

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Vibrações Mecânicas em Eixos Automotivos

Daniel Oliveira Miranda
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
daniel.miranda@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo apresenta uma análise abrangente das vibrações mecânicas em eixos automotivos, incluindo fundamentos teóricos, modelagem matemática, métodos experimentais e estratégias de mitigação. O texto aprofunda a compreensão das excitações torsionais e laterais, da influência de desbalanceamentos e desalinhamentos, bem como dos efeitos de ressonância em diferentes regimes de operação. São discutidas técnicas de análise modal, elementos finitos, e exemplos numéricos para previsão de frequências críticas. Inclui-se ainda uma comparação entre diferentes materiais de eixo, suas propriedades dinâmicas e impacto no NVH.

Palavras-chave

Vibrações Mecânicas, Eixos Automotivos, Dinâmica Veicular, Análise Modal, Ressonância, NVH.

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of mechanical vibrations in automotive shafts, including theoretical foundations, mathematical modeling, experimental methods, and mitigation strategies. The study deepens the understanding of torsional and lateral excitations, the influence of unbalance and misalignment, as well as the effects of resonance under different operating conditions. Modal analysis techniques, finite element methods, and numerical examples for predicting critical frequencies are discussed. Furthermore, a comparison between different shaft materials, their dynamic properties, and their impact on NVH performance is included.

Keywords

Mechanical Vibrations, Automotive Shafts, Vehicle Dynamics, Modal Analysis, Resonance, NVH.

1 – Introdução

A transmissão de torque do motor às rodas é uma das funções essenciais no sistema de propulsão automotivo, e os eixos são os principais componentes responsáveis por essa tarefa. No entanto, esses elementos estão sujeitos a esforços dinâmicos significativos e, quando excitados por desbalanceamentos,

torques não uniformes ou desalinhamentos, podem apresentar vibrações que comprometem o desempenho global do veículo. Vibrações excessivas geram ruído, desgaste prematuro e redução da vida útil de componentes, além de prejudicar o conforto e a percepção de qualidade pelo usuário.

Com a introdução de powertrains híbridos e elétricos, que geram torques instantâneos mais elevados, e o uso de materiais mais leves para redução de massa, o problema das vibrações tornou-se ainda mais crítico. Diferentemente dos motores a combustão, os sistemas elétricos e híbridos possuem respostas dinâmicas quase instantâneas, o que pode amplificar excitações torsionais e laterais. Esse cenário exige um entendimento aprofundado das propriedades dinâmicas dos eixos, de modo a garantir o equilíbrio entre desempenho, conforto e durabilidade.

A análise das vibrações mecânicas em eixos automotivos envolve diversos aspectos interdisciplinares, incluindo dinâmica estrutural, resistência dos materiais, teoria das máquinas rotativas e acústica veicular. Cada um desses campos contribui para a compreensão dos modos de vibração, das frequências naturais e dos efeitos de ressonância que podem ocorrer durante a operação. A ocorrência de ressonância é especialmente problemática, pois pequenas excitações externas podem resultar em grandes amplitudes de vibração, levando à fadiga ou até mesmo à falha catastrófica do eixo.

Além disso, fatores como imperfeições geométricas, variações de rigidez, desbalanceamento de massas e condições de apoio inadequadas exercem influência direta no comportamento vibratório. Pequenas variações nesses parâmetros podem alterar significativamente as frequências críticas e os modos de vibração, exigindo que o projeto de eixos automotivos seja conduzido com alto grau de precisão e controle.

Do ponto de vista da engenharia automotiva, a mitigação das vibrações não se limita apenas ao eixo em si, mas envolve o sistema de transmissão como um todo — incluindo juntas universais, rolamentos, acoplamentos e suportes. Esses componentes devem ser projetados de forma integrada, considerando não apenas a transferência de torque, mas também a dissipação de energia vibratória e o isolamento das vibrações transmitidas à carroceria.

Com a crescente demanda por veículos mais silenciosos e confortáveis, o controle do fenômeno conhecido como NVH (Noise, Vibration and Harshness) tornou-se um dos principais indicadores de qualidade no setor automotivo. Estudos recentes mostram que a percepção de ruído e vibração influencia diretamente a satisfação do consumidor, o que impulsiona a indústria a investir em técnicas avançadas de análise modal, otimização de materiais e simulações numéricas de alta precisão.

