

*Revista Eletrônica*



*Volume 5 – Número 1 - 2025*

# Vibrações em Motores de Combustão Interna: Modelagem dos Modos de Vibração e Impactos na Vida Útil de Mancais e Virabrequins

**Jafar Mourad Mourad**

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo**

[jafar.m@aluno.ifsp.edu.br](mailto:jafar.m@aluno.ifsp.edu.br)

**João Pedro Gomes Tozzo**

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo**

[j.tozzo@aluno.ifsp.edu.br](mailto:j.tozzo@aluno.ifsp.edu.br)

## Resumo

Este artigo apresenta uma revisão técnica e uma modelagem básica dos modos de vibração em motores de combustão interna, com foco nas vibrações torcionais, flexionais e translacionais que afetam diretamente a vida útil de mancais e virabrequins. São abordados modelos analíticos (massa-mola-amortecedor, equação da viga de Euler–Bernoulli), métodos numéricos (lumped-parameter e elementos finitos), efeitos sobre lubrificação, desgaste e fadiga, e técnicas de mitigação (balanceamento, damper torsional, suportes resilientes). O artigo utiliza referências científicas e técnicas para fundamentar as recomendações para projeto e manutenção.

## Palavras-chave

Vibrações; Virabrequim; Mancais; Torção; Análise Modal; Fadiga.

## Abstract

This paper presents a technical review and a basic modeling of vibration modes in internal combustion engines, focusing on torsional, flexural, and translational vibrations that directly affect the service life of bearings and crankshafts. Analytical models (mass-spring-damper system, Euler–Bernoulli beam equation), numerical methods (lumped-parameter and finite element models), and their effects on lubrication, wear, and fatigue are discussed. Additionally, mitigation techniques such as balancing, torsional dampers, and resilient mounts are examined. The study is based on scientific references and technical papers to support its design and maintenance recommendations.

## Keywords

Vibrations; Combustion Engine; Crankshaft; Bearings; Torsion; Modal Analysis; Fatigue.

## 1 – Introdução

Os motores de combustão interna representam um dos maiores marcos da engenharia mecânica moderna. Desde sua aplicação em veículos automotivos, embarcações e geradores de energia, eles se tornaram fundamentais para a mobilidade global e para inúmeros processos industriais.

O princípio básico de funcionamento envolve a conversão da energia química do combustível em energia mecânica, transmitida ao virabrequim por meio do sistema pistão–biela–manivela. Essa conversão, aparentemente simples, exige componentes robustos capazes de suportar altas pressões, temperaturas elevadas e forças variáveis ao longo do ciclo.

Apesar da ascensão de tecnologias alternativas, como os motores elétricos, o MCI ainda predomina em diversos setores devido à sua elevada densidade energética, maturidade tecnológica e infraestrutura consolidada de abastecimento. No entanto, essa mesma robustez esconde desafios de confiabilidade e eficiência, sendo a vibração mecânica um dos pontos críticos para a durabilidade do motor.

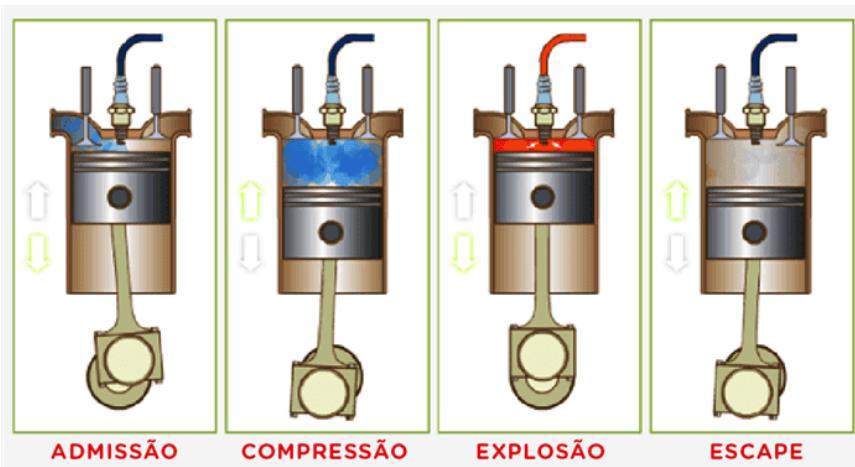


Figura 1- Esquema de um motor de combustão interna. *Fonte: blogdafpt (2016).*

### 1.1 – Análise Técnica do Funcionamento e dos Desafios de Confiabilidade em Motores de Combustão Interna de Quatro Tempos:

