

Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos na Fuselagem de Aeronaves: Análise de Resistência à Tração, Compressão e Impacto

Davi Marques Dorateu
davi.dorateu@aluno.ifsp.edu.br

Felipe Rodrigues Cardoso
cardoso.felipe@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Com avanço da indústria aeronáutica, a busca por materiais que proporcionassem um bom desempenho estrutural, alta resistência mecânica e leveza tem sido muito requisitado. Mediante tais exigências, os materiais compósitos se mostraram uma excelente opção de uso, principalmente na aplicação em fuselagens de aeronaves;
- Devido sua organização interna, com fibras de altas resistência e matrizes poliméricas, resultam em propriedades superiores em comparação com materiais tradicionais da área, como o alumínio, permitindo um equilíbrio entre robustez estrutural e leveza, fatores importantes para a aviação moderna;
- A alta resistência mecânica, torna a aplicação do material ideal para suportar severas condições operacionais, envolvendo pressão, temperatura e carregamento dinâmico.



Introdução

- Apesar dos compósitos apresentarem diversas vantagens, a previsão e análise de seu comportamento mecânico em determinadas situações críticas, tem sido um grande desafio técnico e científico para os profissionais da indústria e academia, lidarem com esses materiais, em certos pontos;
- Portanto, o desenvolvimento de um estudo a respeito desse tema, se torna necessário pois, possibilita analisar o desempenho mecânico dos compósitos, com foco na resistência à tração, compressão e impacto em diversos cenários, e então, a partir das investigações realizadas, possibilitar os profissionais desenvolverem projetos mais seguros e eficientes, e integrar análises experimentais e computacionais, sobre suas respostas mecânicas;



Estrutura

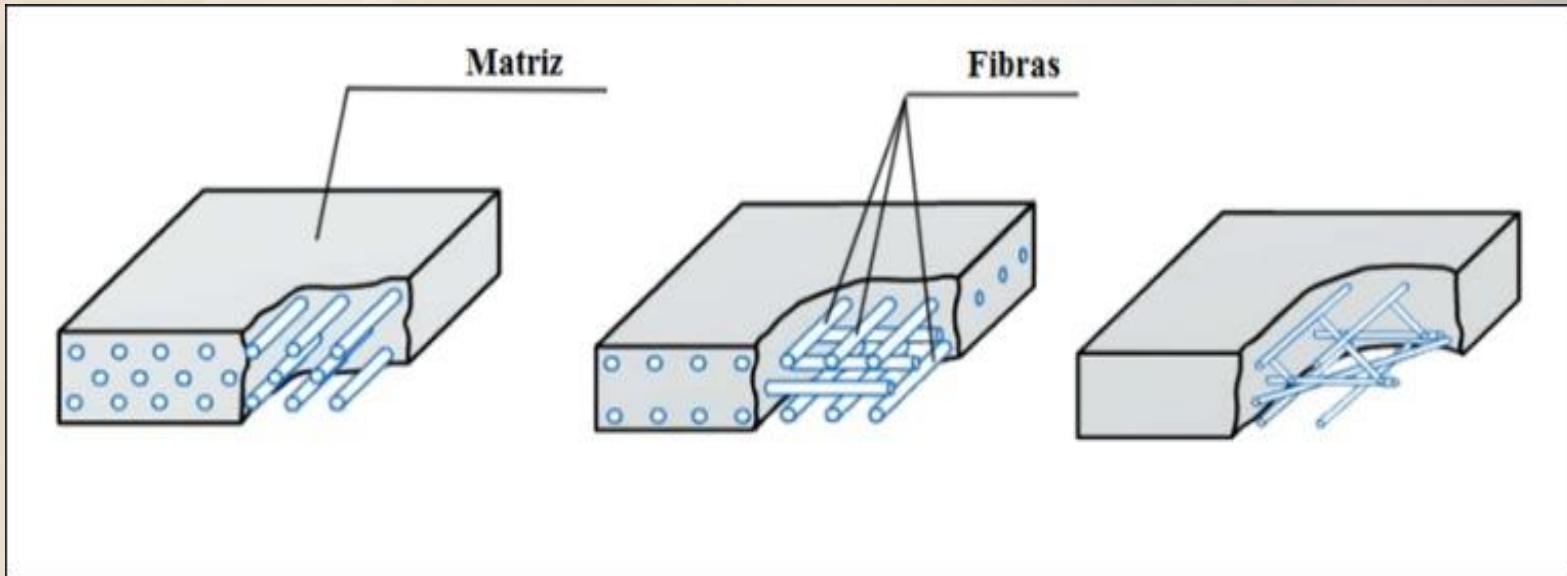


Figura 1 - Estrutura de materiais compósitos com exemplos de arranjos das fibras.

- Matriz:** Material contínuo que envolve as fibras, podendo ser cerâmica, polimérica e metálica;
- Fibras:** Conhecida também como reforço, é fase descontínua da estrutura. Pode ser feita de diversos materiais como vidro, carbono e aramida, também, pode ter outros “formatos”, como lâminas partículas.



Referencial Teórico

- **Rêgo, Santos e Marinho (2020)**: Observam que o uso dos compósitos deu simultaneamente com avanços globais, principalmente em tecnológicas militares e posteriormente comerciais;
- **LEITE (2014) e LEITE (2024)**: Por conta das características estruturais próprias desses materiais, as diversas combinações entre materiais e estruturas, em diversos casos, seu uso em aplicações aeronáuticas é necessário e fundamental.
- **Santos (2017), Santos; Shimano (2021) e Alves; Guimarães; Oliveira Filho (2024)**: Análise e desenvolvimento de métodos de produção e fabricação de peças aeronáuticas.



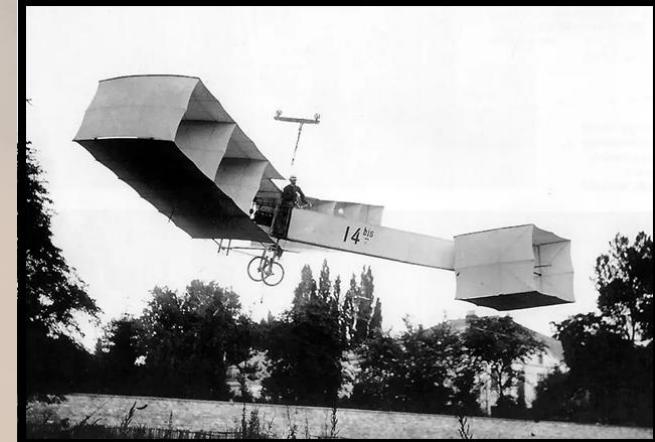
Referencial Teórico

- **MARTINS (2020) e HIPÓLITO (2023):** Análise da imprevisibilidade experimental dos compósitos em situações críticas de impacto, possivelmente solucionada por “Compósitos inteligentes”.
- **COLMANETTI (2019) e DUTRA (2017):** Enfatizam a necessidade do aprofundamento e desenvolvimentos de análises computacionais mais detalhadas, que preveem uso de estruturas dos materiais.
- **SWLING (2018):** Investigação do comportamento mecânico de compósitos em deformação, fratura e fadiga.

Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

O Século XX foi marcado globalmente por diversos desenvolvimentos e inovações tecnológicas, durante este período, foi quando os compósitos teve sua grande ascensão em aplicações aeronáuticas;

Até a 1º Guerra Mundial e início da 2º Guerra Mundial, com a existência de motores potentes e a necessidade de resistência estrutural, o uso de metais e posteriormente ligas metálicas, se apresentaram como uma excelente alternativa para época. O uso destes materiais foram a base necessária para a aviação.



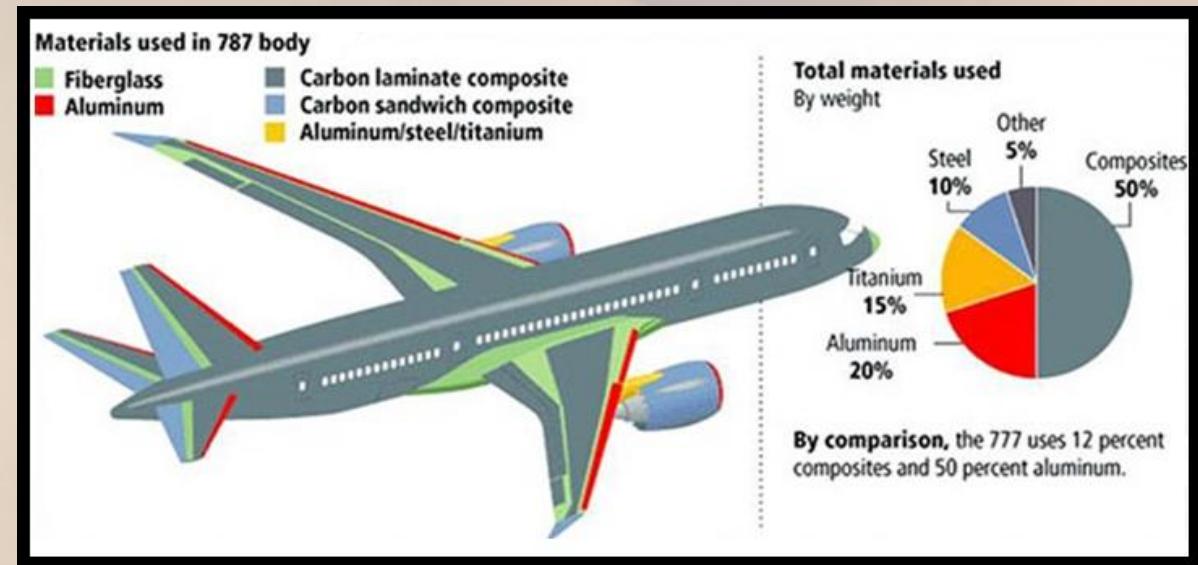


Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

- ▶ Entretanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias militares, novas demandas começaram a serem exigidas, como, combinar “leveza e resistência” nas estruturas das aeronaves, com isso, aos poucos os compósitos foram introduzidos na aviação militar;
- ▶ Além das demandas atendidas, os compósitos trouxeram outros benefícios diretos, como menor consumo de combustível, maior autonomia e redução do impacto ambiental.

Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

A aplicação militar também possibilitou o crescimento da aviação comercial/civil, que demandava de questões como tamanho, carga e passageiros. Esses materiais se tornaram elementos centrais na modernização da indústria, permitindo inovações que ultrapassam o desempenho estrutural, abrangendo também aspectos de aerodinâmica e conforto.



Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica



Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

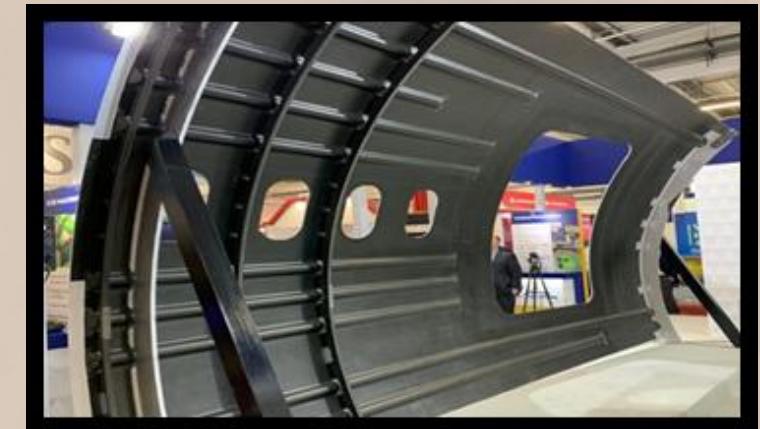
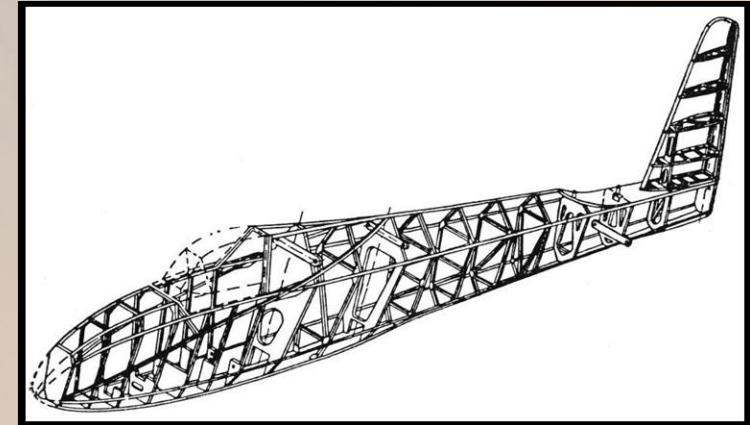
Apesar das diversas vantagens materiais, os compósitos apresentam elevados custos de produção e fabricação complexa. Para estes impasses, alguns dos estudos utilizados apresentam propostas que podem ser uma solução:

- * Uso do processo de “Out-of-Autoclave”;
- * Fabricação aditiva aplicada a componentes de fixação;
- * A aplicação de otimização topológica nos projetos tem buscado equilibrar desempenho e eficiência produtiva (mas ainda enfrenta limitações práticas em larga escala).



Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

A evolução dos compósitos mostra tanto suas vantagens quanto os desafios que ainda existem para entender seu comportamento estrutural. Na fuselagem das aeronaves, isso é especialmente crítico, estudar mais profundamente como esses materiais reagem a tração, compressão e impacto. Esses esforços continuam sendo pontos sensíveis no desempenho das aeronaves e justificam a necessidade de mais pesquisas científicas e experimentais.

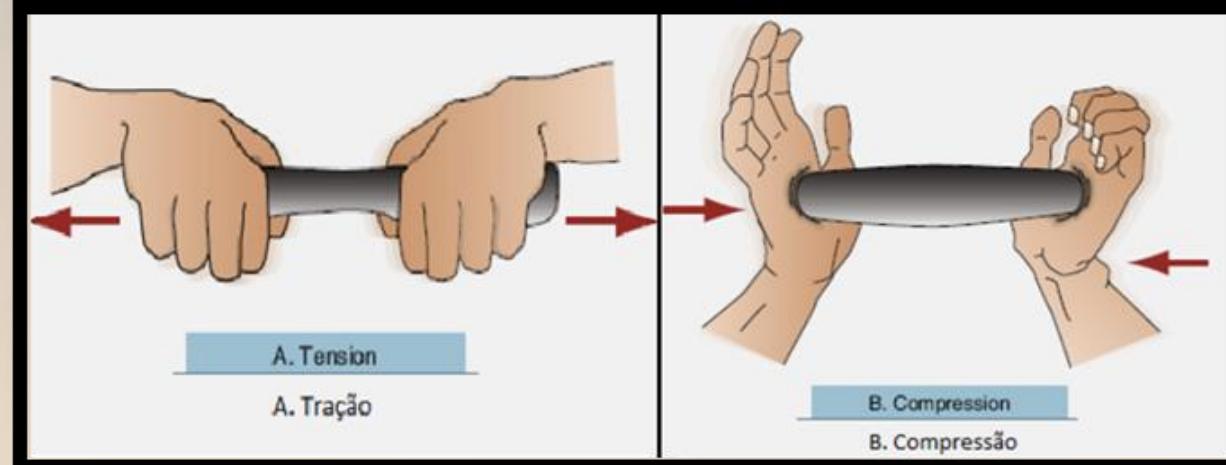


Propriedades Mecânicas: Resistência à Tração, Compressão e Impacto

Resistência à **tração** é a capacidade do material de suportar alongamento sem romper.;

Resistência à **compressão** é a habilidade de aguentar forças que o comprimem, importante em cargas axiais.