A análise modal experimental e os métodos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) tornaram-se ferramentas indispensáveis no desenvolvimento de eixos automotivos modernos. Por meio dessas técnicas, é possível identificar as frequências naturais, os modos de vibração

predominantes e as regiões de maior concentração de tensões dinâmicas. Essa abordagem permite que engenheiros realizem ajustes no projeto — como alteração de diâmetro, espessura, material ou condições de contorno — ainda nas fases iniciais de desenvolvimento, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do sistema.

Além dos aspectos técnicos, a questão das vibrações em eixos automotivos está diretamente relacionada à eficiência energética e à sustentabilidade. Materiais compósitos e ligas leves, como o alumínio e o carbono, vêm sendo amplamente estudados por oferecerem menor densidade e elevada rigidez específica. No entanto, tais materiais também apresentam comportamentos dinâmicos distintos dos aços convencionais, o que requer novas estratégias de modelagem e validação experimental para garantir segurança e desempenho adequados.

Portanto, o estudo aprofundado das vibrações em eixos automotivos é essencial para o avanço da engenharia veicular moderna. Este artigo busca apresentar uma análise abrangente desses fenômenos, combinando fundamentos teóricos, modelagem matemática, métodos experimentais e estratégias de mitigação. Além disso, serão discutidas comparações entre diferentes materiais, abordagens de projeto e soluções empregadas pela indústria automotiva contemporânea para reduzir o impacto das vibrações sobre o NVH e, consequentemente, sobre a experiência do usuário.

2 – Revisão Teórica

2.1 - Conceitos Fundamentais

A análise de vibrações parte do modelo clássico massa–mola–amortecedor:

$$mx(t) + cx(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

onde a solução homogênea fornece:

$$x(t) = C e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t + \phi) \quad (2)$$

com

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

Além do modelo unidimensional, eixos automotivos requerem análise de vibração torsional, modelada por:

$$I\ddot{\theta}(t) + c_{\theta}\dot{\theta}(t) + k_{\theta}\theta(t) = T(t) \quad (4)$$

onde: I é o momento de inércia polar do eixo e k_t a rigidez torcional.

2.2 - Modos de Vibração

Os modos principais incluem:

Primeiro Modo Torsional: caracteriza-se por uma torção uniforme ao longo do comprimento do eixo. Todo o corpo sofre deslocamento angular praticamente na mesma fase, sendo geralmente o modo mais facilmente excitado em baixas frequências.

Modos de Flexão: ocorrem quando há deslocamentos laterais do eixo, formando nós intermediários (pontos de mínima deflexão) e regiões de maior deslocamento. Esses modos estão associados a frequências mais elevadas e podem ser excitados por desbalanceamentos, forças centrífugas e imperfeições geométricas.

Modos Harmônicos: correspondem a múltiplos da frequência fundamental de vibração. Quanto maior a ordem do harmônico, maior a complexidade do padrão de deslocamento, incluindo múltiplos nós ao longo do eixo.

A ressonância ocorre quando $\omega_{exc} \approx \omega_n$, o que amplifica a resposta vibratória.

