

Vibrações Mecânicas em Eixos Automotivos

Daniel Oliveira Miranda
daniel.miranda@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



Vibrações em eixos automotivos são um dos principais desafios na dinâmica veicular. Elas surgem porque eixos trabalham em altas rotações e são sensíveis a pequenas irregularidades.

Os principais efeitos das vibrações são:

- Aumento de ruído e desconforto (NVH).
- Desgaste acelerado de rolamentos, acoplamentos e juntas.
- Perda de eficiência e risco de falhas por ressonância.



Com a evolução dos veículos — especialmente híbridos e elétricos, que entregam torque instantâneo — o controle de vibrações tornou-se ainda mais crítico.

Este trabalho apresenta uma visão clara dos fenômenos vibratórios e sua importância no projeto automotivo moderno.



Revisão Teórica



A base da análise vibratória está no modelo massa–mola–amortecedor, que define como sistemas respondem a excitações externas.

Em eixos automotivos, o foco recai principalmente sobre:



✓ Vibração Torsional

Descrita pela rigidez torsional (k_t) e momento de inércia (I).

Determina como o eixo reage às variações periódicas de torque.

$$I\ddot{\theta}(t) + c_{\theta}\dot{\theta}(t) + k_{\theta}\theta(t) = T(t)$$

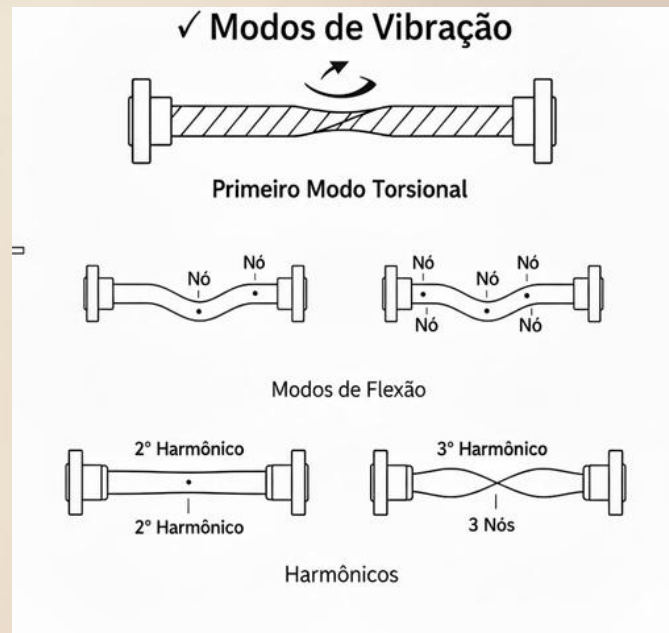


Revisão Teórica



✓ Modos de Vibração

- Primeiro modo torsional: torção uniforme; mais fácil de ser excitado.
- Modos de flexão: surgem nós e deslocamentos laterais, relevantes em altas rotações.
- Harmônicos: múltiplos da frequência natural, importantes para prever instabilidades.





Revisão Teórica





✓ Ressonância

- Fenômeno que ocorre quando a frequência de excitação coincide com a frequência natural do eixo.
- A vibração é amplificada rapidamente, mesmo com pequenas forças.
- Pode causar ruído elevado, aumento de tensões e risco de falhas.
- Evitar operar nessas faixas é fundamental no projeto automotivo.
- Surge principalmente por torque irregular, desbalanceamento e modos próprios do eixo.



Vibrações em Eixos Automotivos

-  Diferentes tipos de eixos apresentam comportamentos vibratórios próprios:
 - Cardan: mais suscetível a desbalanceamento e whirling.
 - Semi-eixo: vibrações torsionais dominantes.
 - Eixo rígido: baixa frequência natural, comum em veículos pesados.
 - Eixo independente: melhor desempenho NVH.
-  Principais fontes de excitação:
 - Desbalanceamento (forças centrífugas elevadas).
 - Desalinhamento.
 - Torque irregular de motores e engrenagens.
 - Folgas mecânicas, que geram impactos e não linearidades.



Metodologias de Análise

Análise

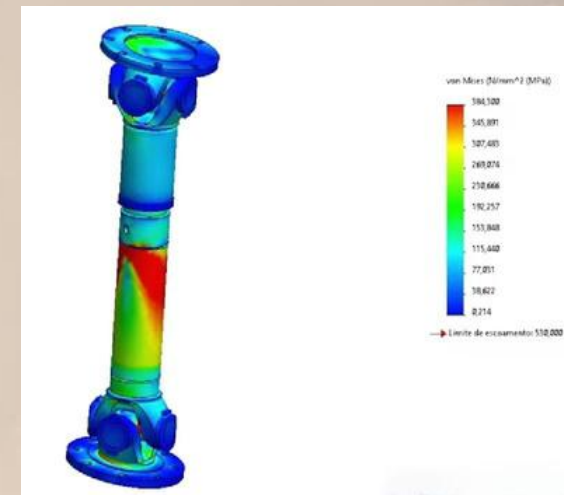
O cálculo da frequência crítica de um eixo rotativo é dado por:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_{eq}}{I_{eq}}}$$

k_{eq} é a rigidez equivalente e I_{eq} o momento de inércia

Método dos Elementos Finitos (FEM)

Modelos 3D permitem determinar modos de flexão e torção com precisão. O FEM possibilita mapear regiões de maior deformação e otimizar a geometria do eixo