Já a resistência ao **impacto** é a capacidade de absorver energia em colisões rápidas, essencial para evitar danos graves.



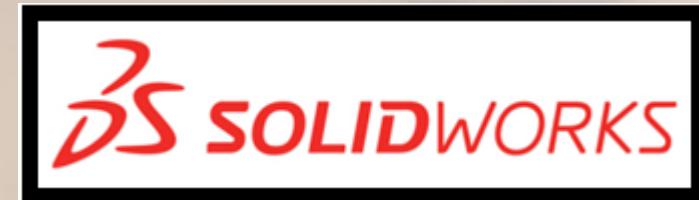
Propriedades Mecânicas: Resistência à Tração, Compressão e Impacto

Ao contrário dos metais, os compósitos têm comportamento mais complexo, pois suas propriedades variam conforme a orientação das fibras, o tipo de matriz e o processo de fabricação. Isso torna essencial estudar essas propriedades, já que a fuselagem sofre tração, compressão e impactos durante o voo. Compreender essas variáveis é fundamental para prever o desempenho estrutural e garantir segurança e confiabilidade da aeronave.



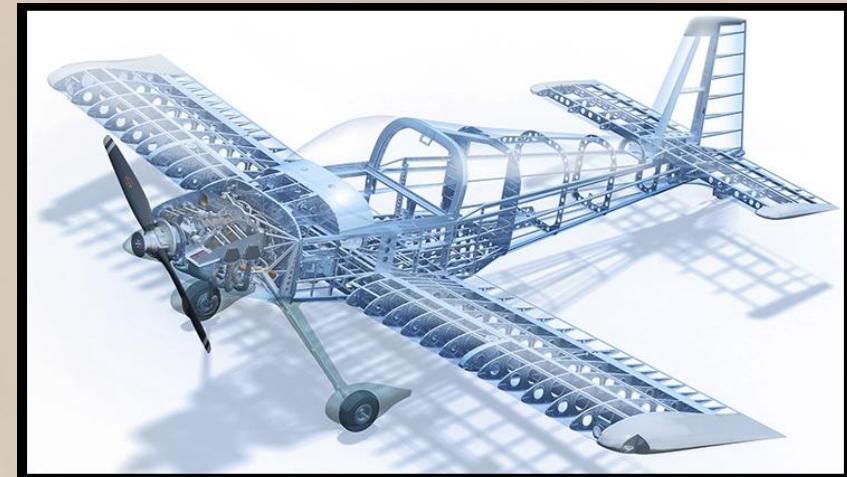
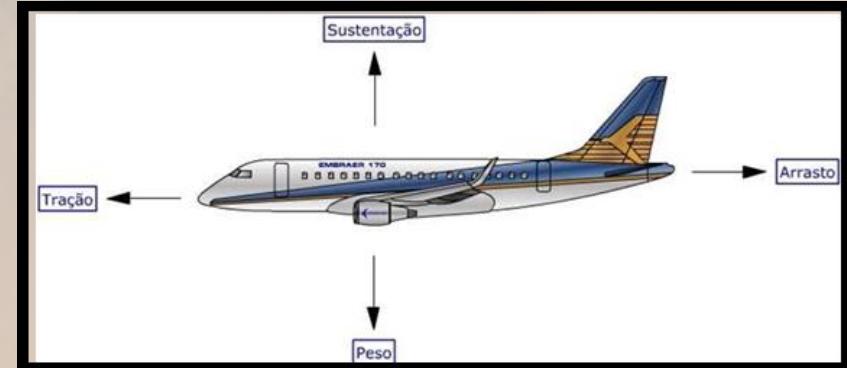
Propriedades Mecânicas: Resistência à Tração, Compressão e Impacto

O artigo destaca que é difícil representar matematicamente o comportamento dos compósitos em modelos computacionais, como os de elementos finitos, devido à sua complexa microestrutura. Esses modelos exigem ajustes constantes e validação experimental. Além disso, o texto reforça a necessidade de mais estudos sobre fixadores e junções estruturais, pois esses pontos podem ser vulneráveis quando submetidos a carregamentos elevados.



Propriedades Mecânicas: Resistência à Tração, Compressão e Impacto

As propriedades de tração, compressão e impacto devem ser analisadas em conjunto, considerando tanto a estrutura interna do material quanto as condições reais de uso. Isso é essencial porque a fuselagem enfrenta vários esforços ao mesmo tempo. Análises mais profundas ajudam a confirmar as vantagens dos compósitos e a revelar desafios que ainda precisam ser superados para seu uso pleno na aviação.





Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

- As inovações de fabricação e projeto trazidas pelos compósitos transformaram significativamente o modo de construir aeronaves, com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico e diminuir os custos de produção;
- O uso de tecnologias avançadas ampliou a aplicação dos compósitos em diversas partes das aeronaves e até mesmo em fuselagens completas, mudando de forma definitiva a maneira como o setor aeroespacial projeta e constrói suas estruturas.



Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

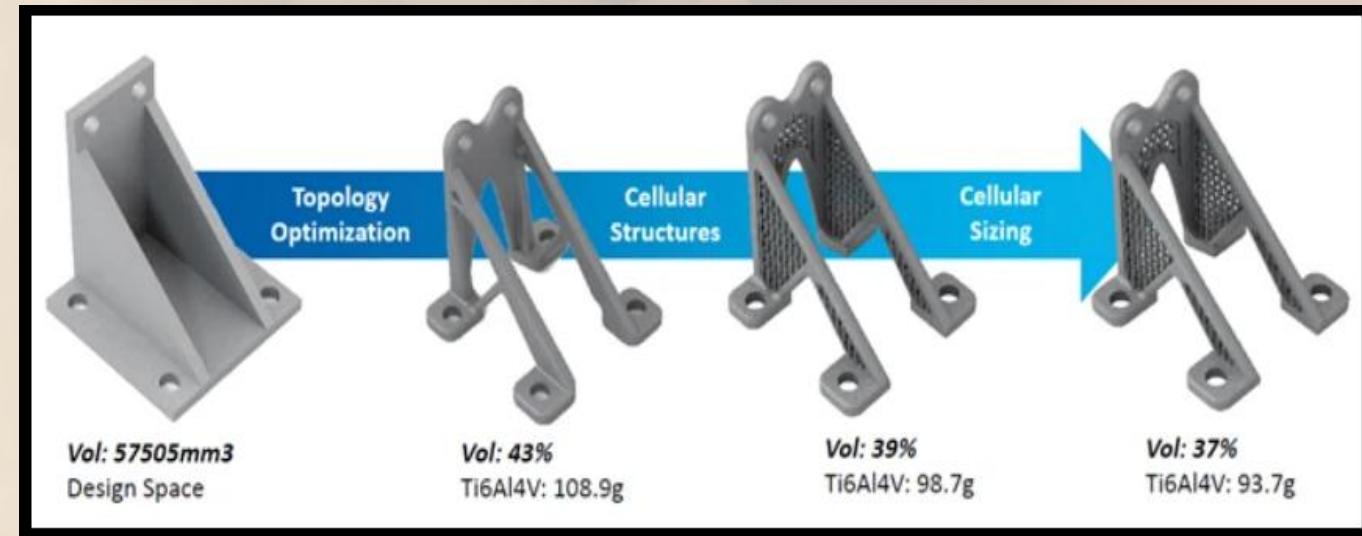
Esse avanço é importante porque ajuda a entender melhor o comportamento dos compósitos sob esforço. Tecnologias como o Out-of-Autoclave surgem para substituir a autoclave tradicional, reduzindo custos e aumentando a escalabilidade, enquanto mantêm segurança e resistência. Isso mostra que a indústria busca métodos mais acessíveis e sustentáveis para fabricar compósitos.



Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

Inicialmente a fabricação aditiva, através de impressoras 3D, era usada apenas em peças secundárias, mas aos poucos, começaram a serem aplicadas em componentes estruturais. Estudos mostram que fixadores produzidos por impressão 3D de filamento fundido são viáveis e podem transformar a manutenção e a produção aeronáutica;

Além disso, a otimização topológica permite reduzir massa das fuselagens sem perder resistência, reforçando o papel de softwares avançados e algoritmos no projeto moderno de aeronaves.





Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

Embora haja avanços significativos, ainda existem divergências sobre a maturidade das novas tecnologias em compósitos para aplicação em larga escala. Compósitos inteligentes e multifuncionais são vistos como promissores por oferecerem funções como autorreparo e maior absorção de impacto, porém a previsibilidade de seu comportamento ainda é limitada em situações críticas de impacto e deformação. Assim, as inovações avançam, mas ainda não eliminam as incertezas em condições extremas de operação.



Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

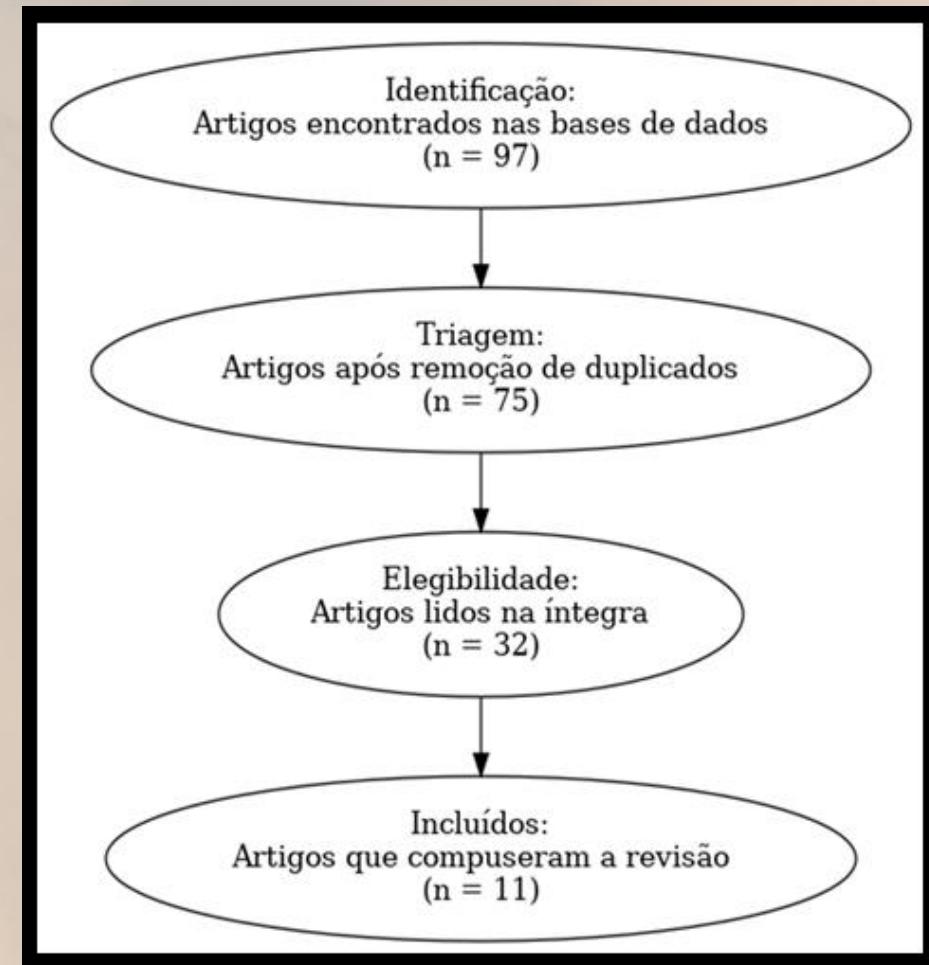
As críticas às inovações em compósitos concentram-se no alto custo e na dificuldade de padronizar processos. Mesmo com avanços em simulações por elementos finitos, ainda há limites na capacidade de modelar falhas complexas e prever o comportamento estrutural sob carregamentos dinâmicos, o que reduz a confiabilidade das novas técnicas. Esses obstáculos mostram que o progresso tecnológico precisa ser acompanhado de métodos experimentais e computacionais mais robustos. Apesar dos ganhos em desempenho e eficiência, a aplicação prática dessas inovações ainda enfrenta incertezas, especialmente porque a fuselagem deve resistir simultaneamente a tração, compressão e impacto.



Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo, cujo objetivo consistiu em reunir, organizar e analisar as produções acadêmicas relacionadas ao uso de materiais compósitos na fuselagem de aeronaves, com foco em suas propriedades mecânicas de resistência à tração, compressão e impacto.

A Buscas: Google Acadêmico, SciELO e PubMed, bibliotecas virtuais e repositórios digitais de instituições de ensino superior.





Metodologia

Tabela 1 – Estudos selecionados para a revisão bibliográfica.

Autor(es)	Ano	Objetivo	Conclusão
ALVES; GUIMARÃES; OLIVEIRA FILHO	2024	Aplicar otimização topológica no projeto de fuselagem e chassi de veículos de alta eficiência.	A otimização reduziu massa estrutural sem comprometer a resistência, sendo viável para aplicações aeronáuticas.
COLMANETTI	2019	Analizar a integridade estrutural de chassis por elementos finitos e deformação experimental.	A modelagem computacional mostrou correlação com testes, mas ainda requer ajustes em cargas dinâmicas.
DUTRA	2017	Avaliar o comportamento elasto-plástico de chassis sob impacto dinâmico.	Demonstrou dificuldades na previsão de falhas, reforçando a importância de ensaios complementares.
HIPÓLITO	2023	Desenvolver compósito inteligente para proteção contra impacto na indústria aeronáutica.	Os compósitos inteligentes apresentaram absorção superior de energia, aumentando a segurança estrutural.
LEITE, J. P. B. M.	2024	Analizar a aplicação de compósitos na indústria aeronáutica.	Os compósitos ampliaram eficiência estrutural e reduziram custos, consolidando-se no setor.
LEITE, V. R.	2014	Revisar o estado da arte sobre compósitos em aeronaves.	Adoção considerada tendência irreversível, embora ainda existam desafios produtivos.