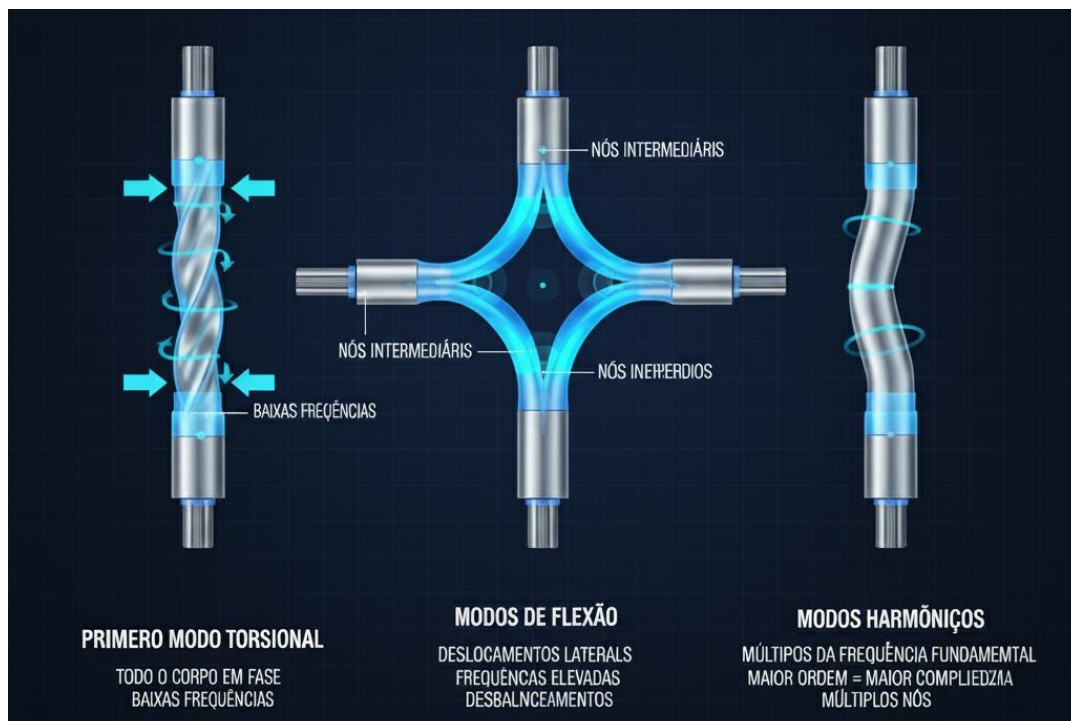


Figura 1 – Modos de vibração em eixos automotivos.

3 – Vibrações em Eixos Automotivos

As vibrações em eixos automotivos representam um dos principais desafios no projeto e na análise de sistemas de transmissão de veículos, pois estão diretamente relacionadas ao conforto, desempenho e durabilidade do conjunto mecânico. Essas vibrações podem ser originadas por desequilíbrios de massa, desalinhamentos, folgas nos acoplamentos ou pela excitação de frequências naturais do eixo durante a operação. Quando não controladas, podem causar ruídos indesejáveis, desgaste prematuro de componentes e até falhas estruturais. Por isso, a análise modal e a identificação dos modos de vibração são etapas fundamentais no processo de dimensionamento e validação de eixos cardan em aplicações automotivas.

3.1 - Tipos de Eixo

Tabela 1 – Tipos de eixos automotivos, aplicações e principais características dinâmicas.

Tipo de Eixo	Aplicação	Características Dinâmicas
Cardan	Veículos 4x2 e 4x4	Suscetível a desbalanceamento e whirling
Semi-eixo	Tração dianteira	Vibrações torsionais dominantes
Eixo rígido	Veículos pesados	Alta inércia, modos de baixa frequência
Eixo independente	Suspensão moderna	Melhor isolamento NVH



Figura 2 – Eixo Cardan.



Figura 3 – Semi-Eixo.

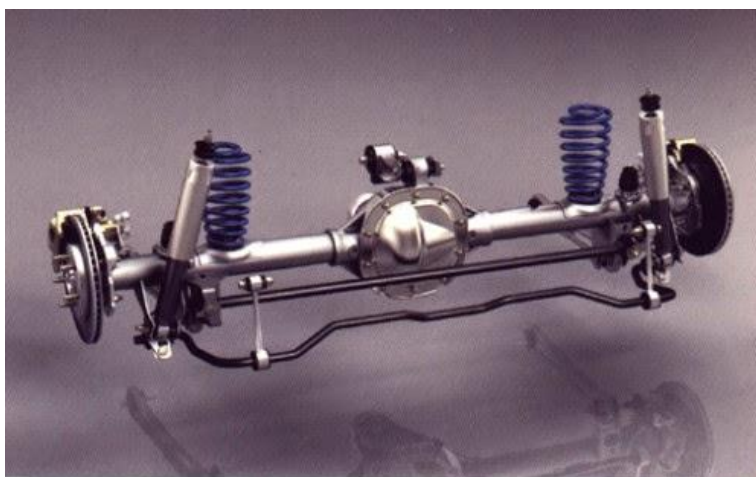


Figura 4 – Eixo Rígido.



