

RELATO DE PRÁTICA PEDAGÓGICA: EXPERIMENTO DE CHLADNI

Marcelo Costa Martins¹

João Henrique Brandenburger Hoppe²

Gerson Alves Inácio³

Dados de Identificação

Disciplina: Vibrações Mecânicas

Período: 7º Período

Curso: Vibrações Mecânicas

Objetivo(s) da Ação

Capacitar aos discentes, através de uma demonstração realizada em sala, a compreensão dos conceitos importantes da engenharia mecânica e projeto mecânico acerca das vibrações mecânicas, como: Ressonância, frequências naturais, modos naturais, graus de liberdade, formas modais, nós e anti-nós, relação entre rigidez, massa e amplitude máxima de vibração.

Conteúdos Trabalhados

Um sistema simples composto por uma massa uma mola vibrando em um grau de liberdade tem apenas uma frequência natural. Isso quer dizer que se ele for perturbado para então oscilar livremente na direção vertical ele terá ciclos de movimento com o mesmo período, oscilando em sua frequência natural conforme demonstrado na Figura 1.

¹ Especialista em Gestão Empresarial (FGV), docente do UGB-FERP.

² Especialista em Segurança do Trabalho (UniFOA), docente do UGB-FERP.

³ Mestre em Engenharia Metalúrgica (UFF), docente do UGB-FERP.

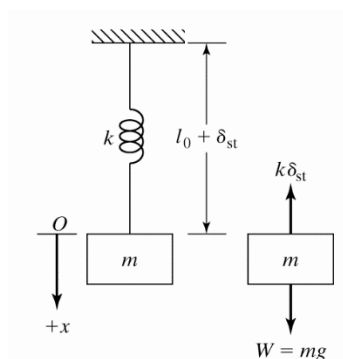


Figura 1 – Vibração livre em um grau de liberdade (Fonte: Rao, 2008.)

Se uma força $F(t)$ atuar sobre um sistema, o seu movimento vibratório pode ser obtido através da segunda lei de Newton e representado pela equação diferencial ordinária.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Onde m é a massa, c o coeficiente de amortecimento e k o coeficiente de rigidez.

O movimento harmônico de um sistema é representado matematicamente pela equação.

$$X(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

Onde X representam o deslocamento, A é a amplitude máxima do sinal vibratório, ω é a velocidade angular (ou frequência angular) em rad/s , φ o ângulo de fase e t o instante de tempo. A velocidade angular por sua vez pode ser obtida através da equação abaixo, onde T é o período do movimento e f a frequência em Hz.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

O deslocamento X pode ser expresso pela equação simplificada.

$$X = A \sin(\omega t)$$

A velocidade pode ser expressa por:

$$\frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t)$$

Sendo a aceleração:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t) = -\omega^2 x$$

Observando a segunda lei de Newton e o Princípio de D'Alembert para um sistema não amortecido, temos:

$$kx = -m\omega^2 x$$

Evidenciando a velocidade angular ω obtemos a frequência natural não amortecida ω_n , válida para sistemas com um grau de liberdade.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

A condição de ressonância ocorrerá quando a velocidade do motor gerador de ondas senoidais coincidir com uma das frequências naturais do sistema massa-corda.

$$\omega = \omega_{n_i}$$

O comportamento modal de uma estrutura refere-se às suas características de resposta vibracional, como frequências naturais e formas modais. Esses parâmetros são fundamentais para prever o desempenho da estrutura diante de solicitações dinâmicas, evitando fenômenos como ressonância, fadiga prematura ou falhas estruturais, mas sua demonstração em sala de aula torna-se muito complexa, especialmente numa visão tridimensional.