Os motores de combustão interna (MCI) são dispositivos capazes de transformar energia química em energia mecânica, sendo amplamente utilizados em automóveis, motocicletas, embarcações e equipamentos industriais. O modelo de quatro tempos, também conhecido como ciclo Otto ou ciclo Diesel, é o mais difundido devido à sua combinação de desempenho, eficiência e confiabilidade.

O funcionamento desses motores depende da sincronização precisa entre os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos, que controlam a entrada de ar e combustível, a ignição e a exaustão dos gases.

Embora o princípio de operação seja relativamente simples, o comportamento real do motor envolve fenômenos complexos, como transferência de calor, vibrações estruturais e desgaste de componentes, que exigem soluções de engenharia cada vez mais avançadas.

## 1.2 – Funcionamento do Ciclo de Quatro Tempos

### 1.2.1 – Admissão

No primeiro tempo, o pistão move-se para baixo dentro do cilindro, criando uma depressão que permite a entrada da mistura ar-combustível (nos motores Otto) ou apenas ar (nos motores Diesel). A válvula de admissão se abre para controlar o fluxo dessa mistura.

O desempenho dessa etapa depende da eficiência do enchimento do cilindro e da qualidade da mistura formada. Falhas na vedação das válvulas ou turbulência excessiva podem comprometer a combustão e aumentar o consumo.

### 1.2.2 – Compressão

Com as válvulas fechadas, o pistão sobe comprimindo a mistura, elevando a pressão e a temperatura internas. Essa compressão é essencial para garantir uma combustão eficiente e completa. A taxa de compressão deve ser cuidadosamente projetada: valores baixos reduzem o rendimento térmico, enquanto valores muito altos podem causar detonação, danificando o motor. O sistema de anéis do pistão tem papel fundamental na vedação do cilindro, evitando vazamentos e perda de potência.

### 1.2.3 – Combustão ou Explosão

Quando o pistão atinge o ponto morto superior, ocorre a ignição da mistura — provocada pela vela, no caso dos motores a gasolina, ou pela injeção direta do combustível no ar comprimido, nos motores Diesel.

A rápida expansão dos gases resultantes da combustão empurra o pistão para baixo, gerando o trabalho mecânico. Essa energia é transmitida pela biela ao virabrequim, que converte o movimento linear em rotação. Essa etapa é caracterizada por altas pressões e temperaturas, exigindo componentes resistentes e eficiente dissipação de calor.

### 1.2.4 – Escape

No último tempo, o pistão sobe novamente, expulsando os gases queimados através da válvula de escape. O sistema de exaustão conduz esses gases para fora do motor, passando por catalisadores e silenciadores que reduzem poluentes e ruídos.

Essa fase requer materiais capazes de suportar temperaturas superiores a 800 °C e manter a vedação eficiente entre os cilindros e as válvulas.

### 1.3 – Principais Componentes do Motor

O conjunto de elementos que compõe o motor inclui o virabrequim, responsável por converter o movimento alternado do pistão em rotação contínua; o comando de válvulas, que sincroniza as aberturas de admissão e escape; e os sistemas de lubrificação e arrefecimento, essenciais para reduzir o atrito e controlar a temperatura.

O avanço tecnológico dos motores modernos também inclui sensores eletrônicos, injeção controlada por unidade de comando (ECU) e sistemas de ignição inteligentes, que ajustam automaticamente o ponto de ignição e a mistura ar-combustível.