MARTINS	2020	Estudar o comportamento de painéis compósitos sujeitos a impacto.	Resultados mostraram dependência das condições de impacto, exigindo critérios específicos de projeto.
RÉGO; SANTOS; MARINHO	2020	Traçar um histórico do uso de compósitos na aviação.	Os compósitos migraram de aplicações militares para comerciais, tornando-se centrais no setor.
SANTOS; SHIMANO	2021	Analizar fixadores de fuselagem produzidos por impressão 3D.	Os fixadores apresentaram viabilidade inicial, mas menor resistência em comparação a métodos tradicionais.
SANTOS, R. S.	2017	Avaliar o fabrico de compósitos por processos <i>Out-of-Autoclave</i> .	O processo reduziu custos e aumentou escalabilidade, mas necessita validação em larga escala.
SWLING	2018	Investigar o comportamento mecânico de materiais em deformação, fratura e fadiga.	O estudo destacou a complexidade do comportamento dos compósitos em condições de fadiga.



Resultados e Discussão

- Resultados destacaram que a resistência à tração, compressão e impacto são as características mais críticas quando se trata da aplicação em fuselagens;
- Ensaios experimentais influenciam variáveis externas, como tipo de projétil e taxa de deformação, na resposta dos painéis compósitos sob impacto;
- Análise computacional por elementos finitos ainda apresenta limitações quando se busca prever falhas em situações de carregamentos dinâmicos. Os dados apontam, portanto, que, apesar da superioridade dos compósitos em relação aos metais convencionais, sua previsibilidade estrutural ainda não é plenamente alcançada.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas comparativas de materiais aplicados em fuselagens.

Material	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência ao Impacto (J)
Alumínio Aeronáutico	450	380	25
Compósito de Fibra de Vidro	900	650	40
Compósito de Fibra de Carbono	1500	1200	55



Resultados e Discussão

Os resultados mostram que, apesar dos avanços, ainda há divergências sobre a capacidade das inovações substituírem completamente os métodos tradicionais. Enquanto alguns defendem que os compósitos inteligentes podem superar limitações atuais, outros apontam que a falta de previsibilidade em impactos continua sendo um grande desafio. Essas visões contrastantes evidenciam que o tema é dinâmico e exige constante evolução de métodos experimentais e computacionais.

Tabela 3 – Inovações recentes na fabricação de fuselagens em compósitos.

Inovação Tecnológica	Vantagens	Limitações
<i>Out-of-Autoclave</i>	Redução de custos; escalabilidade	Necessidade de validação em larga escala
Impressão 3D (FFF)	Customização; rapidez de produção	Resistência inferior em comparação a métodos tradicionais
Otimização Topológica	Redução de massa; melhoria do design estrutural	Complexidade de modelagem e validação experimental



Resultados e Discussão

Os resultados mostram que os capítulos se complementam: a evolução e as aplicações confirmam a importância dos compósitos, as propriedades mecânicas revelam tanto seu potencial quanto suas limitações, e as inovações tecnológicas demonstram o esforço contínuo da indústria para superar desafios. No conjunto, fica evidente que, apesar das vantagens, os compósitos ainda exigem pesquisas aprofundadas para garantir segurança estrutural em todas as condições de voo.



Conclusões

O estudo evidencia que os compósitos desempenham papel central na construção de fuselagens, combinando alta resistência, leveza e eficiência estrutural. Sua evolução tecnológica e suas aplicações mostram vantagens claras em relação aos metais tradicionais. Entretanto, ainda existem desafios importantes, como a dificuldade de prever falhas em situações críticas, a heterogeneidade do comportamento sob cargas dinâmicas e limitações nos modelos computacionais atuais. Embora os avanços indiquem grande potencial, especialmente com novas técnicas de fabricação e otimização estrutural, torna-se essencial a continuidade de pesquisas experimentais e simulações mais precisas para garantir confiabilidade, padronização e segurança em todas as condições de voo.

Obrigado Pela Atenção



Vibrações Induzidas por Vento em Cabos de Pontes Estaiadas e Suspensas

Lucas Canizza
lucas.canizza@aluno.ifsp.edu.br

Raniely da Silva Costa Leite
raniely.c@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



- Pontes modernas;
- Maior sensibilidade ao vento;
- Cabos como elementos críticos;
- Vibrações podem gerar riscos;
- Importância da análise aeroelástica.



O que são Vibrações Induzidas por Vento?

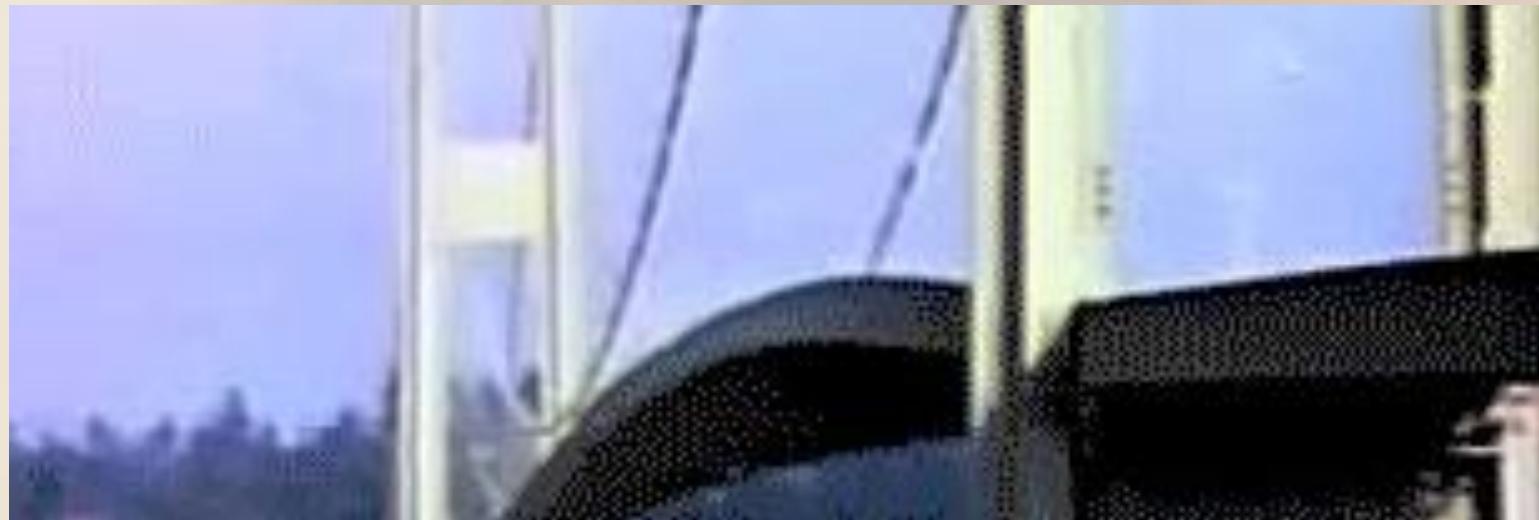
- Oscilações causadas pelo escoamento do ar;
- Cabos vibram mesmo com ventos moderados;
- Baixo amortecimento → alta sensibilidade;
- Diferentes tipos de fenômenos envolvidos;
- Consequências estruturais.





Tacoma Narrows (1940)

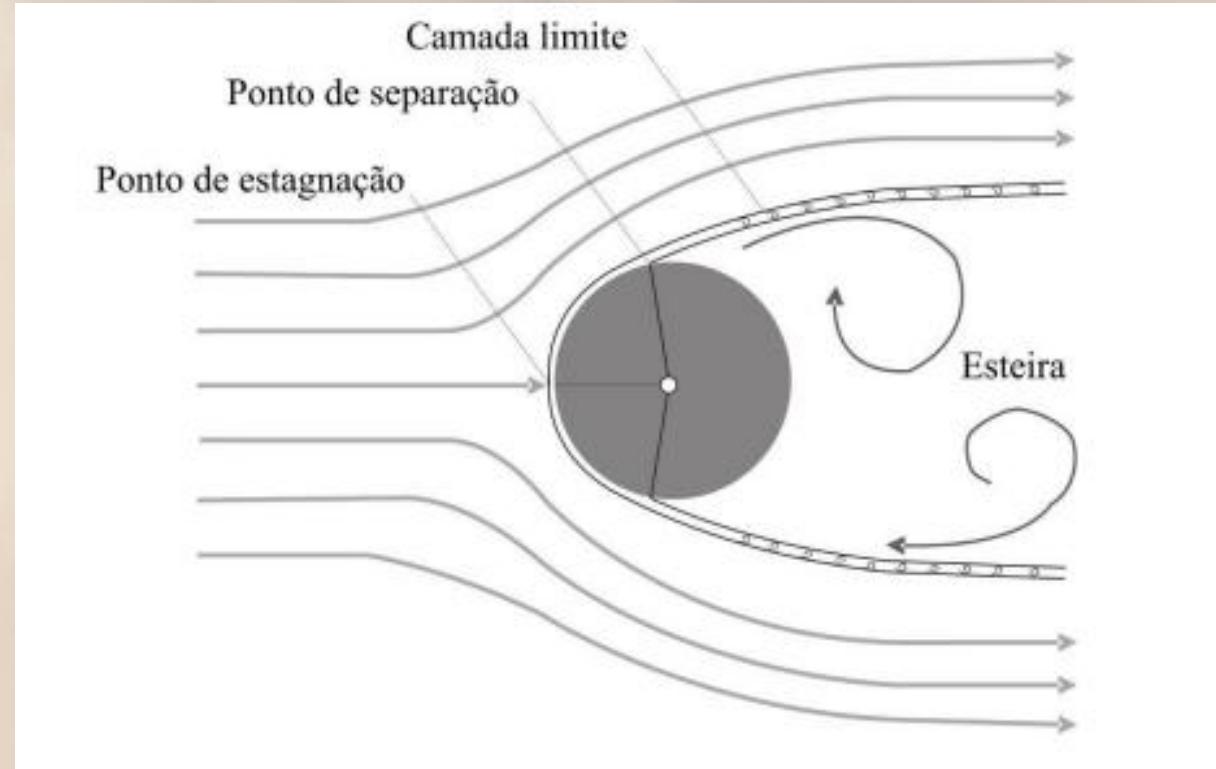
- ▶ Ponte extremamente esbelta;
- ▶ Oscilações desde a inauguração;
- ▶ Ressonância aeroelástica;
- ▶ Colapso em 1940;
- ▶ Marco histórico da engenharia.





Aerodinâmica de Cabos (Conceitos Básicos)

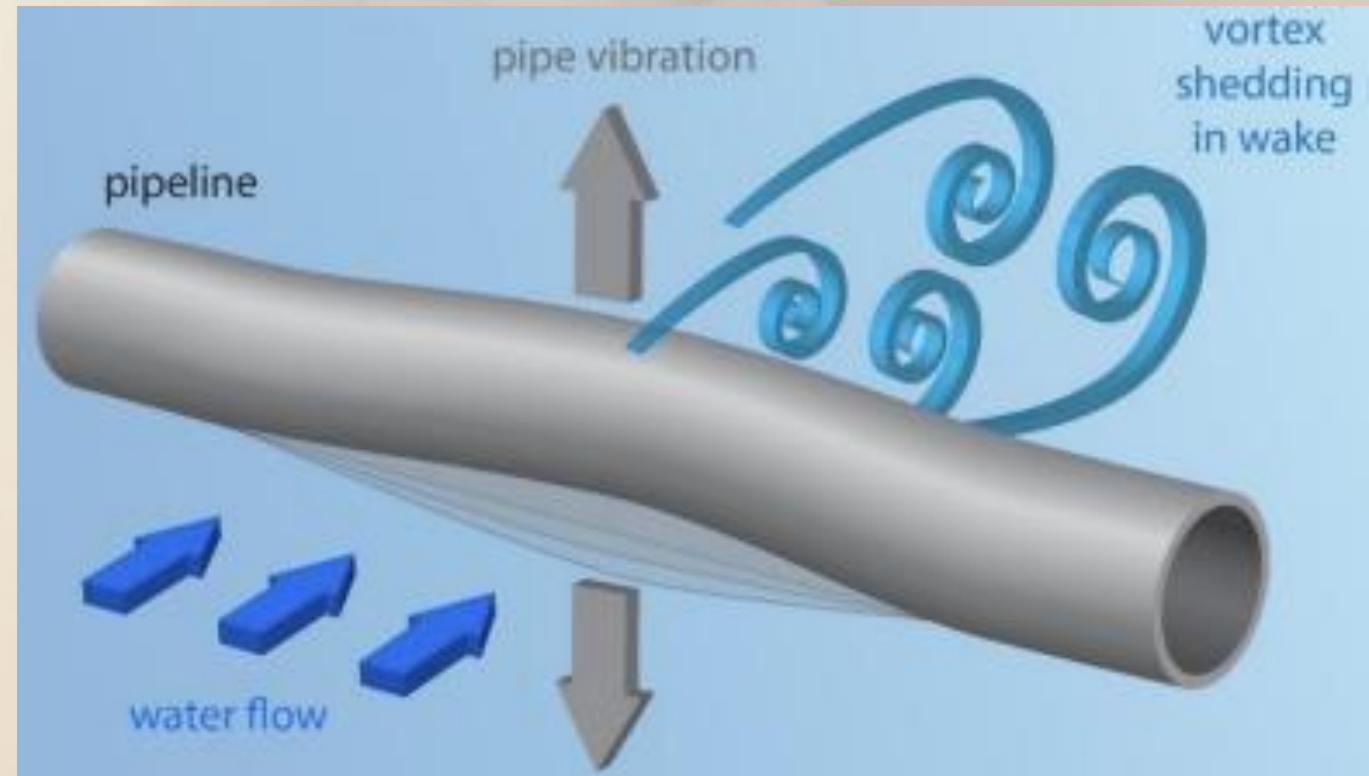
- Cabos ≈ cilindros circulares;
- Reynolds, Strouhal e Scruton;
- Baixo amortecimento estrutural;
- Tendência à ressonância.