Formas modais são padrões de deformação no tempo. Em 2D (corda vibrante), sua demonstração torna-se significativamente mais simples, mas em 3D (ex.: asa de avião), são necessárias ferramentas de simulações MEF (Metodo de Elementos Finitos) permitindo visualizar os nós e anti-nós. A Figura 2 apresenta os 30 primeiros modos naturais de uma chapa de aço. Um modo natural é caracterizado por uma frequência natural (ω_n , em rad/s) e um vetor de forma modal (que descreve os deslocamentos relativos das partes do sistema) e estes dependem das condições de contorno, principalmente de rigidez, massa e amortecimento.

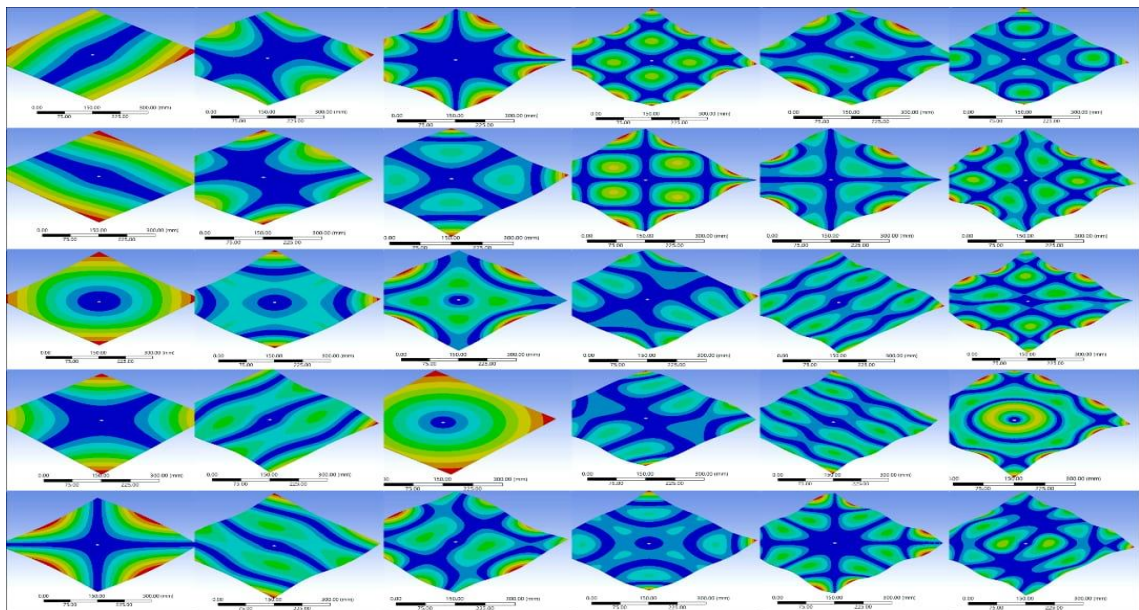


Figura 2 – Formas modais obtidas através do experimento computacional aço

Um nó é um ponto junto com uma onda estacionária onde a onda tem amplitude mínima. O oposto de um nó é um anti-nó, um ponto onde a amplitude da onda estacionária é máxima.

O experimento de Chladni é uma forma simples de introduzir aos discentes o estudo das formas modais, frequências naturais e ressonância. A visualização dos padrões formados em uma chapa fina excitada acusticamente por meio de uma fonte sonora pode ser obtida ao se depositar areia fina, sal, grãos de açúcar ou partículas semelhantes sobre a superfície da chapa durante sua vibração. Essa importante descoberta foi demonstrada por Ernst Chladni em 1787. As partículas finas, dispostas sobre a chapa submetida à excitação acústica, se reorganizam em padrões simétricos e esteticamente notáveis. Além de sua beleza visual, os chamados padrões de Chladni possuem aplicações práticas relevantes, especialmente na análise de vibrações em placas planas e na construção de instrumentos musicais, como violinos, guitarras e alto-falantes. (SUCIU; KARIMINE; YAMAZUMI; MITSUIISHI, 2025).