Metodologias de Análise

Ensaios Experimentais

A análise modal experimental utiliza martelo instrumentado ou excitadores eletrodinâmicos. O resultado é o gráfico de FRF (Função de Resposta em Frequência), indicando frequências naturais e fatores de amortecimento

Exemplo Numérico

Considerando um eixo de aço com $I = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ e $k = 1500 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1500}{0,05}} = 173,2 \text{ rad/s} \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 27,5 \text{ Hz}$$

Logo, ressonâncias são esperadas próximas de 1650 rpm

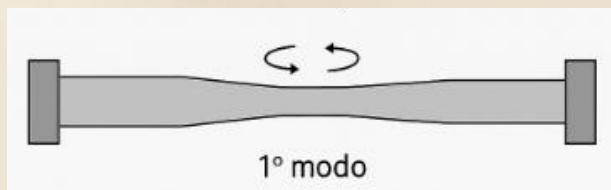


Resultados e Discussões

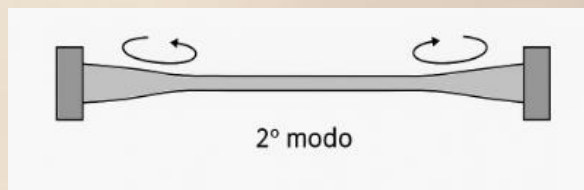
Modos de Vibração Identificados

Simulação numérica via Método dos Elementos Finitos (FEM) identifica os 3 primeiros modos de vibração torsional do eixo cardan

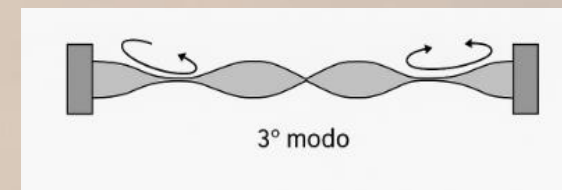
1º Torção uniforme:
Praticamente todo o eixo sofre deslocamento angular em relação a um dos apoios



2º Ponto nodal: indicando que metade do eixo gira em sentido oposto à outra metade.



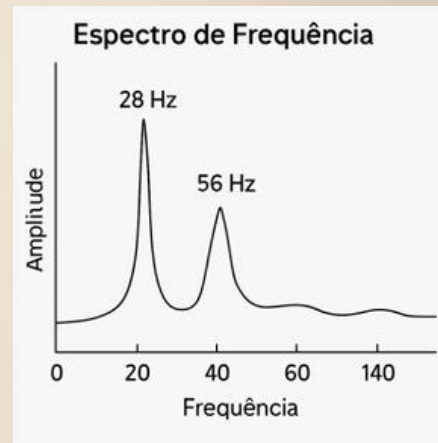
3º Dois pontos nodais: com alternância de regiões de maior e menor deslocamento angular.





Resultados e Discussões


- Análise experimental:** foi realizada aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre os sinais de vibração coletados durante o funcionamento do eixo cardan
- Picos de amplitude: 28 Hz e 56 Hz.
 - Valores em concordância: resultados obtidos via FEM, correspondendo respectivamente ao primeiro e segundo modos de torção do eixo



Ausência de picos relevantes em frequências superiores indica que, nas condições ensaiadas, o terceiro modo não foi excitado de maneira significativa




Resultados e Discussões

 A tabela mostra como o aumento do diâmetro do eixo afeta a frequência natural.

Diâmetro (mm)	Rigidez Torsional (N·m/rad)	fn (Hz)
40	1500	27,5
45	2100	32,5
50	2900	38,3



Estratégias de Mitigação

 Vibrações mecânicas em eixos automotivos afetam o conforto, a segurança e a durabilidade. São causadas por alta rotação, variações de torque, desbalanceamentos e características dos materiais. Para mitigá-las podemos utilizar:

Balanceamento dinâmico

- Reduz forças centrífugas
- Corrige a distribuição de massa
- Minimiza a excentricidade do eixo
- Garante um funcionamento mais suave
- Aumenta a vida útil dos mancais e rolamentos

Acoplamentos elásticos

- Filtra vibrações torsionais
- Reduz a transmissão direta de picos de torque
- Compensa pequenos desalinhamentos
- Reduz esforços adicionais na linha de transmissão.



Estratégias de Mitigação

Materiais compósitos

- Desloca a frequência crítica de ressonância
- Aumenta a rigidez e reduz o risco de entrar em ressonância

Controle ativo NVH

- Diminui a inércia e as cargas dinâmicas
- Controla rigidez e amortecimento intrínseco
- Eficiência energética


Eixos bipartidos

- Atenuação ativa das vibrações
- Tecnologia mais complexa e cara



Conclusões

- Vibrações em eixos afetam confiabilidade, desempenho e Conforto;
- Modos vibratórios dependem da geometria e materiais;
- Uso combinado de modelagem analítica + FEM + testes (FFT/FRF) garante resultados confiáveis;
- Aumento do diâmetro eleva segurança contra ressonância;
- Balanceamento dinâmico: essencial em altas rotações;
- Acoplamentos elásticos: reduzem vibração torsional;
- Eixos bipartidos: afastam frequências críticas;
- Materiais compósitos: leveza, rigidez ajustável e melhor amortecimento;
- Controle ativo (NVH): tendência futura, especialmente em veículos elétricos.

 **Conclusão Final:** A integração de soluções tradicionais + tecnologias avançadas é o caminho mais eficiente.

Obrigado Pela Atenção