### 1.4. – Desafios de Confiabilidade e Eficiência

Apesar de sua maturidade tecnológica, os motores de combustão interna apresentam uma série de limitações e desafios que afetam seu desempenho e durabilidade.

#### 1.4.1 – Vibrações Mecânicas

As vibrações resultam das forças alternadas geradas pelos pistões e explosões dentro dos cilindros. Esse fenômeno pode causar desgaste prematuro, fadiga em mancais e trincas em componentes estruturais. O balanceamento dinâmico do virabrequim e o uso de suportes amortecedores são medidas comuns para mitigar esse problema.

#### 1.4.2 – Perdas Térmicas

A eficiência térmica de um motor de combustão raramente ultrapassa 35%, pois grande parte da energia liberada é dissipada na forma de calor através do sistema de arrefecimento e do escapamento. Tecnologias como turbocompressores, recirculação de gases (EGR) e recuperação de calor visam reduzir essas perdas e aumentar a eficiência global.

#### 1.4.3 – Desgaste e Atrito

As superfícies de contato entre pistão, biela e virabrequim estão sujeitas a atrito contínuo. O sistema de lubrificação tem papel essencial na formação de uma película protetora de óleo que evita o contato direto entre metais. O controle da viscosidade do óleo e o intervalo correto de troca são fundamentais para a longevidade do motor.

#### 1.4.4 – Controle Eletrônico e Mistura Ar-Combustível

A qualidade da mistura ar-combustível e o momento exato da ignição influenciam diretamente o consumo e as emissões. O gerenciamento eletrônico do motor ajusta esses parâmetros em tempo real, de acordo com as condições de carga e temperatura. Falhas em sensores ou atuadores podem causar aumento de consumo e redução de potência.

#### 1.4.5 – Emissões e Sustentabilidade

A preocupação ambiental exige motores cada vez mais limpos e eficientes. A utilização de combustíveis alternativos, como etanol e gás natural, bem como sistemas catalíticos avançados, têm contribuído para a redução dos poluentes emitidos. Contudo, o desafio de equilibrar desempenho e sustentabilidade permanece constante.

### 1.5 – O Problema das Vibrações em Motores

Todo motor de combustão interna, ao operar, gera vibrações inevitáveis. Essas vibrações resultam de forças alternadas de combustão, desequilíbrios dinâmicos, esforços iniciais e acoplamentos com sistemas auxiliares (como embreagens e volantes). Entre os diferentes tipos de vibração, destacam-se:

**Torcional:** associada à torção do virabrequim.

**Axial/Longitudinal:** relacionada ao deslocamento ao longo do eixo do virabrequim.

**Flexional** – resultante da flexão devido a cargas radiais.

Pesquisas, como a de Idehara [1], mostram que vibrações longitudinais, embora menos intensas que as torcionais, podem provocar desgaste acelerado em mancais, anéis de pistão e até mesmo falhas prematuras no virabrequim.

Além do desgaste físico, vibrações também geram ruídos indesejados, reduzem a eficiência energética e comprometem o conforto do usuário.

### 1.6 – Relevância do Estudo e Justificativa

Podemos justificar a relevância do estudo das vibrações em motores por dois grandes fatores:

**Eficiência energética:** Vibrações excessivas em motores levam a perdas por atrito e dissipação de energia. Em um contexto de busca por motores mais econômicos e eficientes, compreender esses fenômenos se torna de grande importância.

**Durabilidade:** A vida útil de mancais e virabrequins está diretamente relacionada à intensidade das vibrações. Reduzir esforços prolonga a vida do motor e diminui custos de manutenção.