Desprendimento de Vórtices (Vortex Sheding)

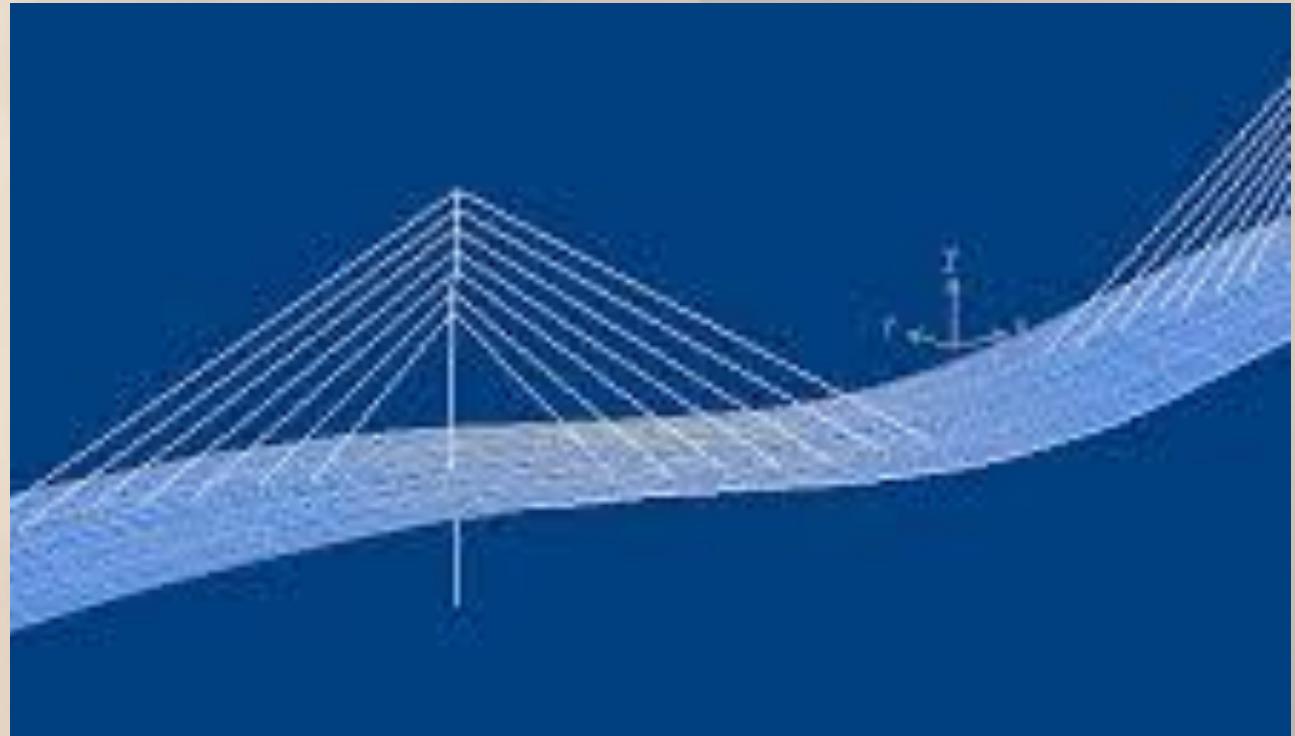
- ▶ Esteira de Von Kármán;
- ▶ Forças transversais periódicas;
- ▶ Risco de lock-in;
- ▶ Vibrações repetitivas → Fadiga.





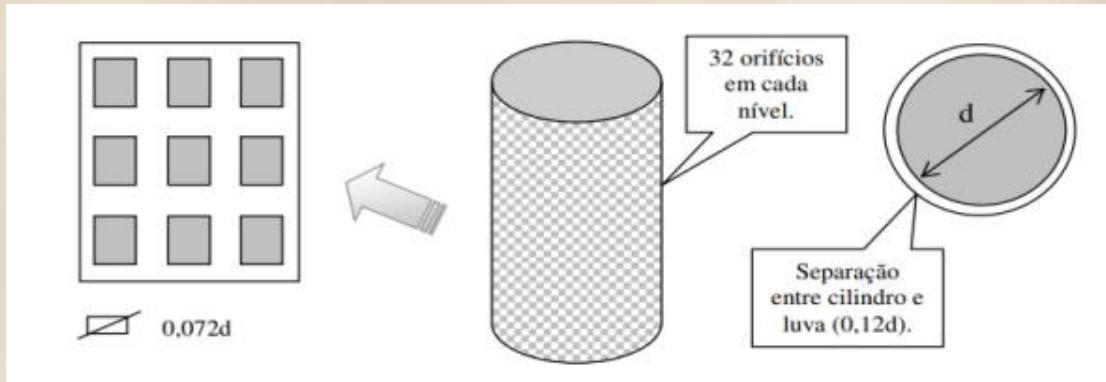
Galopamento

- Vibração autoexcitada;
- Amortecimento aerodinâmico negativo;
- Grandes amplitudes;
- Risco imediato.

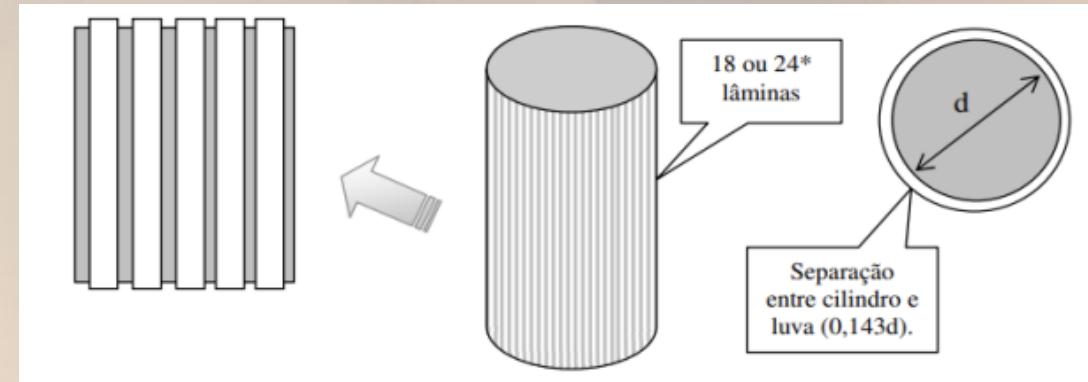


Medidas Mitigatórias Aerodinâmicas

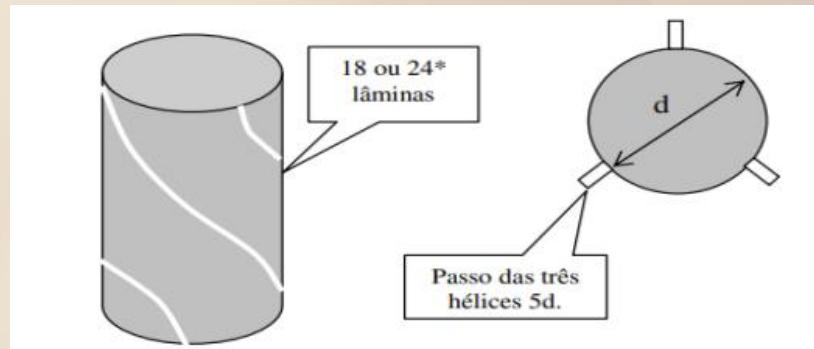
A Luvas Perfuradas



A Lâminas longitudinais



A Filetes Helicoidais





Medidas Mitigatórias Estruturais

- Amortecedores viscoelásticos;
- Amortecedores hidráulicos;
- Cross-ties;
- Aumento de rigidez.





Conclusões

- ▶ Vortex shedding → vibrações repetitivas;
- ▶ Galopamento → vibrações severas;
- ▶ Considerar efeitos no projeto;
- ▶ Mitigação combinada;
- ▶ Segurança e vida útil da estrutura.



Obrigado Pela Atenção



Falha por Cisalhamento em Parafusos e Juntas Estruturais Automotivas: Avaliação de Segurança em Fixações Submetidas a Vibrações.

Caique Pimental da Silva
caique.pimentel@aluno.ifsp.edu.br

Kayky Raphael Gigante da Silva
kayky.gigante@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

 Desde sua criação em 1885, a indústria automobilística tem crescido e influenciado diversos setores industriais, introduzindo inovações tecnológicas e métodos produtivos como o Fordismo e o Toyotismo. Com o avanço das tecnologias, os padrões de qualidade e segurança também evoluíram, exigindo testes rigorosos para garantir a confiabilidade dos veículos. Entre os componentes mais críticos estão as **juntas e parafusos estruturais**, cuja falha pode causar consequências graves ao usuário.

 Sendo assim, essa mesma indústria investe em tecnologias e estudos para analisar condições de **cisalhamento** e as **vibrações** envolvidas que podem causar falhas em juntas e parafusos. Dessa maneira, o artigo busca discutir as **causas e efeitos das vibrações**, os **modos de falha em fixações** e maneiras de **maximizar a segurança estrutural** dos sistemas automotivos.



Juntas Aparafusadas



Exemplo de junta aparafusada
em veículos leves.



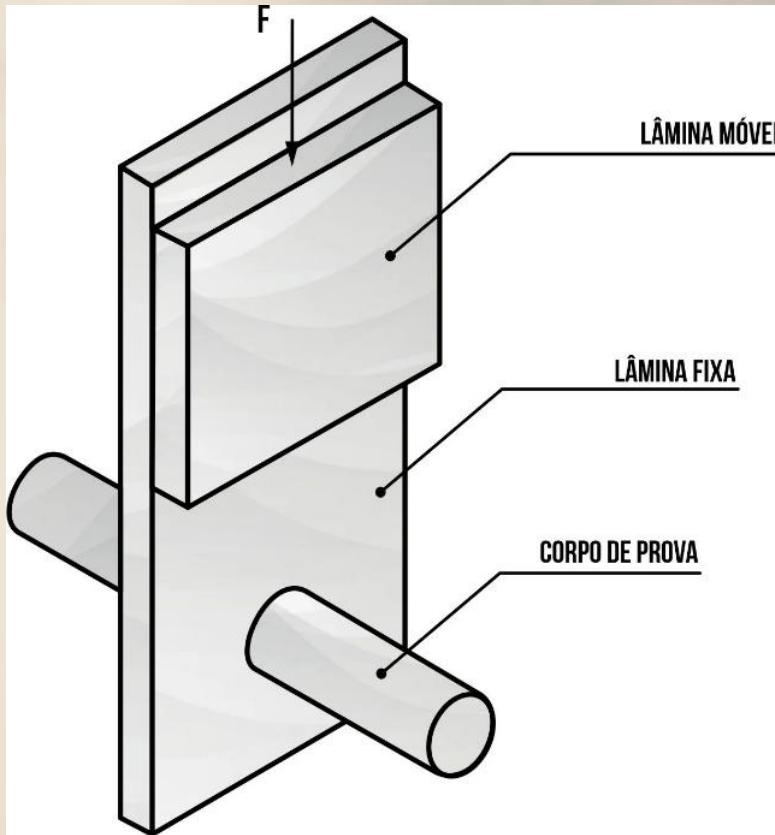
Exemplo de junta aparafusada
em veículos pesados.



Definições Sobre Cisalhamento

-  Cisalhamento pode ser tido como sendo uma **deformação** resultante de esforços que tendem a fazer com que as partes contíguas de um corpo deslizem uma em relação à outra, em direção paralela ao plano de contato entre elas. Sendo assim, em projetos estruturais decorrentes de atuação de forças específicas, os processos de cisalhamento são os principais pontos de análise para garantia de resistência do conjunto.
-  Dessa forma, para avaliar a resistência de um material ao cisalhamento, frequentemente são utilizados **ensaios mecânicos**. Para tal, uma amostra é submetida a uma força de cisalhamento controlada via dispositivos mecânicos, com essa força sendo aplicada de modo a provocar uma deformação por cisalhamento na amostra, gerando um deslocamento relativo entre suas partes.

Definições Sobre Cisalhamento



Dispositivos de cisalhamento
usando lâmina móvel.



Juntas Aparafusadas em Sistemas Automotivos

- As juntas aparafusadas são **indispensáveis** na engenharia automotiva, presentes em praticamente todos os sistemas do veículo, desde a **fixação da carroceria até os conjuntos de suspensão, motor e transmissão**. Tais elementos são responsáveis por garantir a **integridade estrutural** e a **segurança operacional** do automóvel.
- Nesse contexto, um dos principais desafios associados às fixações automotivas está relacionado à sua **exposição contínua a condições dinâmicas severas**, como **vibrações** provenientes do motor, irregularidades da pista e os **esforços variados** decorrentes de acelerações, frenagens e manobras.
- Dessa maneira, tal ambiente favorece a **perda gradual da pré-carga** dos parafusos, que compromete a capacidade de transmissão de esforços pela junta e pode culminar em **falhas por escorregamento ou cisalhamento**.



Juntas Aparafusadas em Sistemas Automotivos

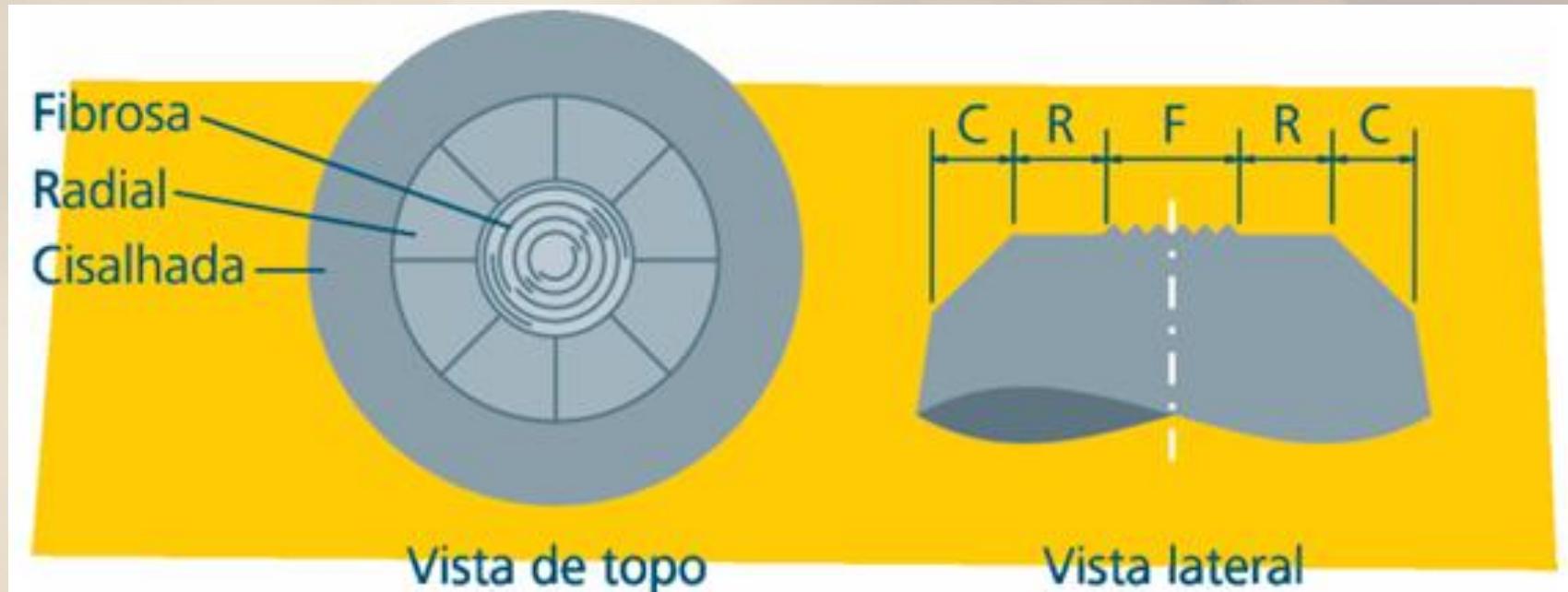
- A falha por cisalhamento em parafusos representa um risco crítico aos sistemas automotivos, pois pode levar à **ruptura total da junta estrutural** e, consequentemente, à **perda de funcionalidade** de componentes de segurança.
- Em meio a isso, métodos de **análise teórica**, aliados a **ensaios de cisalhamento padronizados**, constituem ferramentas indispensáveis para a avaliação da confiabilidade de fixações automotivas submetidas a vibrações.
- Assim, a **integração** entre modelagem analítica e resultados experimentais fornece uma abordagem abrangente para compreender e mitigar os riscos de falha em juntas estruturais automotivas.