Materiais

Aparato para o experimento de Chladni, produzido por Costa et al (2025), contendo:

- Gerador de frequências senoidais (Android);



XIV SIMPÓSIO

DE PESQUISA E PRÁTICAS PEDAGÓGICAS DO UGB.



UGB
FERP



- Caixa de som;
- Alto falante;
- Suporte;
- Parafuso de fixação;
- Chapa de aço SAE 2610, com dimensões de 340 × 340 mm e espessura de 0,95 mm.

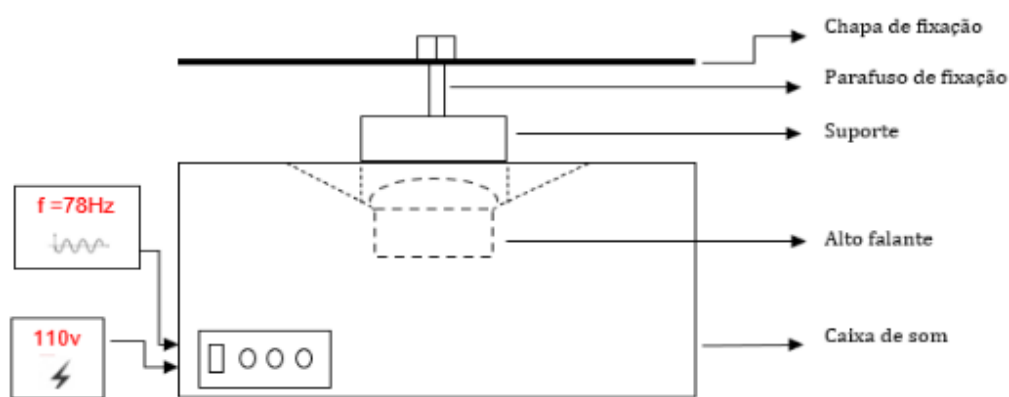


Figura 3 – Aparato para o experimento de Chaldni. (Costa et al, 2025)

Procedimentos

1. Conecte o gerador de frequências senoidais a caixa de som;
2. A chapa deve ser anexada ao suporte através do parafuso de fixação de forma que se toda sua superfície esteja nivelada;
3. Ligue a caixa de som a uma fonte de energia de corrente alternada de 110V;
4. Ligue o gerador de frequências senoidais e regulando o potenciômetro no aplicativo aumente a frequência gradativamente até encontrar a forma modal. A superfície da chapa deverá vibrar mais intensamente devido ao fenômeno da ressonância em aproximadamente 78 Hz. Observe o padrão visual formado na superfície da chapa;
5. Encontre os seguintes modos nas frequências de: 152 Hz, 186 Hz e 226 Hz observando os padrões visuais formados na superfície da chapa. Cada uma destas frequências deverá resultar nos respectivos padrões visuais trados baixo.



Figura 4. Experimento de Chladni com 78Hz (Costa et al, 2025)