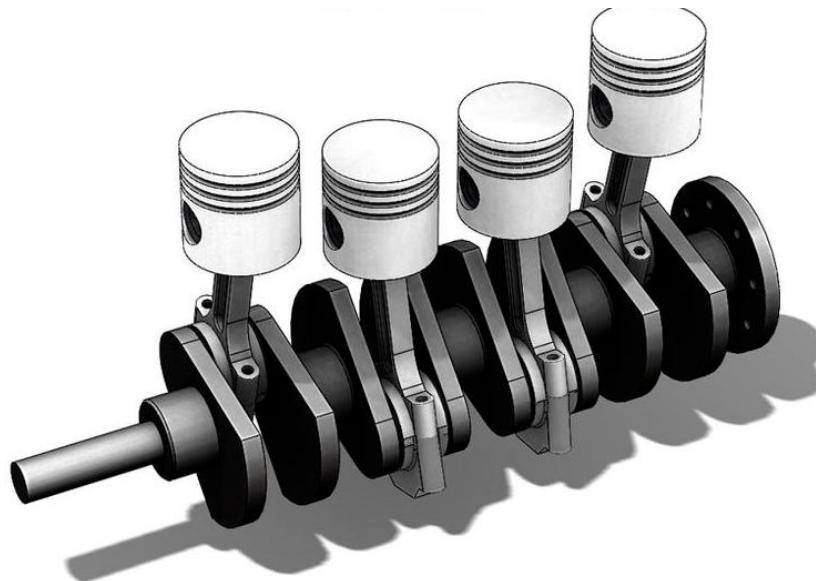


Figura 2 - Conjunto pistão, biela e virabrequim.

### 1.7 – Objetivo

Este artigo tem como objetivo a análise do fenômeno de vibração em motores de combustão interna com foco no comportamento do virabrequim e dos mancais principais. Busca-se: Investigar a relação entre vibração e desgaste prematuro do virabrequim, avaliar como esses modos influenciam esforços dinâmicos sobre mancais e discutir possíveis soluções de projeto para mitigação das vibrações.

## 2 – Tipos de Vibrações em Motores de Combustão Interna

As vibrações podem ser classificadas por sua origem e comportamento temporal, essas vibrações podem ser classificadas em três tipos principais:

**Vibração torcional:** ocorre devido à aplicação de forças tangenciais sobre o virabrequim, que provocam torções periódicas. É a mais estudada, pois pode levar à ressonância em determinadas velocidades de rotação.

**Vibração flexional:** resulta da ação de forças radiais sobre o virabrequim, que o fazem se curvar ou dobrar. Contribuem para o desgaste em mancais e blocos de motor.

**Vibração longitudinal (axial):** causada por forças que atuam ao longo do eixo do virabrequim.

Por muito tempo foi considerada secundária, mas estudos como o de Idehara [1] mostram que, em determinadas condições, esse movimento pode ser crítico para a durabilidade de mancais.

Em motores de combustão interna, a vibração forçada e as componentes torcionais costumam ser críticas porque os torques gerados pelos cilindros apresentam harmônicos que podem coincidir com frequências naturais do eixo, levando à ressonância e aumento significativo de tensões.

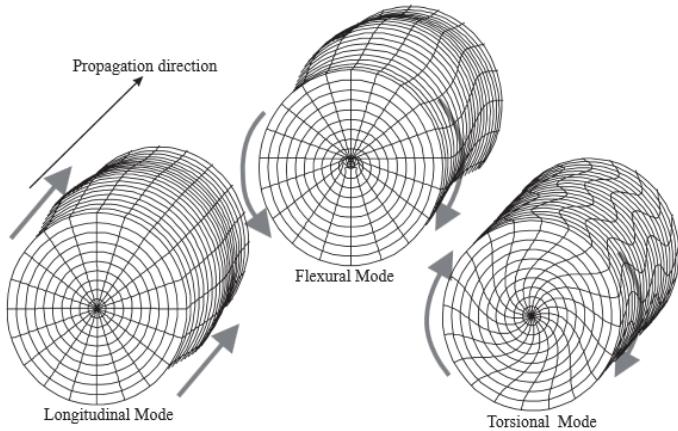


Figura 3 - Tipos de vibrações (axial, flexional e torcional).

## 2.1 – Conceito de Modos de Vibração e Frequências Naturais

Um motor de combustão interna pode ser modelado como um sistema dinâmico com múltiplos graus de liberdade. Cada grau de liberdade está associado a um tipo de deslocamento ou rotação possível. Nesse contexto:

**Modos de vibração:** correspondem às formas específicas pelas quais o sistema tende a oscilar naturalmente quando perturbado.

