo mostrou-se eficaz para a análise modal, sendo uma alternativa acessível e promissora para a comunidade acadêmica e profissional.

2. METODOLOGIA

2.1 Teste do martelo de impacto

Para a realização do teste com martelo de impacto, uma viga de aço foi inicialmente discretizada em nove pontos ao longo de seu comprimento. Em seguida, utilizou-se um martelo instrumentado com sensor de força da marca Brüel & Kjær, em conjunto com um acelerômetro, para medir a resposta dinâmica da estrutura. Os sinais adquiridos foram processados por um sistema de aquisição de dados da mesma marca, responsável pela conversão dos sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A coleta e a análise dos dados foram realizadas com o software Pulse LabShop.

Foi aplicado um impacto em cada ponto da viga, e as respostas em aceleração foram medidas e registradas. Com isso, foi possível obter as Funções de Resposta em Frequência (FRFs) da estrutura, especificamente do tipo acelerância, que relacionam a aceleração medida em função da força aplicada.

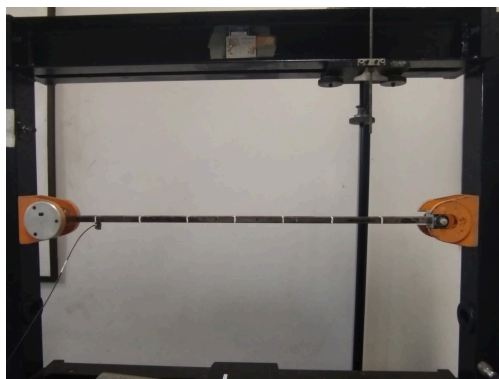


Figura 1. Viga discretizada em nove pontos na condição pinada-pinada

2.2 Construção do modelo teórico

Para a construção do modelo teórico utilizado na determinação dos parâmetros modais, foram empregadas as equações de sistemas contínuos considerando as condições de contorno engastada-engastada. Segundo Rao (2004), essas equações estão descritas na Equação 1, para o cálculo das frequências naturais, e na Equação 2, para a obtenção das formas modais. Os parâmetros utilizados no modelo estão apresentados na Tabela 1.

$$\omega_n = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

$$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x] \quad (2)$$

onde:

β = constantes para cada modo de vibração dadas por $\beta = n\pi/L$, onde $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, para cada modo de vibração;

l = comprimento da viga (m);

E = módulo de elasticidade (Pa);

I = momento de inércia da seção transversal da viga (m⁴);

A = área da seção transversal (m²);

ω_n = frequência angular (rad/s);

C_n = constante calculada pela condição de contorno da viga;

x = posição ao longo da viga.

Tabela 1. Dados da estrutura

Parâmetros	Valores	Unidade
Base (B)	0,0254	[m]
Altura (H)	0,0127	[m]
Comprimento (l)	0,8101	[m]
Módulo de elasticidade (E)	193,77	[GPa]
Massa específica (ρ)	7851,4580	[kg/m ³]

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados experimentais

A partir das Funções de Resposta em Frequência (FRFs) experimentais, o aplicativo realizou o processo de ajuste de curva, permitindo a determinação das frequências naturais e dos fatores de amortecimento dos modos de vibração da estrutura analisada. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, destacando os valores das frequências naturais e os respectivos fatores de amortecimento para os modos analisados

Tabela 2. Frequência natural e fator de amortecimento associado.

Parâmetros Modais		
Modo de vibração	Frequência Natural (Hz)	Fator de Amortecimento ξ
1	43,94	0,01526
2	176,54	0,00649
3	385,67	0,00721
4	681,62	0,00333

Na Figura 1-a, é apresentada a comparação entre a FRF experimental e a FRF reconstruída para onde estava localizado o acelerômetro (FRF local), enquanto na Figura 2-b, essa comparação é exibida para o quarto ponto.