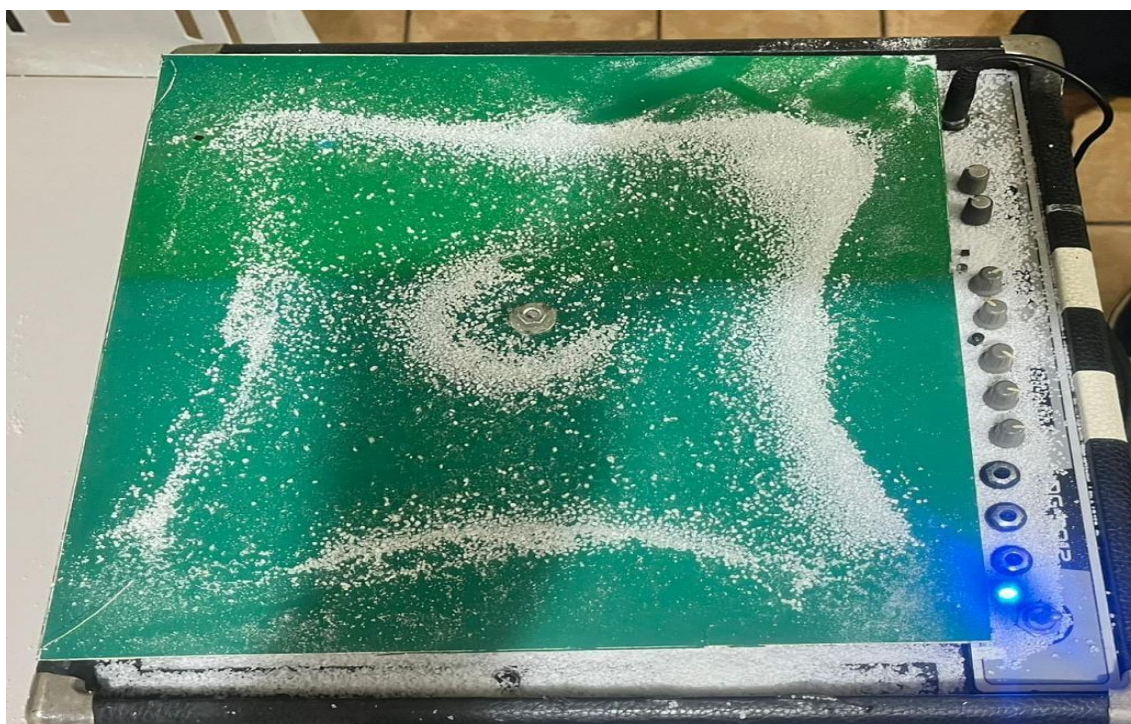


Figura 5. Experimento de Chladni com 152Hz (Costa et al, 2025)



Figura 6. Experimento de Chladni com 186Hz (Costa et al, 2025)