**Frequências naturais:** são as frequências em que essas oscilações ocorrem.

Se a frequência de excitação (gerada pela combustão ou forças inerciais) coincidir com uma frequência natural, ocorre a ressonância, fenômeno que pode amplificar deslocamentos e esforços, levando a falhas catastróficas.

$$H(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2}} \quad (1)$$

$$\theta(\Omega) = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta\Omega}{1-\Omega^2} \right) \quad (2)$$

A partir das equações 1 e 2, obtém-se os gráficos da figura 4, representativos da amplitude adimensional e da fase em função da razão de frequência ( $\Omega$ ) e do fator de amortecimento ( $\zeta$ ). Esses parâmetros ( $\Omega$  e  $\zeta$ ) são dados pelas equações 3 e 4, respectivamente:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{c}{2M\omega_n} \quad (4)$$

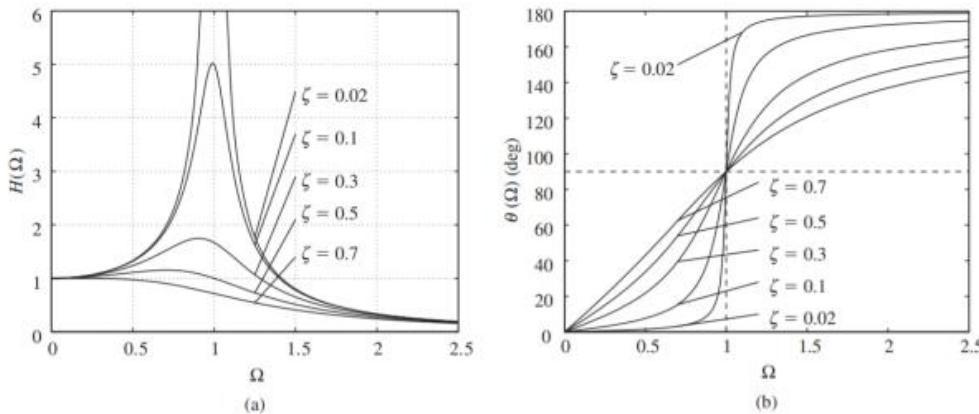


Figura 4 - (a) Amplitude Adimensional em função de  $\Omega$  (b) Fase em função de  $\Omega$ .

Fonte: Balachandran (2009).

Ao fazer uma análise dos gráficos da Figura 4, percebe-se que quando a razão de frequência ( $\Omega$ ) é aproximadamente 1, a amplitude sobe significativamente e o ângulo de fase é, aproximadamente, 90°.

Quando esse fenômeno ocorre, temos a ressonância. Para a preservação estrutural de um sistema, recomenda-se que a razão de frequência ( $\Omega$ ) não se aproxime de 1.

## 2.2 – Modelos Dinâmicos de Vibração em Motores

**Modelos de um Grau de Liberdade (1 GDL):** Usados para introduzir conceitos básicos, como sistemas massa–mola–amortecedor.

**Modelos de Múltiplos Graus de Liberdade (n GDL):** representam de forma mais realista o virabrequim, incluindo massas concentradas, rigidez torcional e axial, além de amortecimentos.

**Método dos elementos finitos (MEF):** aplicado em simulações computacionais detalhadas, permitindo análises mais completas (torsão–flexão acoplada, distribuição de tensões, concentração de tensões nos filetes), além de análises de geometrias complexas e interação com mancais.

**Modelos Acoplados Fluido–Estrutura:** importantes quando se considera a lubrificação nos mancais, já que o filme de óleo influencia diretamente a resposta dinâmica do sistema.

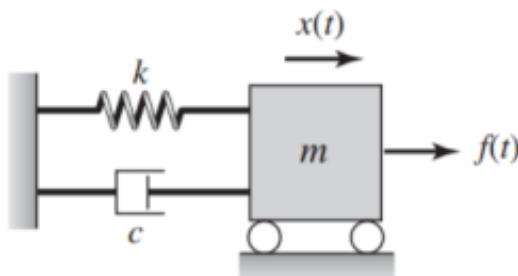


Figura 5 - Sistema massa-mola-amortecedor. Fonte: Balachandran (2009).