Modos de Falha em Fixações

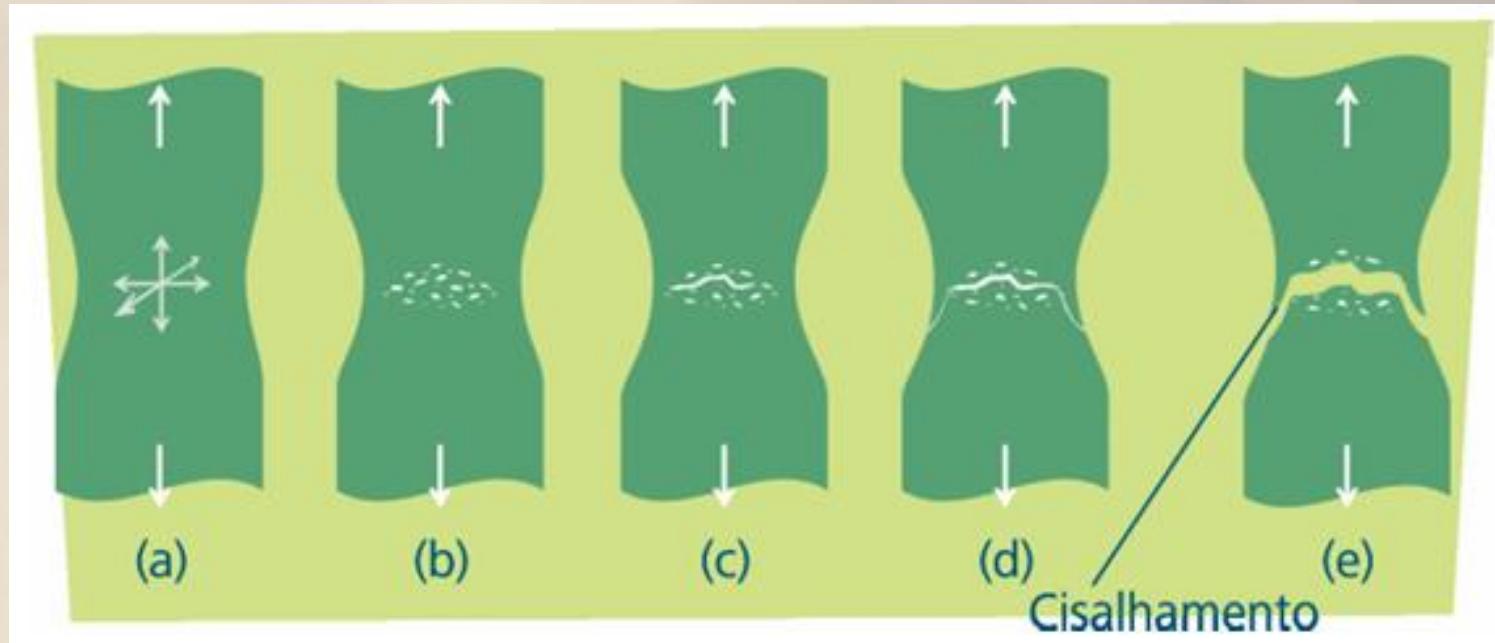
- De modo geral, os parafusos costumam falhar principalmente na **região de contato entre a cabeça e a região cilíndrica**, nos primeiros fios de rosca.
- As principais razões para a falha são: a utilização de parafusos com resistência inferior à necessária, pré-carga inadequada e projeto da junta insatisfatório.
- Segundo o professor Ivan Zolin em “Ensaios Mecânicos e Análises de Falhas” (2011), o processo de cisalhamento direto pode ser tido como uma fratura dúctil do material. Isso significa que a fratura em si é acompanhada de uma deformação plástica significativa e de uma estrição da secção transversal. Seguindo o raciocínio, a fratura dúctil, em geral, apresenta três zonas distintas:
 - **Zona fibrosa:** corresponde ao início da fratura;
 - **Zona radial:** corresponde à região de propagação instável da fratura, com aparência rugosa;
 - **Zona de cisalhamento:** inclinada 45° em relação ao eixo de tração.

Modos de Falha em Fixações



Representação da zona fibrosa,
radial e cisalhada.

Modos de Falha em Fixações



Mecanismo de formação da fratura através
do coalescimento dos grãos.



Modos de Falha em Fixações



Alguns outros elementos que podem contribuir para falhas em juntas de fixação:

- Aperto insuficiente;
- Vibrações;
- Forças dinâmicas;
- Cargas de flexão;
- Efeitos térmicos;
- Dobramento de peças;
- *Self-loosing*.



Etapas do desenvolvimento de uma trinca até o rompimento.



Equações para Dimensinamento

- Determinada a força resultante em cada fixação calculada, a **fixação mais solicitada**, ou seja, aquela com a maior força resultante, **deve ser dimensionada** para resistir a essa carga.
- Sendo assim, a tensão de cisalhamento no corpo de um parafuso (τ) deve ser menor que a tensão de cisalhamento admissível (τ_{adm}).

$$\tau = \frac{P_{res}}{A_s} \leq \tau_{adm} \quad \text{onde, } A_s \text{ indica área de cisalhamento do parafuso.}$$

- Além disso, também deve ser considerada a tensão de esmagamento (*bearing stress*) no material da placa (σ_b).

$$\sigma_b = \frac{P_{res}}{d \cdot t} \leq \sigma_{b,adm} \quad \text{onde, } d \text{ é o diâmetro do parafuso e } t \text{ é a espessura da placa.}$$



Discussão e Análise Crítica

- Com base na linha de raciocínio e conhecimento desenvolvido, é possível notar grande embasamento teórico e de cálculo para projetos mecânicos, representando, por sua vez, **cenários estáticos gerais** e que permitem boa compreensão e análise para um dimensionamento correto e de componentes e juntas de fixação, inclusive tendo ciência dos riscos e adversidades por possíveis falhas enfrentadas.
- Entretanto, quando se trata de questões de **aplicabilidade prática**, é necessária compreensão profunda de suas **limitações**. Nesse contexto, temos que os modelos matemáticos e físicos definidos são tidos frequentemente simplificados quanto a geometria do projeto, propriedades do material e condições de carregamento. Além disso, podemos ter também a **existência de variáveis não controladas** no sistema, como temperatura, umidade, corrosão ou pequenas imperfeições de fabricação, com a teoria não sendo capaz de capturar por completo fenômenos complexos.



Discussão e Análise Crítica

- Sendo assim, a discrepância entre os modelos ideias e o comportamento real é um **ponto crítico** na engenharia. Em modelos ideias, as condições de contorno são simplificadas, enquanto em campo essas condições são bastante complexas e podem variar com o tempo, afetando a distribuição de tensões e deformações.
- Por tanto, nesse contexto, destaca-se a necessidade de uma **apuração cautelosa** na implementação de **margens e fatores de segurança**. Para tal, existem diversos ensaios relacionados que fornecem dados empíricos e valiosos a respeito do comportamento de todo o jogo estrutural, como por exemplo ensaios de fadiga e vibração, havendo ainda um conjunto de normas que procura enquadrar os projetos mecânicos em margens seguras de utilização.
- VDI 2230: análise de juntas aparafuladas e ISO 898-1: propriedades mecânicas de parafusos



Conclusões

-  Ao longo deste artigo, pode-se compreender a importância do estudo das vibrações atuantes em um sistema automotivo, além também de entender como tal pode influenciar nos efeitos de cisalhamento nas juntas e parafusos do corpo de prova, evidenciando as suas características e principais métodos de validação teórico-prático utilizado pelas montadoras de veículos automotores e as influências que estas trazem consigo.
-  Em acréscimo, o mesmo também evidenciou a funcionalidade das análises, explicitando o viés de segurança que os testes aqui apresentados possuem e destacando sua influência na régua de qualidade e segurança imposta pelas fábricas de automóveis, assim, espera-se que o leitor possa entender o valor que os testes realizados pelos fabricantes possuem a fim de evitar que os efeitos aqui apresentados para juntas mal dimensionadas e parafusos cisalhados impactem diretamente na vida do usuário dos veículos.

Obrigado Pela Atenção



Fadiga em Braços de Suspensão Automotiva: Investigação de Ciclos de Carregamento e Previsão de Vida Útil

Ary Cardoso Pinto
ary.cardoso@aluno.ifsp.edu.br

Rafael Eduardo Simao
rafael.simao@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

A fadiga é um processo de falha que se desenvolve gradualmente em materiais submetidos a carregamentos repetitivos, mesmo quando as tensões envolvidas permanecem abaixo do limite de escoamento. No contexto automotivo, os braços de suspensão estão entre os componentes mais expostos a esse fenômeno, pois enfrentam variações constantes de carga durante a condução. Quando ocorre uma falha nesses elementos, tanto a segurança quanto a confiabilidade e a durabilidade do veículo são diretamente afetadas, o que torna indispensável uma análise criteriosa de fadiga no desenvolvimento de projetos. Diante disso, este trabalho examina os ciclos de carga que atuam sobre braços de suspensão e utiliza métodos de previsão de vida em fadiga, com ênfase no regime de alto ciclo.



Definições sobre Fadiga em Componentes Mecânicos

- A A fadiga é um tipo de falha progressiva que ocorre quando um material é submetido a carregamentos cíclicos, podendo acontecer mesmo abaixo do limite de escoamento. Diferente da ruptura estática, ela se manifesta de forma súbita e sem aviso, o que a torna especialmente crítica em componentes mecânicos.
- A A vida útil em fadiga é estimada principalmente por meio das curvas S-N (Wöhler), que relacionam tensão alternada e número de ciclos até a falha.
- A Critérios como Goodman, Gerber e Soderberg auxiliam a considerar o efeito das tensões médias no dimensionamento.
- A Por representar grande parte das falhas em serviço, a fadiga é um fator essencial no projeto de componentes sujeitos a carregamentos dinâmicos, como os da indústria automotiva.



Histórico e Critérios de Projeto em Fadiga

- ▶ O estudo da fadiga teve início com Wöhler, que mostrou que componentes podem falhar sob tensões repetidas mesmo abaixo da resistência máxima. Isso levou ao uso das curvas S-N para prever vida útil.
- ▶ Os critérios de projeto mais usados são:
 - Goodman – linear e conservador.
 - Gerber – parabólico, menos conservador.
 - Soderberg – o mais rígido, baseado na tensão de escoamento.
- ▶ Esses critérios são fundamentais no projeto automotivo, onde falhas em fadiga impactam diretamente segurança e confiabilidade.



Braço de Suspensão Automotiva

- O braço de suspensão é um dos componentes mais importantes do sistema de suspensão, pois conecta a roda ao chassi e garante o movimento adequado para absorver irregularidades do pavimento. Ele influencia diretamente o conforto, a dirigibilidade e a segurança do veículo.
- Diferentes configurações existem, cada uma projetada conforme o tipo de veículo e requisitos de desempenho.
- Como as cargas aplicadas variam constantemente, a análise dinâmica do componente é fundamental para garantir durabilidade e evitar falhas.





Tipologias construtivas

- Os braços de suspensão podem assumir diferentes geometrias conforme a aplicação: duplo A, McPherson, multilink, longitudinais e transversais.
- Cada configuração atende a necessidades específicas, como rigidez, controle geométrico, simplicidade de fabricação ou redução de peso.
- Não existe uma “melhor” arquitetura universal; a escolha depende do tipo de veículo, do espaço disponível e do nível de desempenho desejado.



ILUSTRAÇÕES MARCOS AURÉLIO



Pontos Críticos e Comportamento em Fadiga

- As áreas mais vulneráveis do braço de suspensão são aquelas com descontinuidades: furos, soldas, cantos vivos e transições bruscas de seção.
- Nessas regiões surgem concentrações de tensão, que aceleram a nucleação e a propagação de trincas.
- Por isso, mesmo que o componente apresente boa resistência global, sua vida útil costuma ser determinada por esses pontos críticos.



Importância da Análise Dinâmica

- O braço de suspensão está sujeito a carregamentos que variam constantemente durante a condução — impactos, curvas, frenagens e irregularidades da pista. Por isso, não basta considerar apenas forças estáticas no projeto.
- A análise dinâmica permite avaliar como o componente responde a milhões de ciclos de uso real, revelando efeitos que não aparecem em condições estáticas.
- A fadiga é fortemente influenciada pela variação contínua das tensões, e não apenas pelo valor máximo isolado. Dessa forma, compreender o comportamento do braço sob cargas repetitivas é essencial para prever sua durabilidade, identificar pontos críticos e assegurar que o componente opere com segurança ao longo de toda sua vida útil.



Ciclos de Carregamento

- O braço de suspensão sofre **carregamentos dinâmicos** que mudam conforme o terreno: buracos, ondulações e obstáculos geram variação constante de tensão.
- As forças atuam em **três direções principais**: verticais (impactos), laterais (curvas) e longitudinais (frenagens e acelerações).
- Esses esforços se repetem milhares de vezes, formando **ciclos de tensão** que são responsáveis pela evolução da fadiga.



Comportamento dos Ciclos Reais

- Os ciclos de carregamento **não são regulares**, variando conforme o estilo de condução, tráfego e condições da pista.
- A **amplitude, frequência e sequência** dos ciclos influenciam diretamente o dano acumulado — um único evento severo pode valer por milhares de ciclos leves.
- Mesmo tensões de baixa amplitude podem gerar desgaste ao longo do uso, tornando necessário avaliar o **histórico completo de tensões**.