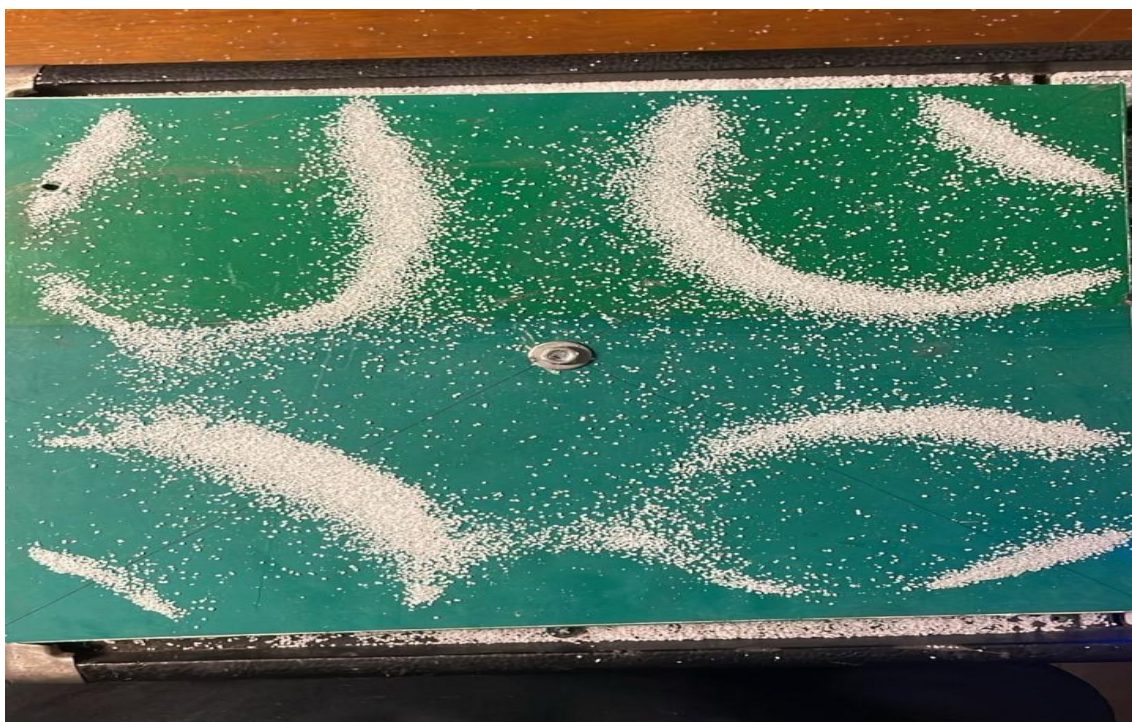


Figura 7. Experimento de Chladni com 226Hz (Costa et al, 2025)

As imagens ilustram a chapa metálica durante o experimento de Chladni, submetida à excitação sonora nas frequências de 78 Hz, 152 Hz, 186 Hz e 226 Hz. Nessas condições, o acúmulo de sal fino sobre a superfície evidencia a formação das linhas nodais, correspondentes às regiões de mínima vibração, enquanto as áreas livres de partículas indicam as zonas de máxima amplitude de oscilação (anti-nós).

A análise computacional foi desenvolvida com o intuito de determinar as frequências naturais e as formas modais teóricas da chapa de aço SAE 2610, de modo a permitir uma comparação direta com os resultados experimentais obtidos pelo método de Chladni. O estudo baseou-se na aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), implementado no software ANSYS 2025 R1 Student, reconhecido por sua precisão na simulação de fenômenos estruturais e dinâmicos.

O modo natural de 78,85 Hz apresenta grande semelhança visual da forma modal comparado ao padrão encontrado no experimento de Chladni.

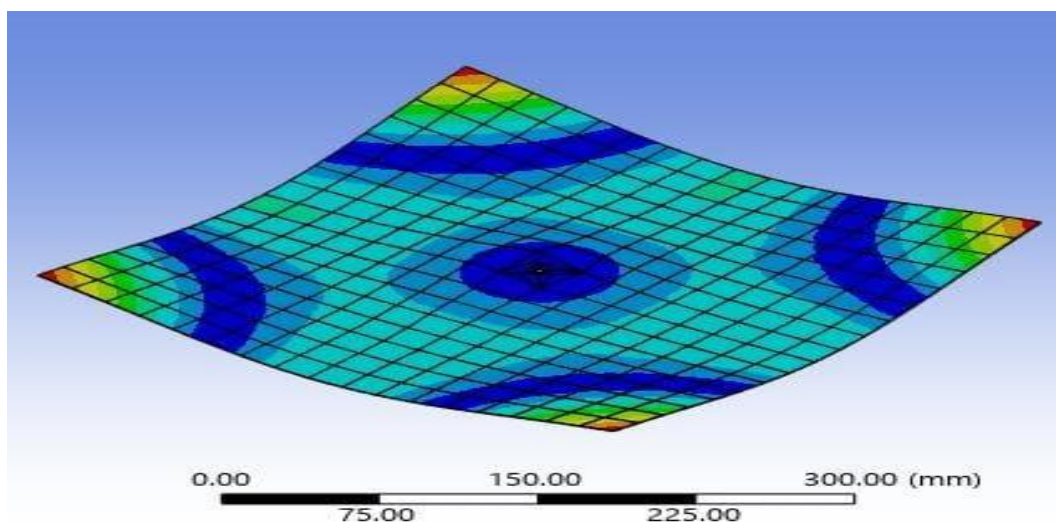


Figura 8. Análise modal computacional 78,85Hz (Costa et al, 2025)

O modo natural a seguir apresenta grande semelhança visual da forma modal comparado ao padrão encontrado no experimento de Chladni.