### 2.3 – Relevância da Modelagem Teórica para a Engenharia

A modelagem teórica de vibrações não é apenas um exercício acadêmico, mas uma ferramenta essencial na engenharia. Com ela podemos prever a vida útil de mancais e virabrequins sob diferentes condições de operação. Identificar rotações críticas e definir limites seguros de funcionamento. Reduzir custos de prototipagem, já que simulações computacionais antecipam falhas potenciais.

## 3 – Modelagem do Sistema Biela-Manivela e Virabrequim

O mecanismo biela manivela é um mecanismo utilizado para transmitir a energia piezométrica, oriunda do fenômeno da combustão, até o eixo virabrequim. Esse mecanismo é composto por: pistão, biela, pino de conexão, bucha, bronzina e por uma parte do virabrequim, que é constituído por dois moentes, um munhão e pelas hastes que conectam essas estruturas. A Figura 6 ilustra a vista lateral de um mecanismo biela manivela.

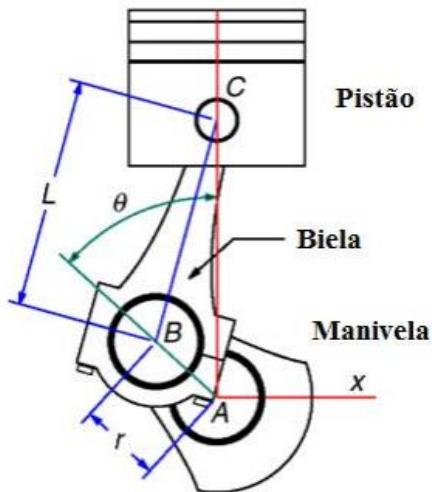


Figura 6 - Vista lateral de um mecanismo biela e manivela.

### 3.1 – Cinemática do Sistema Biela-Manivela

O sistema pistão-biela-manivela é o coração do motor de combustão interna. Ele transforma o movimento retilíneo alternativo do pistão em movimento rotativo contínuo no virabrequim.

A posição do pistão dada por  $x$  pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$x = r \cdot \cos \omega t + \left\{ l \cdot \sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{r}{l} \cdot \sin \omega t^2 \right) \right]} \right\} \quad (5)$$

Derivando a posição  $x$  do pistão obtemos a velocidade:

$$\frac{dx}{dt} = -r \cdot \omega \left[ \operatorname{sen} \omega t + \frac{t \cdot \operatorname{sen}^2 \omega t}{2l \sqrt{\left( \frac{r}{l \cdot \operatorname{sen} \omega t} \right)^2}} \right] \quad (6)$$

Derivando novamente, obtém-se a aceleração do pistão:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -r \cdot \omega \left[ \operatorname{cos} \omega t - \frac{r(l^2(1-2\operatorname{cos} \omega t)r^2 \cdot \operatorname{sen} \omega t)}{l^2 - \frac{(r \cdot \operatorname{sen} \omega t)^3}{2}} \right] \quad (7)$$

Considerando um grau de liberdade translacional, o modelo massa-mola-amortecedor é descrito por:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (8)$$

onde  $m$  é a massa equivalente,  $c$  o coeficiente de amortecimento,  $k$  a rigidez equivalente e  $F(t)$  a força excitadora (por exemplo, resultante das forças iniciais dos pistões).

Para uma excitação harmônica  $F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t)$ , a resposta estacionária (amplitude) é dada por:

$$X(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(k-m \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega)^2}} \quad (9)$$

A frequência natural do sistema é  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ . Em projeto, convém evitar regimes de operação em que  $\omega$  (frequência de excitação)  $\approx \omega_n$  para não incorrer em ressonância.