Influências Externas na Fadiga

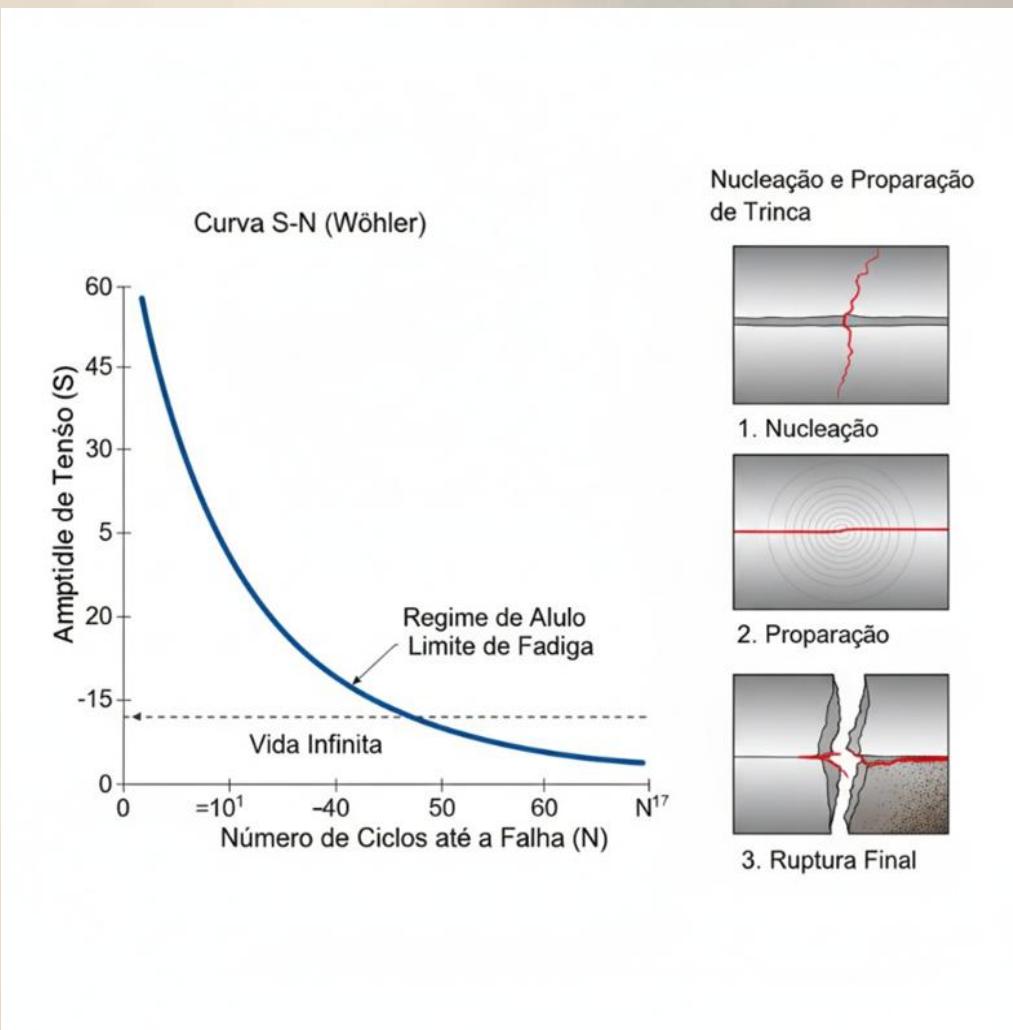
- A Fatores externos como **corrosão, temperatura e sujeira** afetam o material e aceleram processos de nucleação de trincas.
- A A falta de manutenção, como buchas desgastadas ou lubrificação insuficiente, aumenta as tensões e reduz a vida útil do braço.
- A Ensaios laboratoriais e de campo fornecem **espectros de carga reais**, essenciais para prever o comportamento do componente durante toda a vida útil.



Resultados Obtidos: Curva S-N

- A Curva S-N relaciona a tensão aplicada ao número de ciclos até a falha, mostrando que **pequenas reduções na tensão** podem aumentar enormemente a vida útil.
- A curva evidencia as três fases da falha por fadiga: **início da trinca em pontos críticos, propagação lenta e progressiva, e ruptura repentina**.
- Em materiais como o aço, existe **limite de fadiga**, permitindo que o componente opere indefinidamente abaixo de uma tensão crítica — algo que alumínio e compósitos não possuem.

Diagrama esquemático da Curva S-N (Wöhler) e do Processo de Falha por Fadiga





Miner e Comparação de Materiais

A Regra de Miner soma o dano causado por cada nível de tensão, permitindo prever a vida útil a partir de **espectros mistos** de carregamento (ciclos leves + severos).

O estudo mostra que **poucos ciclos de alta amplitude** (como impactos fortes) consomem grande parte da vida útil, sendo mais críticos que milhares de ciclos moderados.

Comparação de materiais:

- **Aço:** maior vida em fadiga, possui limite de resistência; porém mais pesado.
- **Alumínio:** reduz peso, mas acumula dano mesmo em tensões menores.
- **Compósitos:** muito leves e resistentes, porém com falha menos previsível e custo elevado.



Conclusões

- A vida útil do braço de suspensão é determinada pelo **conjunto de ciclos de carregamento**, onde eventos severos têm maior impacto no dano acumulado.
- O uso da Curva S–N e da Regra de Miner permite **quantificar o desgaste por fadiga** e prever com boa precisão quando o componente pode falhar.
- A durabilidade depende de **material, geometria e qualidade de fabricação**, reforçando a necessidade de projetos que minimizem concentrações de tensão e otimizem o desempenho estrutural.

Obrigado Pela Atenção



Análise de Tensões em Asas de Aeronaves Submetidas a Cargas Aerodinâmicas: Estudo da Distribuição de Tensões e Deformações em Voo

Arthur Duarte dos Santos
arthur.duarte@aluno.ifsp.edu.br

Gustavo Manzano Lopes
g.manzano@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

O artigo desenvolvido tem como objetivo, demonstrar como foi dimensionado uma estrutura móvel (Asa) de uma aeronave de uma equipe de Aerodesign, com base em cargas aerodinâmicas; sendo feito o cálculo da distribuição das mesmas e seus efeitos. Diante disso, foi dividido o projeto em etapas analíticas e empíricas, dessa maneira foi possível comprovar os dados. Logo, foi usado uma metodologia para o caso de estudo, sendo da seguinte forma:

 **Metodologia de Raymer e Roskan:** Divisão de etapas do projeto, sendo elas: Anteprojeto, Conceitual, Preliminar e Detalhado;

 **Estudo de caso da superfície em seu respectivo subsistema:** As asas são submetidas a esforços complexos (flexão, torção e cisalhamento) em cenários críticos (manobras, rajadas, decolagem/pouso);

 **Validação dos outputs dos subsistemas:** Após a análise, cálculos e utilização de softwares, a equipe faz a validação desses dados em um componente manufaturado.



Metodologia de Raymer e Roskan

-  O projeto e a construção das áreas de manufatura seguiram esse método pelo fato do conhecimento usado em outros anos e pela facilidade em dividir as tarefas entre as áreas;
-  Esse método organiza o desenvolvimento da asa de forma progressiva e técnica;
-  Permite começar definindo requisitos e terminar com validação experimental;
-  Usando essa metodologia, houve a integração entre aerodinâmica, cargas e estruturas garantindo um projeto coeso e organizado.

Parâmetros Definidos no Anteprojeto

 Requisitos foram determinados com base em análises de voo e normas da SAE AeroDesign;

 O objetivo foi garantir resistência estrutural com baixo peso;.

 Limites estabelecidos serviram como referência para cálculos analíticos e simulação;.

 A estrutura deveria resistir às condições críticas de operação sem falhas mecânicas;.

REQUISITOS GERAIS DE PROJETO	
RG1	A aeronave deve ser projetada para realizar ambas as missões
RG2	A bateria deve pesar < 300 g, ser de fácil remoção e ser diferente da de comando
RG3	A carga LAPES deve prover choque inelástico com o solo
RG4	Maximizar o coeficiente de sustentação
RG5	Peso Vazio <= 3 Kg
RG6	Carga lapes não deve ser de metal
RG7	Aeronave deve possuir estabilidade em todos os modos dinâmicos



Exemplo de requisitos gerais alcançados no projeto 2025.



Etapa de Anteprojeto

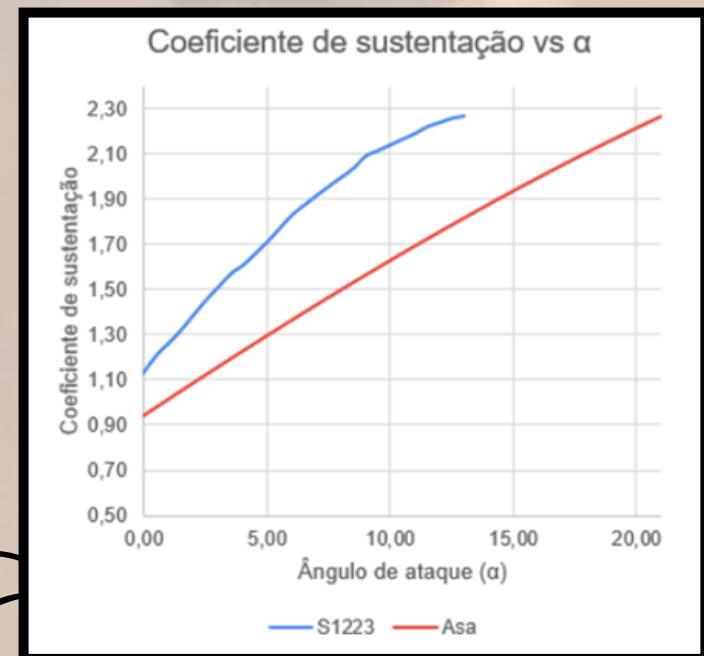
Para iniciar o início do dimensionamento, foi preciso calcular os requisitos através dos subsistemas de Estabilidade e Controle, Desempenho e Cargas, que juntos validam os próximos passos:

-  Definição dos requisitos fundamentais da asa da aeronave da equipe Taperá Aerodesign
-  Velocidade de estol ≤ 12 m/s: garante estabilidade em pouso e decolagem (OUTPUT para Estabilidade e Desempenho);
-  Velocidade de mergulho ≥ 29 m/s: assegura resistência a manobras agressivas e rajadas (OUTPUT Desempenho);
-  Deformação máxima ≤ 100 mm: evita perda aerodinâmica e problemas aeroelásticos (OUTPUT para Estruturas e Ensaios)
-  Esses valores guiam todo o dimensionamento estrutural e aerodinâmico..



Etapa Conceitual

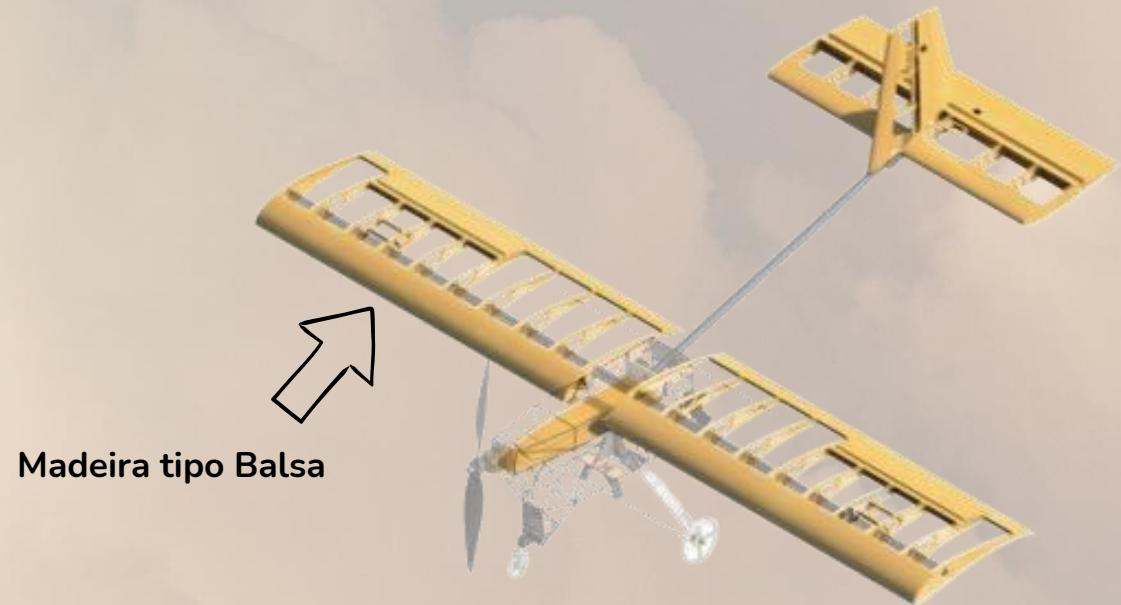
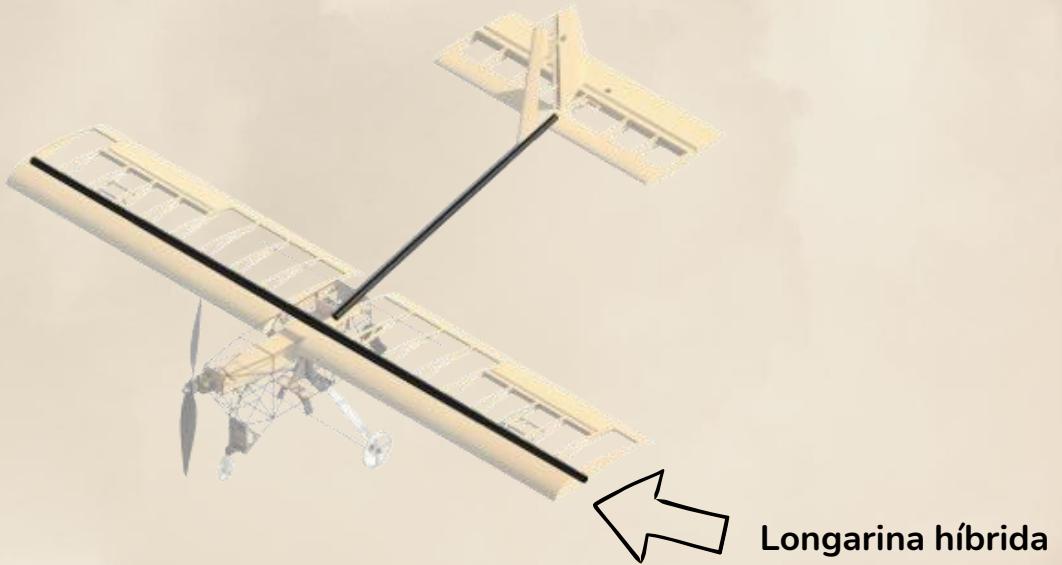
- Seleção do perfil aerodinâmico S1223, ideal para baixo Reynolds;
- Perfil possui $CL_{máx} = 2,27 \rightarrow$ aumenta eficiência em baixa velocidade;
- Definição da longarina híbrida: Vara de pesca telescópica (Compósito de carbono e fibra de vidro);
- Definição de madeira balsa para geometria de nervuras, aileron e chapeados de ataque e de fuga;
- Materiais escolhidos para maximizar rigidez e minimizar peso. (reduzir Peso Vazio da aeronave \rightarrow alcançando MAIOR eficiencia estrutural).