Em ambas as figuras, observa-se que a curva da FRF reconstruída apresenta um ajuste visualmente satisfatório em relação aos dados experimentais. A maioria dos pontos da curva coincide com os valores obtidos experimentalmente, o que demonstra a eficácia do processo de ajuste de curva implementado no aplicativo. Esses resultados indicam que o

método aplicado é capaz de representar com precisão as características dinâmicas da estrutura analisada, validando sua aplicabilidade em estudos de análise modal. Embora a fase apresente uma maior discrepância em comparação aos dados experimentais, a magnitude mostrou boa concordância, especialmente nas regiões de pico de vibração, onde ocorrem as frequências naturais.

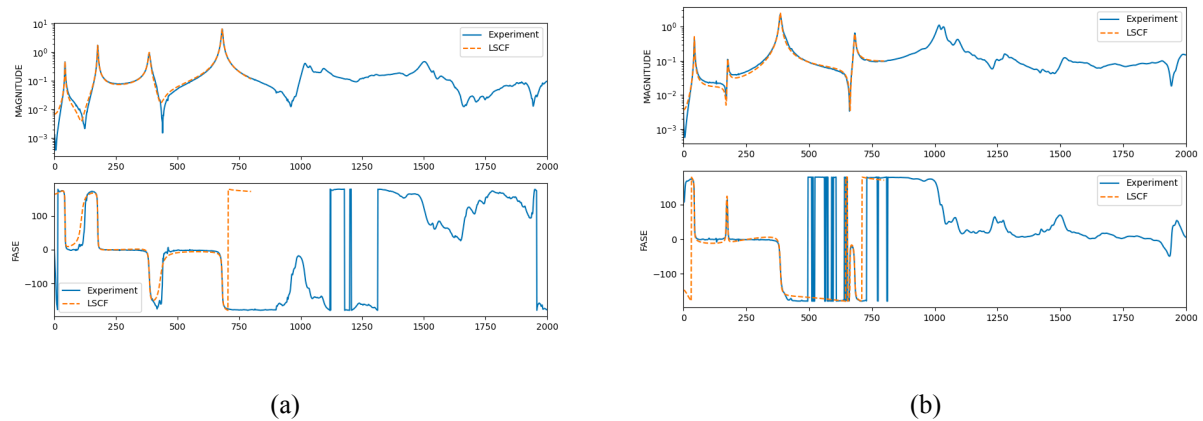


Figura 2. Comparação entre as FRFs medidas e reconstruídas (a) FRF local (b) Quarto ponto de medição

O aplicativo também dispõe de uma funcionalidade dedicada à visualização das formas modais, o que contribui para uma compreensão mais clara e intuitiva do comportamento dinâmico da estrutura. A Figura 3 ilustra as formas modais associadas aos quatro primeiros modos de vibração, evidenciando as deformações características de cada modo. Para uma representação mais suave e contínua, foi aplicado um processo de interpolação cúbica aos dados. Essa visualização possibilita uma análise mais detalhada das propriedades modais, facilitando a interpretação das respostas dinâmicas da estrutura.

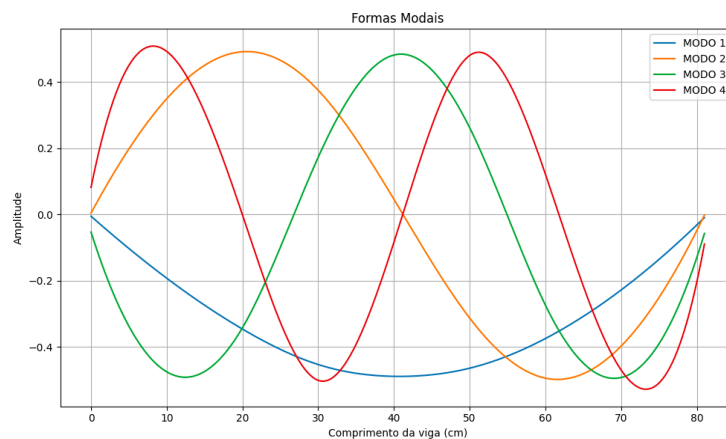


Figura 3. Quatro primeiras formas modais experimentais.