### 3.2 – Vibração Torcional do Virabrequim

Para modos torsionais, a equação correspondente num elemento de eixo é análoga:

$$J \cdot \ddot{\theta} + c_t \cdot \dot{\theta} + K_t \cdot \theta = T(t) \quad (10)$$

onde  $J$  é o momento de inércia polar,  $\theta$  a rotação angular,  $c_t$  amortecimento torsional e  $K_t$  rigidez torsional do segmento. A rigidez  $K_t$  de um eixo circular com raio polar  $J_p$  e módulo de cisalhamento  $G$  pode ser aproximada por  $K_t = \frac{G \cdot J_p}{L}$  (para segmento de comprimento  $L$ ).

Os torques de excitação em motores são compostos por componentes de gás e de inércia. A decomposição por harmônicos permite identificar quais ordens de torque (1<sup>a</sup> ordem, 2<sup>a</sup> ordem, etc.) podem coincidir com frequências naturais torsionais do virabrequim, levando à necessidade de projetar dampers ou alterar a rigidez do conjunto (Johnston et al., análise de vibrações torsionais em geradores diesel).

### 3.3 – Equação da Viga e Modos Próprios

A flexão do virabrequim pode ser analisada aproximadamente pela equação da viga de Euler–Bernoulli:

$$E \cdot I \cdot \left( \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) + \rho \cdot A \cdot \left( \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (11)$$

onde  $E$  é o módulo de Young,  $I$  o momento de inércia da seção transversal,  $\rho$  a densidade e  $A$  a área. As condições de contorno (apoios nos mancais) e as massas concentradas (pinos de manivela, contrapesos) alteram significativamente as frequências próprias e as formas modais.

Em prática, o virabrequim é modelado por uma viga com massas concentradas e ligações elásticas (mancais), resultando em um sistema de graus de liberdade múltiplos que exige solução numérica para obtenção das frequências naturais.

## 4 – Efeitos Dinâmicos nos Mancais e Virabrequim

As vibrações afetam mancais e virabrequim por meio de esforços cíclicos, variações de carga no filme de óleo, aumento de temperatura e possibilidade de contato metal-metal em casos de lubrificação deficiente. A seguir, são descritos os principais mecanismos de dano.

### 4.1 – Lubrificação Hidrodinâmica e Perturbações

Mancais hidrodinâmicos sustentam o virabrequim por meio de um filme de óleo. A equação de Reynolds (1D/2D) governa a pressão do filme em função da geometria das folgas, viscosidade do óleo e velocidade relativa. Vibrações causam oscilações na espessura do filme, potencialmente reduzindo a capacidade de suporte e causando contato asperidade-por-asperidade quando a espessura se aproxima

de zero. Estudos experimentais e numéricos (Chen et al., 2023) demonstram que desgaste e perturbações no filme alteram as assinaturas vibracionais, sendo úteis para diagnóstico de falhas.

#### 4.2 – Fadiga e Vida Útil (S-N e Miner's rule)

A vida por fadiga de componentes submetidos a carregamento cíclico pode ser estimada via curvas S–N (amplitude de tensão vs. número de ciclos até falha). Para cargas variáveis, a regra de Palmgren–Miner fornece uma aproximação da deterioração acumulada:

$$D = \sum \left( \frac{n_i}{N_i} \right) \quad (12)$$

onde  $n_i$  é o número de ciclos aplicados à amplitude  $i$  e  $N_i$  é o número de ciclos até falha a essa amplitude. Falhas ocorrem quando  $D \geq 1$ .

Vibrações torsionais combinadas com flexão aumentam a amplitude efetiva de tensão nos filetes e pinos, reduzindo drasticamente  $N_i$ . Investigações de falhas do virabrequim (Kareem & Akpan, 2018) mostram que zonas de concentração típicas iniciam trincas devido a tensões alternadas de alta frequência.

### 5 – Métodos de mitigação das vibrações

A mitigação pode atuar sobre a fonte (reduzir excitação) ou sobre a resposta (aumentar rigidez/amortecimento). Técnicas comuns:

Balanceamento e configuração do motor (redução das forças iniciais);

Absorvedores e dampers torsionais (redução da amplitude torsional);

Suportes isolantes e montagem elástica (redução da transmissão para a estrutura);

Projeto do virabrequim (aumento de rigidez, controle de raios de filete, tratamentos superficiais);

Manutenção da lubrificação e monitoramento por vibração (diagnóstico precoce).