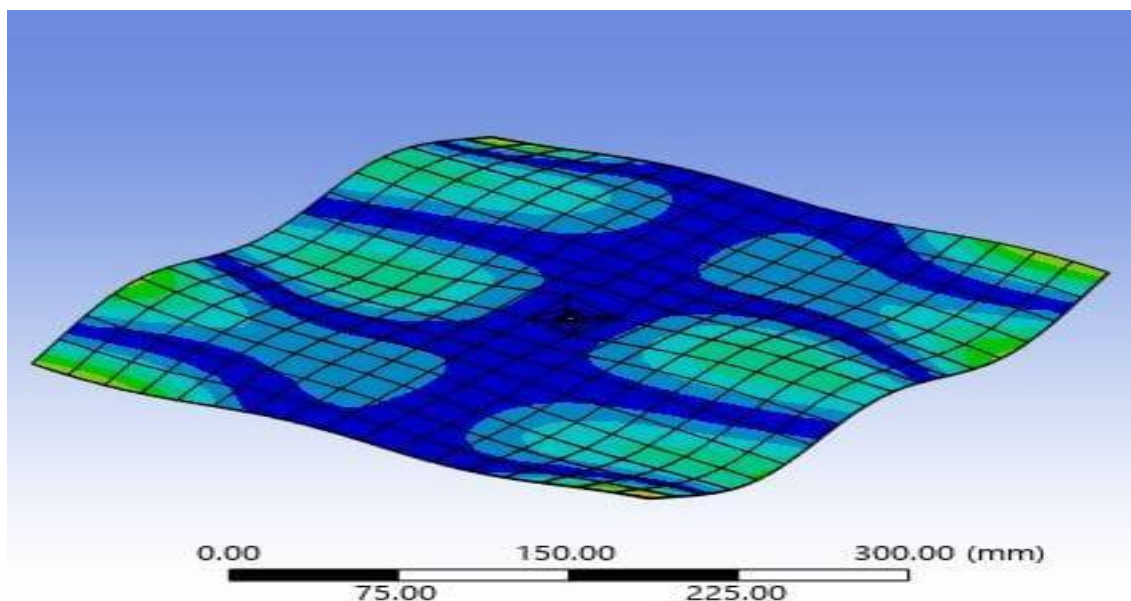


Figura 11. Análise modal computacional 226,10Hz (Costa et al, 2025)

Observa-se que os padrões formados apresentam simetria bem definida, com distribuições características de modos de vibração da chapa em suas respectivas frequências naturais. Esse comportamento confirma a coerência entre o fenômeno físico observado e os resultados teóricos previstos pela análise modal, demonstrando a capacidade do método de Chladni em revelar visualmente as formas modais características da chapa.

Resultados

Com o experimento foi possível demonstrar as formas modais e os conceitos relacionados. Sistemas reais, com muitos graus de liberdade são usualmente mais complexos do que o aparato utilizado, mas as características fundamentais permanecem as mesmas:

- Existem modos definidos de vibração, a forma de vibrar em cada frequência natural (que corresponde a um grau de liberdade) e quando a corda é excitada nestas determinadas frequências a resposta é de grande amplitude, caracterizando o fenômeno da ressonância.
- Os padrões de vibração característicos das formas modais dependem da frequência, havendo mais nós para as frequências mais altas.

Referências

COSTA, R.; SANTOS, A.; SILVA, F.; SOUZA, D. **Estudo do comportamento modal de uma chapa de aço SAE 2610 a partir do experimento de Chladni e modelamento numérico via o método de elementos finitos**, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Geraldo de Biase, Volta Redonda, 2025.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall; 2008.
SCHWARZ, B; RICHARDSON, M. **Experimental Modal Analysis**. California, CSI Reliability Week Proceedings, 1999.

SUCIU, C.; KARIMINE, H.; YAMAZUMI, T. MITSUISHI, M. **Chladni Figures in Modern Vibration Research**. *Journal of Applied Mechanics*, v. 92, 2025.