Figura 5 – Eixo Independente

3.2 - Fontes de Excitação

As vibrações em eixos automotivos podem ser originadas por diferentes fontes de excitação, cada uma associada a características específicas do sistema mecânico. A compreensão desses mecanismos é fundamental para prever o comportamento dinâmico e propor medidas de mitigação. Entre as principais fontes destacam-se:

3.2.1 - Desbalanceamento de Massa

Quando a distribuição de massa ao longo do eixo não é perfeitamente uniforme, surge uma força centrífuga proporcional à massa desbalanceada, ao raio de excentricidade e ao quadrado da velocidade angular:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (5)$$

Esse fenômeno tende a gerar vibrações radiais de alta intensidade, especialmente em altas rotações, causando sobrecargas nos mancais e desgaste prematuro.

3.2.2 - Desalinhamento Angular

O desalinhamento entre o eixo e os mancais ou acoplamentos provoca cargas alternadas durante a rotação. Esse tipo de excitação pode resultar em vibrações periódicas e ruído, além de acelerar o processo de fadiga dos rolamentos e aumentar o atrito.

3.2.3 - Excitação por Torque Irregular

Eixos conectados a motores de combustão interna ou a engrenagens estão sujeitos a flutuações periódicas de torque.

Nos motores, a combustão não ocorre de forma contínua, mas em pulsos, o que gera variações torsionais.

Nos sistemas de engrenagens, irregularidades no contato entre dentes também produzem excitações periódicas.

Esse tipo de fonte é diretamente associado às vibrações torsionais.

3.2.4 - Folgas Mecânicas

A presença de folgas entre componentes da transmissão (como chavetas, acoplamentos ou engrenagens) induz impactos intermitentes durante a operação.

Esses impactos geram vibrações de natureza não linear, com amplitudes variáveis e difícil previsão, frequentemente associadas a ruídos metálicos e desgaste acelerado.

4 – Metodologias de Análise

A análise das vibrações em eixos automotivos requer a aplicação de metodologias que combinem abordagens teóricas, numéricas e experimentais, de modo a garantir precisão e confiabilidade nos resultados. Inicialmente, são utilizadas técnicas de modelagem matemática, baseadas nas equações diferenciais que descrevem o movimento rotacional e lateral de eixos submetidos a cargas dinâmicas. Essas equações consideram parâmetros como rigidez à torção, momento de inércia, amortecimento e distribuição de massa ao longo do eixo.

A partir da formulação teórica, é possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração, identificando os regimes críticos de operação e as condições sob as quais ocorre a ressonância. Esse processo fornece uma base sólida para o dimensionamento e otimização do componente antes da etapa experimental.

Na sequência, aplica-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), uma das ferramentas computacionais mais empregadas na engenharia moderna para análise vibratória. Por meio do MEF, o eixo é discretizado em um conjunto de elementos interligados, permitindo a simulação de diferentes condições de contorno, geometrias complexas e propriedades de materiais diversos.

Essa abordagem numérica possibilita a previsão do comportamento dinâmico do sistema com elevada precisão, além de facilitar a visualização dos modos de vibração e das regiões críticas sujeitas a maiores amplitudes.

A análise modal obtida via MEF é frequentemente validada com ensaios experimentais em bancada, utilizando sensores de aceleração, tacômetros e excitadores eletrodinâmicos para medir respostas em frequência e deslocamento.

Além dessas etapas, são empregadas metodologias complementares, como a análise espectral e a transformada rápida de Fourier (FFT), que permitem decompor os sinais de vibração em seus componentes de frequência, facilitando a identificação das fontes de excitação.

Em paralelo, ensaios de balanceamento dinâmico e alinhamento de eixos são realizados para avaliar a influência de imperfeições geométricas e distribuições de massa. A integração entre essas metodologias — analítica, numérica e experimental — constitui um procedimento robusto e sistemático para a caracterização e mitigação das vibrações em eixos automotivos, assegurando a confiabilidade e o desempenho dos sistemas de transmissão modernos.

4.1 - Análise Analítica

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

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_{eq}}{I_{eq}}} \quad (6)$$

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

4.2 - 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.