Curva de sustentação CL x α do perfil aerodinâmico S1223.



Etapa Conceitual -Materiais



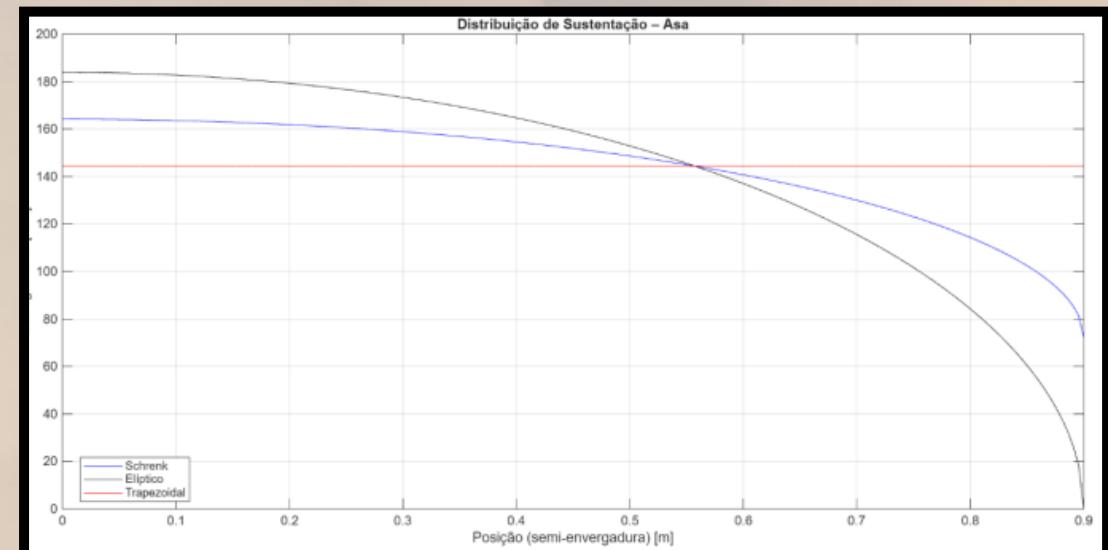


Dimensionamento Conceitual da Longarina

- Para cálculos analíticos da longarina, foi usado como referência uma barra engastada de 16mm de diâmetro e 750 mm de comprimento (estoque da equipe);
- Aplicação de momento fletor sobre a barra com esforços oriundos do subsistema de Cargas e Aerelasticidade;.
- Definição dos pontos de apoio da barra engastada, simulando as regiões de fixação na fuselagem da aeronave;
- Resultados foram comparados aos dados iniciais (Anteprojeto) e assim validados para seguir a próxima etapa.

Cálculo das Tensões e Deformações

-  Uso do método de Schrenk para distribuir sustentação ao longo da asa;
-  Aplicação da fórmula da tensão normal ($\sigma = (M \cdot y) / I$)
;
-  Tensão obtida na raiz abaixo da resistência do material (377 MPa);
-  Validação com a Lei de Hooke: comportamento elástico ($\sigma = E \cdot \epsilon$)
-  A asa se manteve dentro dos limites admissíveis se enquadrando em uma estrutura rígida e com junções seguras.



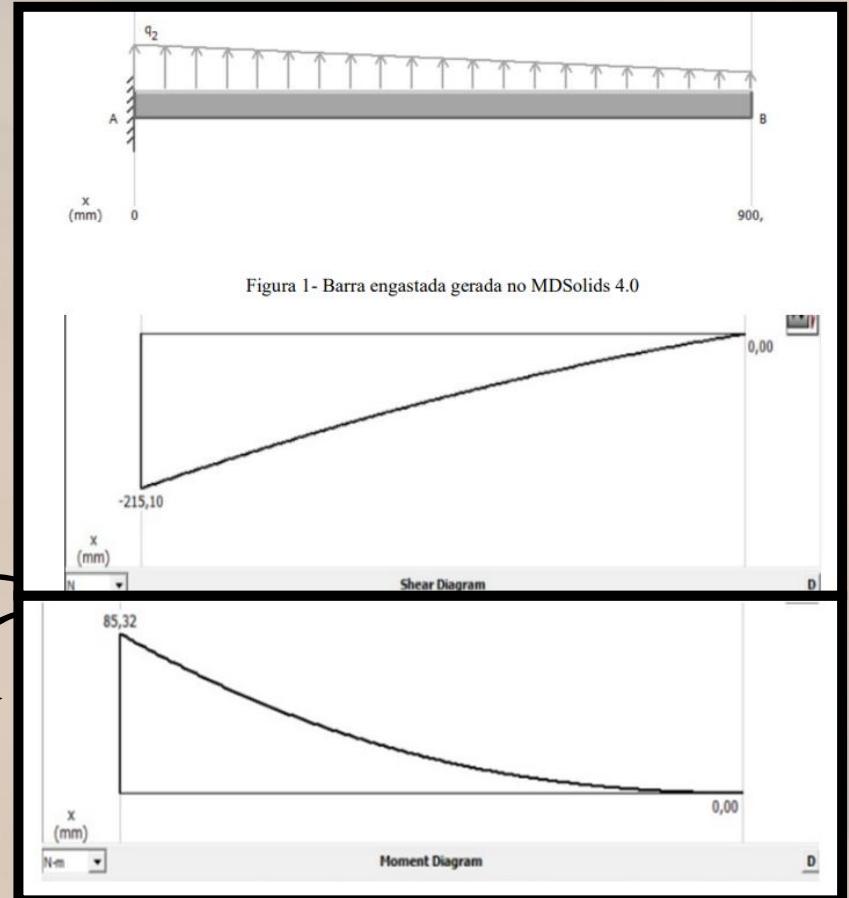
Distribuição de carga ao longo de uma semi-asa - Usando Método de Schrenk.



Etapa Preliminar

-  Obtenção dos diagramas de esforço cortante $Q(x)$ e momento fletor $M(x)$.
-  Comportamento típico de viga em balanço: maior momento na raiz.
-  Estrutura preliminar apresentou fator de segurança maior que 3.

Diagramas de esforço cortante e momento fletor de uma barra engastada (simulando a longarina da asa) - Gerados no software MDSolids.





Etapa Detalhada — Simulação



Simulação com elementos finitos no software Ansys:



Analisado o engastamento na raiz e pressão distribuída na superfície



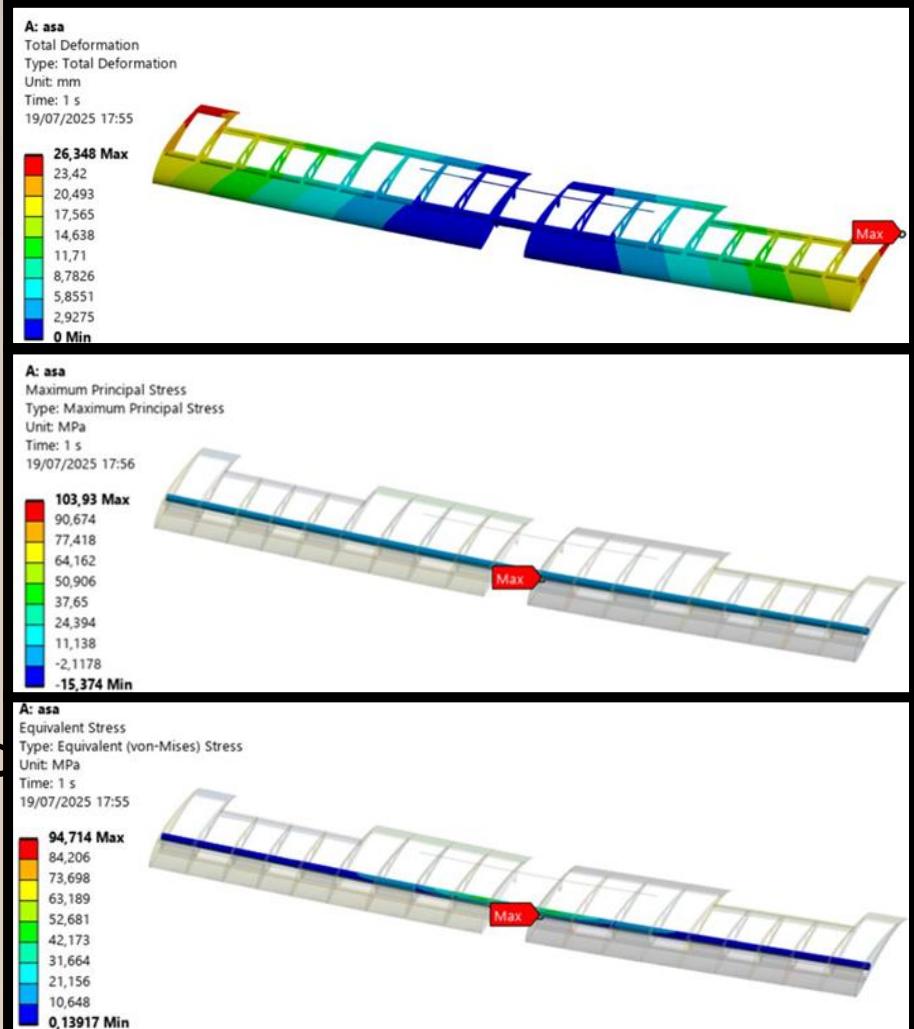
Tensão de Von Mises: 94,7 MPa, abaixo do limite do material* (carbono da vara de pesca da longarina);



Fator de segurança $\approx 3,9$, atendeu os requisitos (estar acima de 1 para ser considerado seguro).



Simulações feitas no cenário de carga crítica.





Ensaio Estrutural da Asa



Ensaio físico replicou a distribuição de cargas obtida pelo método de Schrenk.



Aplicação de cargas em intervalos de 100 mm.



Medição de deslocamentos ao longo do intradorso.



Maior deslocamento experimental: 93 mm, sem ocorrência de falhas.

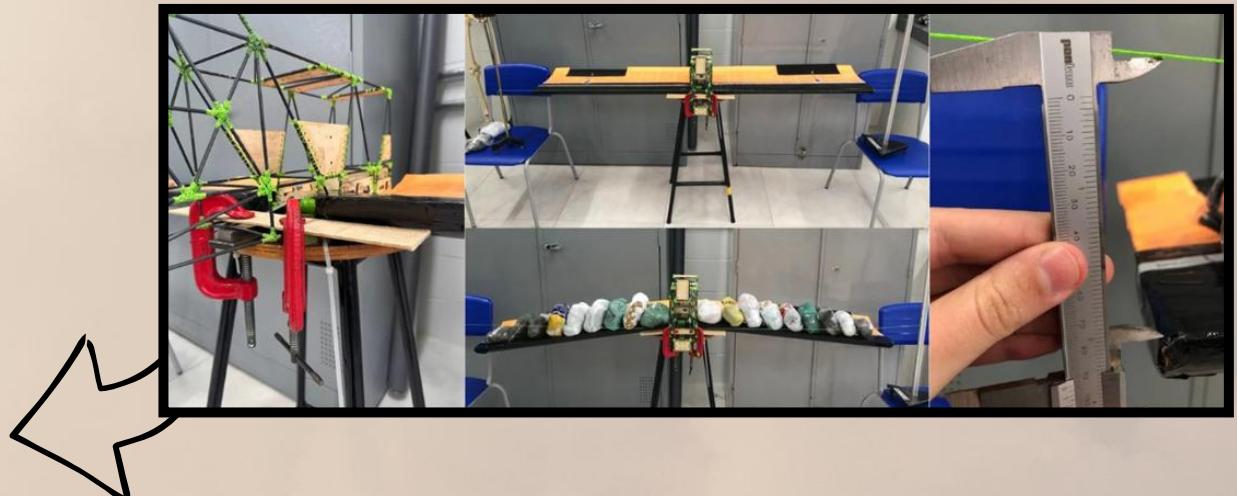


Rigidez média $\approx 1,31$ N/mm.

Ensaios Estruturais para validar os requisitos do Anteprojeto.

Rigidez Asa Carga	
Carga (kg)	Deslocamento (mm)
0	0
1.62	8
3.22	12
4.8	18,3
6.35	27,9
7.85	34
9.27	49

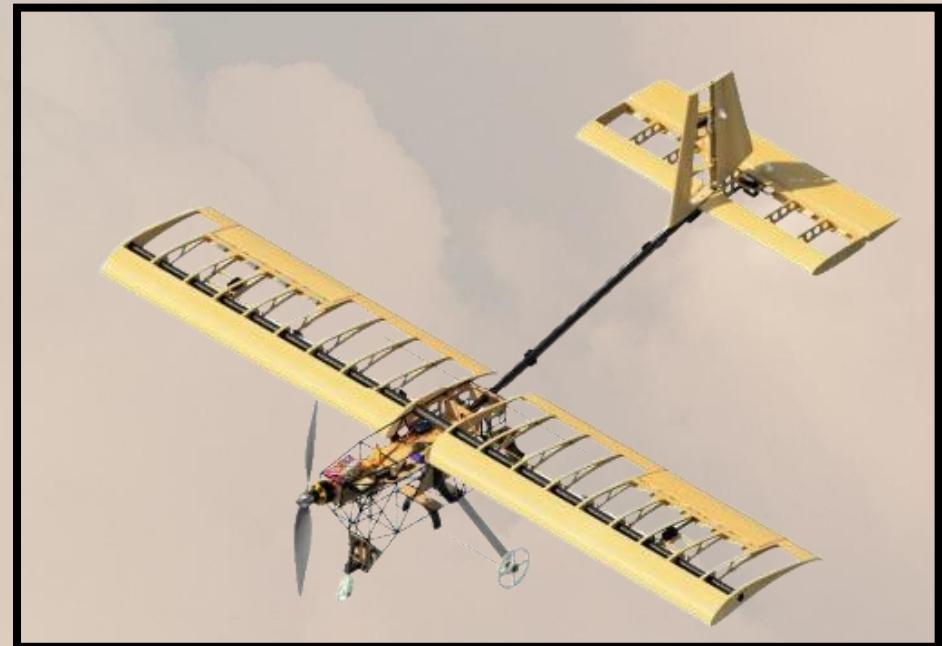
Tabela de Rigidez: Carga vs Descolamento





Discussão e Integração dos Resultados

- Cálculo, simulação e ensaio apresentaram valores coerentes entre si;
- Diferenças naturais foram atribuídas a imperfeições de montagem e simplificações numérica;
- A longarina híbrida mostrou excelente equilíbrio entre peso e rigidez;
- Estrutura comprovou-se segura para voo, com alto fator de segurança;
- O modelo de Raymer e Roskan se mostrou eficiente para organização do projeto.