3.2 Resultados analíticos

Pelas equações de sistemas contínuos foi-se possível obter as frequências naturais para os quatro primeiros modos apresentados na Tabela 3. Além disso, tem-se na Figura 3 as formas modais para os quatros primeiros modos de vibração.

Tabela 1. Frequências naturais teóricas.

Modo de vibração	Frequência Natural (Hz)
1	43,61
2	174,42
3	392,45
4	697,69

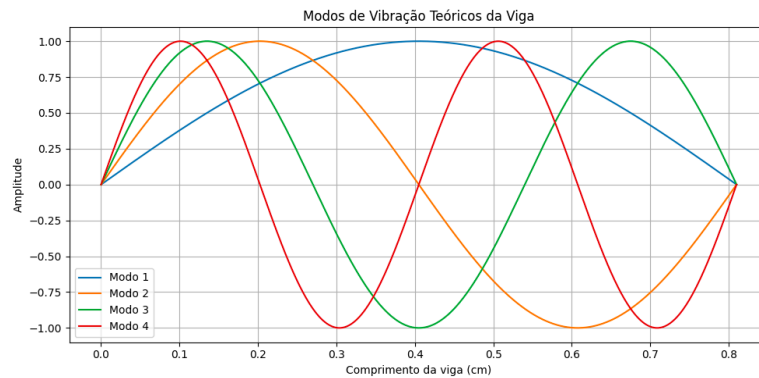


Figura 4. Quatro primeiras formas modais teóricas

3.3 MAC

Com isso, é possível plotar a Matriz de Correlação Modal (MAC) entre os modos obtidos experimentalmente e os modos analíticos, conforme apresentado na Figura 5. Observa-se que os valores ao longo da diagonal principal tendem a 1, indicando uma forte correlação entre os modos comparados, o que demonstra alta semelhança entre os modos experimentais e teóricos. Por outro lado, os valores fora da diagonal se aproximam de zero, evidenciando a ortogonalidade e independência linear entre os diferentes modos. Conforme discutido por Singh et al. (2023), esse comportamento é característico de uma boa identificação modal e valida a consistência entre o modelo numérico e os dados experimentais.

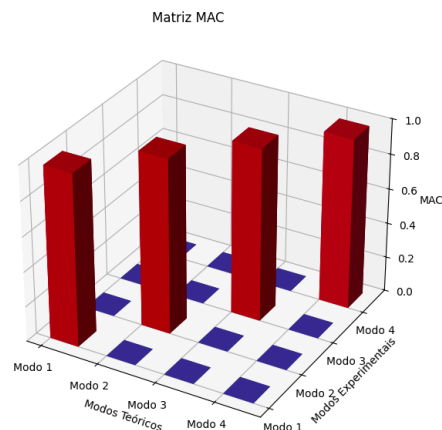


Figura 5: MAC entre modelo experimental e teórico.

3.4 Comparação dos modelos teóricos e experimentais

Com base na Tabela 3, é possível visualizar as frequências naturais obtidas analiticamente e experimentalmente, bem como o erro relativo entre elas. Observa-se que o menor erro ocorre na primeira frequência natural, enquanto os erros tendem a aumentar à medida que as frequências se elevam.

Tabela 3. Comparação das frequências naturais obtidas

Modo de vibração	Frequência Natural Teórica (Hz)	Frequência Natural Experimental (Hz)	Erro relativo (%)
1	43,61	43,94	0,75
2	174,42	176,54	1,20
3	392,45	385,67	1,76
4	697,69	681,62	2,36%

3.4 Apresentação da interface gráfica

A Figura 6 mostra a tela inicial, na qual é possível observar três botões: 'Inserir FRF', que permite procurar o local do arquivo UFF onde a FRF a ser utilizada está salva; 'Calcular Parâmetros', que fica acessível após a inserção da FRF; e 'Tutorial', que exibe uma mensagem explicativa sobre como utilizar o aplicativo.