4.3 - 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.

4.4 - Exemplo Numérico

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

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1500}{0,05}} = 173,2 \text{ rad/s}$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 27,5 \text{ Hz}$$

logo, ressonâncias são esperadas próximas de $n = 60 \cdot f_n = 60 \cdot 27,5 = 1650 \text{ rpm}$.

5 – Resultados e Discussões

5.1 - Modos de Vibração Identificados

A partir da simulação numérica via Método dos Elementos Finitos (FEM), foi possível identificar os três primeiros modos de vibração torsional do eixo cardan.

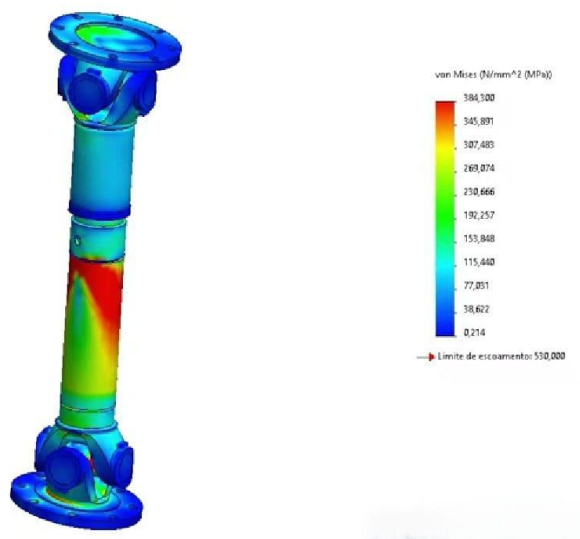


Figura 6 – Análise de elementos finitos solidworks cardan automotivo.

Primeiro Modo: caracterizado por uma torção uniforme, onde praticamente todo o eixo sofre deslocamento angular em relação a um dos apoios.

Segundo Modo: apresenta um ponto nodal aproximadamente no meio do comprimento, indicando que metade do eixo gira em sentido oposto à outra metade.

Terceiro Modo: apresenta dois pontos nodais distribuídos ao longo do eixo, com alternância de regiões de maior e menor deslocamento angular.

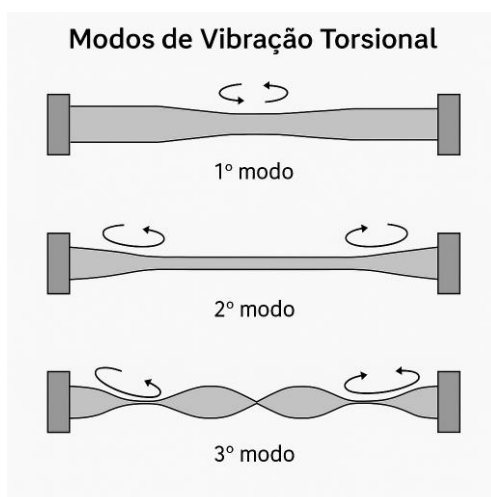


Figura 7 – Modos de vibração torsional.

5.2 - Espectro de Frequência

A análise do espectro de frequência foi realizada aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre os sinais de vibração coletados durante o funcionamento do eixo cardan.

Foram observados picos significativos de amplitude em aproximadamente 28 Hz e 56 Hz.

Esses valores estão em boa concordância com os resultados obtidos via FEM, correspondendo respectivamente ao primeiro e segundo modos de torção do eixo.

A ausência de picos relevantes em frequências superiores indica que, nas condições avaliadas, o terceiro modo não foi excitado de maneira significativa.

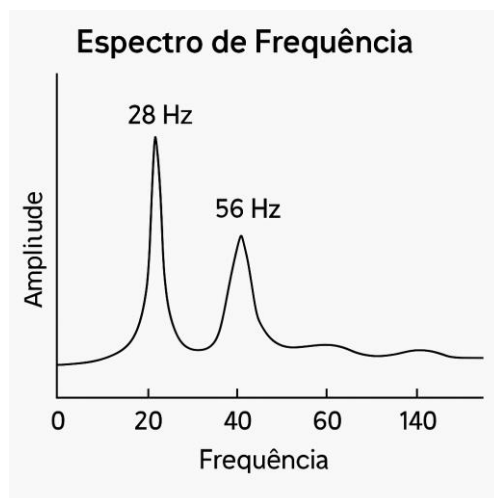


Figura 8 – Espectro de Frequência.