**Balance shafts:** Em motores de 1 e 2 cilindros, e em motores de configuração com desequilíbrio inerente, introduz-se eixos de balanceamento que geram forças e momentos opostos aos das massas reciprocantes, reduzindo a excitação transmitida. Estudos recentes e patentes descrevem otimizações geométricas desses eixos para melhora de NVH.

**Dampers torsionais:** O amortecedor harmônico (Harmonic Damper) acoplado geralmente à extremidade dianteira do virabrequim usa um elemento elastomérico e uma massa anular para absorver energia em frequências críticas. Projetos híbridos de dampers são relatados por Sezgen (2021) com ganho de redução de pico torsional.

**Isoladores:** Suportes de borracha e montagens hidráulicas com válvulas internas reduzem as transmissões de frequência baixa e alta, sendo dimensionados para não afetar criticamente a estabilidade do motor no veículo.

## 6 – Análise Modal e Aplicações Práticas

A análise modal (experimental ou numérica) identifica frequências naturais e formas modais. Experimentalmente, usa-se impact hammer tests e shakers com aquisição de acelerômetros em pontos estratégicos do virabrequim e bloco. Numericamente, FEM fornece modos e tensões locais. A combinação possibilita validação e calibração dos modelos computacionais [2]. Aplicações práticas incluem:

- Definição de regimes de operação seguros (evitar rotações correspondentes a ressonâncias);
- Projeto de dampers e balance shafts;
- Otimização do traçado de filetes e aumento de rigidez para reduzir concentração de tensões;
- Desenvolvimento de estratégias de monitoramento por vibração (detecção de perda de filme de óleo, desalinamentos, folgas).

### 6.1 – Fluxo de Trabalho Recomendado

- Construir modelo LPM para identificar ordens de excitação dominantes (1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> ordem, etc.);
- Validar frequências com testes modais em bancada (rotor não girante ou condição controlada);
- Refinar com FEM do virabrequim e cálculo das tensões dinâmicas sob excitação temporal;
- Projetar e testar damper torsional e, se necessário, re-projetar contrapesos;
- Implementar monitoramento por vibração e análise de sinais para manutenção preditiva.

## 7 – Conclusões

Este artigo apresentou uma visão consolidada sobre vibrações em motores de combustão interna, abordando modelos essenciais (translacional, torcional, flexional), efeitos sobre mancais e virabrequim, e técnicas de mitigação. Ressalta-se que a combinação de análise modal (experimental e numérica) com boas práticas de projeto (balanceamento, dampers, lubrificação) é a estratégia mais efetiva para aumentar a vida útil dos componentes.

Recomenda-se que trabalhos futuros explorem modelos acoplados torção–flexão com efeitos não-lineares e estudos de monitoramento on-line com machine learning para detecção precoce de anomalias vibracionais.

## 8 - Referências Bibliográficas

- [1] IDEHARA, A.; Cálculo de Esforços Longitudinais em Virabrequins. Campinas, 2009.
- [2] KANG, Y.; et al. Modal analyses and experiments for engine components. *Journal of Sound and Vibration*, 1998.
- [3] CHEN, Y.; et al. Effects of Wear on Lubrication Performance and Vibration Signatures of Rotor System Supported by Hydrodynamic Bearings. *Lubricants*, v.11, n.3, 2023.
- [4] FAN, R.L.; et al. Finite element analysis for engine crankshaft torsional stiffness. *International Journal of Structural and Performance Modeling*, 2019.
- [5] KAREEM, B.; AKPAN, U.I. Investigation into torsional failure of automobile crankshafts. *Journal of Modern Technology & Engineering*, 2018.
- [6] RAMACHANDRAN, T.; Review on internal combustion engine vibrations and mountings. *IJ ESET*.