Figura 6. Layout inicial

Após essa etapa, abre-se um diagrama de estabilidade onde é possível escolher os pólos para ajuste de curva, essa etapa é apresentada na Figura 7.

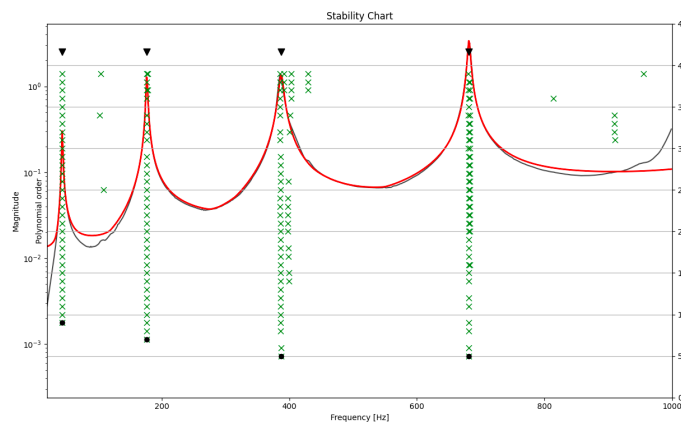


Figura 7. Diagrama de estabilidade

A Figura 8 apresenta um novo layout, onde é possível visualizar os resultados, incluindo as frequências naturais e os fatores de amortecimento; a FRF reconstruída para cada ponto medido; o MAC (Matriz de Correlação Modal), que permite inserir outra matriz para comparar com o modelo experimental; e as formas modais animadas.



Figura 8. Layout de apresentação dos resultados

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise modal experimental e teórica de uma viga, utilizando o teste de martelo de impacto. A viga foi discretizada em 9 pontos, e as FRFs foram coletadas para comparar os dados experimentais e os reconstruídos. A comparação visual entre as FRFs experimentais e reconstruídas mostrou uma boa concordância, indicando a precisão do processo de reconstrução.

O teste de Cálculo de Correlação Modal (MAC) demonstrou uma excelente correlação entre os modos experimentais e teóricos, com os valores ao longo da diagonal principal indicando uma correspondência quase perfeita entre os modos. Já os valores fora da diagonal se aproximaram de zero, evidenciando que os modos são linearmente independentes entre si. Esses resultados confirmam a alta precisão na correspondência entre os modos analisados.

As frequências naturais obtidas apresentaram um erro relativo baixo, indicando uma alta precisão entre os resultados experimentais e teóricos. A comparação das formas modais experimentais e analíticas também demonstrou uma boa similaridade, confirmando a consistência do modelo.

Por fim, a interface gráfica do aplicativo desenvolvido foi fundamental para a visualização e interpretação intuitiva dos resultados, facilitando a análise dos dados e a obtenção dos parâmetros modais. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia empregada foi eficaz, permitindo uma análise modal precisa e confiável.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal do Pará - UFPA

6. REFERÊNCIAS

- DAINESE, Yuri Garbin. Desenvolvimento de martelo de impacto de baixo custo para ensaio modal em estruturas. 2023.
- RAO, S. S. Mechanical Vibrations. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. ISBN 9780130489876.
- SANTOS, Josué Taveiro. Análise Modal Experimental de eixos trincados. 2007.
- SINGH, R.; KUMAR, A.; VERMA, A. K. Modal assurance criterion for correlation of experimental and numerical mode shapes in structural dynamics. *Journal of Measurements in Engineering*, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 89–99, 2023.
- RUSOVICI, Razvan; TOPPING, Daniel B. An experimental modal analysis of clavicle bending modes. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 13, n. 7, p. 16878140211034467, 2021.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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