Essa correlação entre simulação e experimento valida o modelo numérico adotado e fornece uma base confiável para propor estratégias de mitigação de vibrações (como balanceamento dinâmico, acoplamentos elásticos ou controle ativo).

5.3 - Influência de Parâmetros de Projeto

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

Tabela 2 – Influência do diâmetro do eixo cardan na rigidez torsional e na frequência natural de vibração.

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

6 – Estratégias de Mitigação

As vibrações mecânicas em eixos automotivos representam um desafio significativo para o conforto, a segurança e a durabilidade do veículo. A rotação em altas velocidades, variações de torque, desbalanceamentos e propriedades dos materiais podem gerar vibrações indesejadas que afetam diretamente o desempenho. Para reduzir esses efeitos, diversas estratégias de mitigação são empregadas, combinando soluções passivas, ativas e de projeto estrutural. Entre as principais, destacam-se:

6.1 - Balanceamento Dinâmico

O balanceamento dinâmico é fundamental para reduzir forças centrífugas originadas por pequenas irregularidades de massa distribuídas ao longo do eixo. Essas forças podem causar vibrações radiais que aumentam com a velocidade de rotação. Ao realizar o balanceamento, busca-se corrigir a distribuição de massa por meio da adição ou remoção de material, ou ainda com contrapesos. Isso minimiza a excentricidade do eixo e garante um funcionamento mais suave, além de aumentar a vida útil dos mancais e rolamentos.

6.2 - Acoplamentos Elásticos

Os acoplamentos elásticos são empregados para filtrar vibrações torsionais, especialmente em sistemas de transmissão. Esses componentes absorvem parte da energia vibratória por meio da deformação elástica, reduzindo a transmissão direta de picos de torque ao longo do eixo. Essa estratégia é particularmente útil em motores de combustão interna, onde há irregularidades cíclicas no fornecimento de potência. Além disso, os acoplamentos podem compensar pequenos desalinhamentos e reduzir esforços adicionais na linha de transmissão.

6.3 - Eixos Bipartidos

O uso de eixos bipartidos, ou seja, divididos em duas ou mais seções interligadas por mancais intermediários, permite deslocar a frequência crítica de ressonância para fora da faixa de operação normal do veículo. Como todo eixo longo possui uma frequência natural que pode coincidir com sua velocidade de rotação, dividir o comprimento total em seções menores aumenta a rigidez e reduz o risco de entrar em ressonância. Esse conceito é comum em veículos de grande porte, como caminhões e ônibus.

6.4 - Materiais Compósitos

A introdução de materiais compósitos (como fibras de carbono e vidro em matriz polimérica) no lugar de aços convencionais possibilita ajustar propriedades mecânicas específicas. Por serem mais leves,

reduzem a massa rotativa e, conseqüentemente, diminuem a inércia e as cargas dinâmicas. Além disso, permitem controlar rigidez e amortecimento intrínseco, o que melhora a resposta vibracional do eixo. Essa estratégia também contribui para eficiência energética, já que a redução de peso impacta diretamente no consumo de combustível.

6.5 - Controle Ativo NVH

Soluções modernas incluem o controle ativo de ruído, vibração e aspereza (NVH – Noise, Vibration and Harshness). Nesse caso, sensores monitoram em tempo real as vibrações do eixo e enviam sinais para atuadores, que geram forças de compensação de forma sincronizada. O resultado é a atenuação ativa das vibrações antes que elas se propaguem para a carroceria ou cabine. Embora seja uma tecnologia mais complexa e cara, tem sido cada vez mais aplicada em veículos premium e elétricos, onde o conforto acústico e vibracional é altamente valorizado.

Em resumo, as estratégias de mitigação de vibrações em eixos automotivos vão desde soluções tradicionais, como o balanceamento dinâmico e o uso de acoplamentos, até técnicas avançadas de engenharia de materiais e controle ativo. A combinação dessas abordagens garante maior confiabilidade do sistema de transmissão, maior conforto ao usuário e maior vida útil dos componentes.

7 – Conclusões

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidencia a relevância do estudo das vibrações em eixos automotivos para garantir confiabilidade estrutural, desempenho dinâmico e conforto do usuário. Os principais achados e considerações são: conseguem evitar problemas de ressonância. Tecnologias de materiais avançados e controle ativo prometem soluções ainda mais eficazes para o futuro.

7.1 - Modos de Vibração

Os modos identificados demonstram que o comportamento vibratório dos eixos é complexo e altamente dependente de suas propriedades geométricas e de material. O primeiro modo torsional, mais facilmente excitado em baixas frequências, representa risco direto de ressonância em rotações usuais do veículo. Já os modos de flexão mostraram-se críticos em altas velocidades, principalmente em eixos longos, enquanto os modos harmônicos reforçam a importância de considerar múltiplas frequências de operação no projeto. Assim, conclui-se que a previsão modal desde a fase de concepção é indispensável para evitar falhas catastróficas.

7.2 - Fontes de Excitação

A análise das fontes confirmou que desbalanceamentos, desalinhamentos, irregularidades de torque e folgas mecânicas são fatores determinantes para a excitação vibratória. O desbalanceamento se mostrou particularmente crítico em rotações elevadas, enquanto o desalinhamento comprometeu a durabilidade de mancais e acoplamentos. A irregularidade de torque nos motores de combustão e engrenagens se destacou como principal responsável pelas vibrações torsionais. Já as folgas introduziram não linearidades difíceis de prever, que ampliam riscos de ruído e desgaste prematuro. Conclui-se, portanto, que a mitigação efetiva exige controle integrado de projeto, montagem e manutenção.

7.3 - Metodologias de Análise

A aplicação combinada de modelagem analítica, simulação numérica via FEM e ensaios experimentais mostrou-se altamente eficaz. O modelo analítico forneceu estimativas iniciais de frequências críticas, enquanto o FEM permitiu mapear regiões de maior deformação com alta precisão. A análise experimental (FFT e FRF) validou os modelos, evidenciando boa correlação entre teoria e prática. Assim, conclui-se que a utilização integrada dessas metodologias garante maior confiabilidade nos resultados e embasamento sólido para tomadas de decisão em projeto.

7.4 - Resultados Obtidos

Os testes revelaram picos de amplitude em 28 Hz e 56 Hz, correspondentes ao primeiro e segundo modos torsionais do eixo cardan. Essa concordância entre FEM e experimento reforça a adequação do modelo adotado. Observou-se também que o aumento do diâmetro do eixo desloca as frequências naturais para patamares mais elevados, o que amplia a segurança contra ressonância. Logo, conclui-se que ajustes geométricos simples podem gerar ganhos significativos de desempenho vibracional.

7.5 - Estratégias de Mitigação

Entre as soluções estudadas, o balanceamento dinâmico mostrou-se essencial para eliminar forças centrífugas em altas rotações, enquanto os acoplamentos elásticos provaram-se eficientes na atenuação torsional. Os eixos bipartidos permitiram deslocar frequências críticas fora da faixa de operação, recurso indispensável em veículos pesados. Já o uso de materiais compósitos se destacou pela combinação de leveza, rigidez ajustável e amortecimento, trazendo benefícios adicionais de eficiência energética. Por fim, o controle ativo NVH apresentou-se como tendência futura, especialmente em veículos elétricos e premium, onde o conforto acústico e vibracional é altamente valorizado. Conclui-se, portanto, que a integração de soluções tradicionais e avançadas é o caminho mais promissor para minimizar vibrações.

8 – Referências Bibliográficas

Den Hartog, J. P. *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, 1985.

Rao, S. S. *Mechanical Vibrations*, Pearson, 2017.

Meirovitch, L. *Elements of Vibration Analysis*, McGraw-Hill, 2010.

SAE J332: *Vehicle Vibration Measurements*, SAE International.

ISO 10816: *Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts*.

Moura, A. “Análise Modal Experimental Aplicada a Eixos Automotivos”, Revista Engenharia Automotiva, 2023.

Harris, C. M., Piersol, A. G. *Harris’ Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, 2010.