Estrutura Rígida e segura!

Obrigado Pela Atenção



Investigação da Ruptura de Eixos de Transmissão Automotiva

Amanda Bernardes
amanda.zotte@aluno.ifsp.edu.br

João Pedro Blagitz Ravache
b.ravache@aluno.ifsp.edu.br



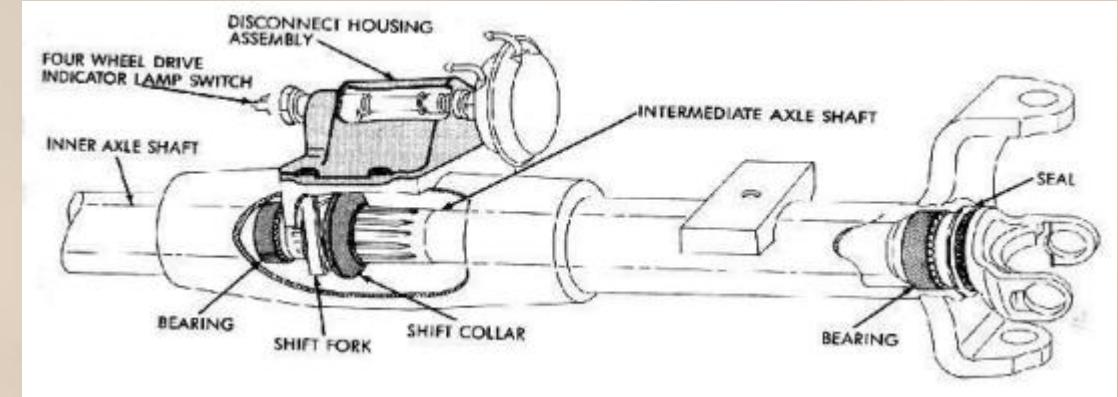
Introdução

- 💡 Fadiga é principal modo de falha em eixos automotivos.
- 💡 Eixos são componentes vitais que transferem potência (torque) do motor/câmbio para as rodas.
- 💡 A falha de um eixo pode comprometer a operação segura e a integridade estrutural do veículo.



Eixo de Transmissão

- A Responsável por transmitir torque do motor às rodas.
- A Sujeito a tensões cíclicas de torção e flexão.
- A Alta suscetibilidade à fadiga devido a descontinuidades geométricas.





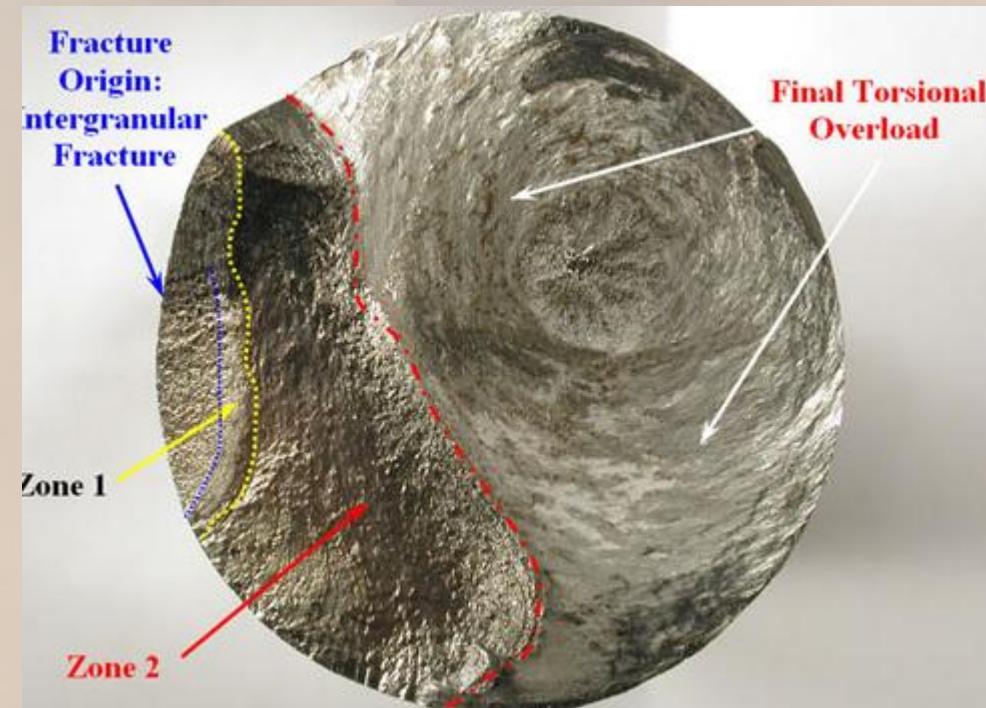
Objetivo

- 💡 Investigar causas de falha por fadiga em eixos automotivos.
- 💡 Comparar eixo real com modelo idealizado (cilindro).
- 💡 Identificar concentradores de tensão via MEF.



Fadiga de Materiais

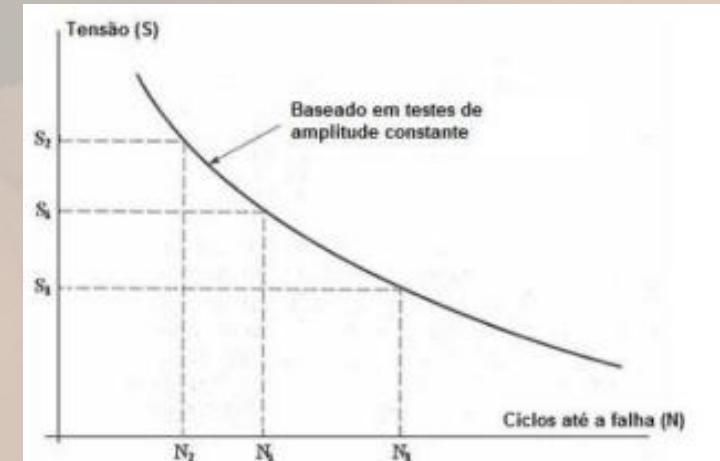
- ⚠ Falha causada por carregamentos cíclicos alternados.
- ⚠ Três fases: iniciação → propagação → fratura final.
- ⚠ Concentrações de tensão aceleram a falha.



Modelos de Análise

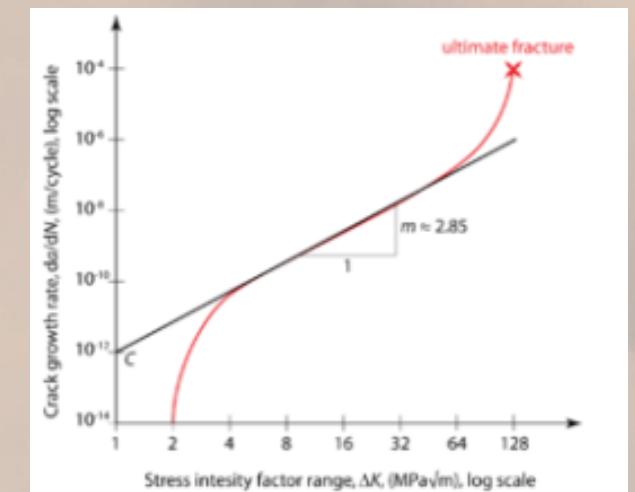
 Regra de Palmgren-Miner (Dano Cumulativo): $B = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$

- Modela dano acumulado sob diferentes amplitudes de carga.
- Baseia-se na soma dos ciclos equivalentes até falha.
- Relacionada à curva S-N.



 Lei de Paris-Erdogan (Propagação de Trinca): $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n$

- Taxa de crescimento da trinca durante a fase estável da fadiga.
- Relaciona o avanço da trinca à variação da intensidade de tensão.
- Essencial para prever o número de ciclos até a falha final.



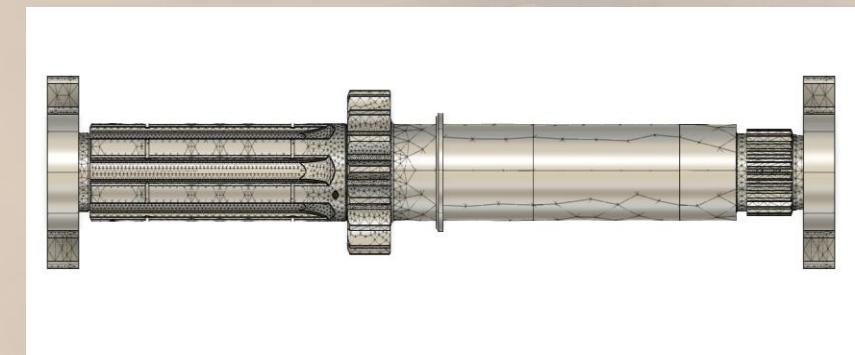
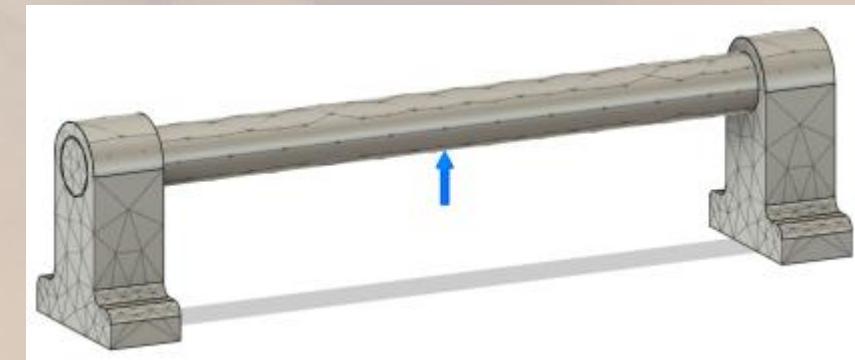
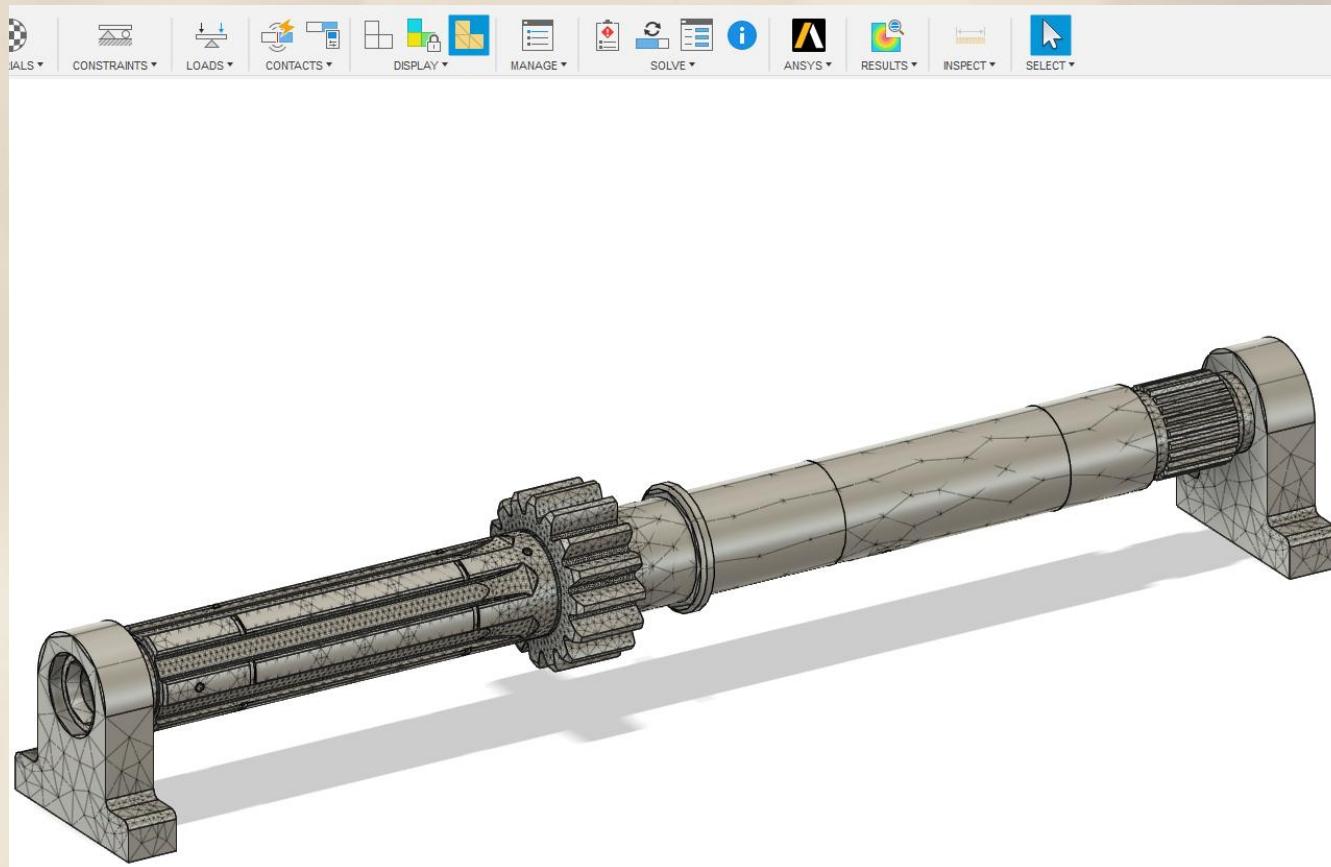


Método dos Elementos Finitos

- A Divide a geometria real do componente em pequenos elementos interconectados, permitindo analisar regiões críticas com alta precisão.
- A Resolve numericamente campos de tensão, deformação e deslocamento, com base no comportamento mecânico do material. Permitindo simular carregamentos complexos, como torção cíclica, flexão e combinações de esforços simultâneos.
- A Reduz custos de prototipagem física ao antecipar falhas em ambiente virtual, acelerando o desenvolvimento do componente. Para este estudo, o MEF foi aplicado no Fusion 360 com malhas tetraédricas finas em zonas críticas, garantindo maior resolução nos pontos de maior gradiente de tensão.



Método dos Elementos Finitos





Etapas da Pesquisa

-  **Revisão Bibliográfica:** Estudo sobre fadiga, ruptura de eixos e métodos de análise.
-  **Definição do Sistema:** Seleção do software (Autodesk Fusion 360) e do objeto de estudo (eixo do Honda GL).
-  **Simulação (MEF):** Modelagem 3D e aplicação de testes virtuais de estresse e fadiga (MEF) em condições realistas.
-  **Análise Comparativa:** Comparações dos dados extraídos da simulação para identificar os pontos críticos de projeto.

A Material: Aço SAE 4140 (Temperado e Revenido)

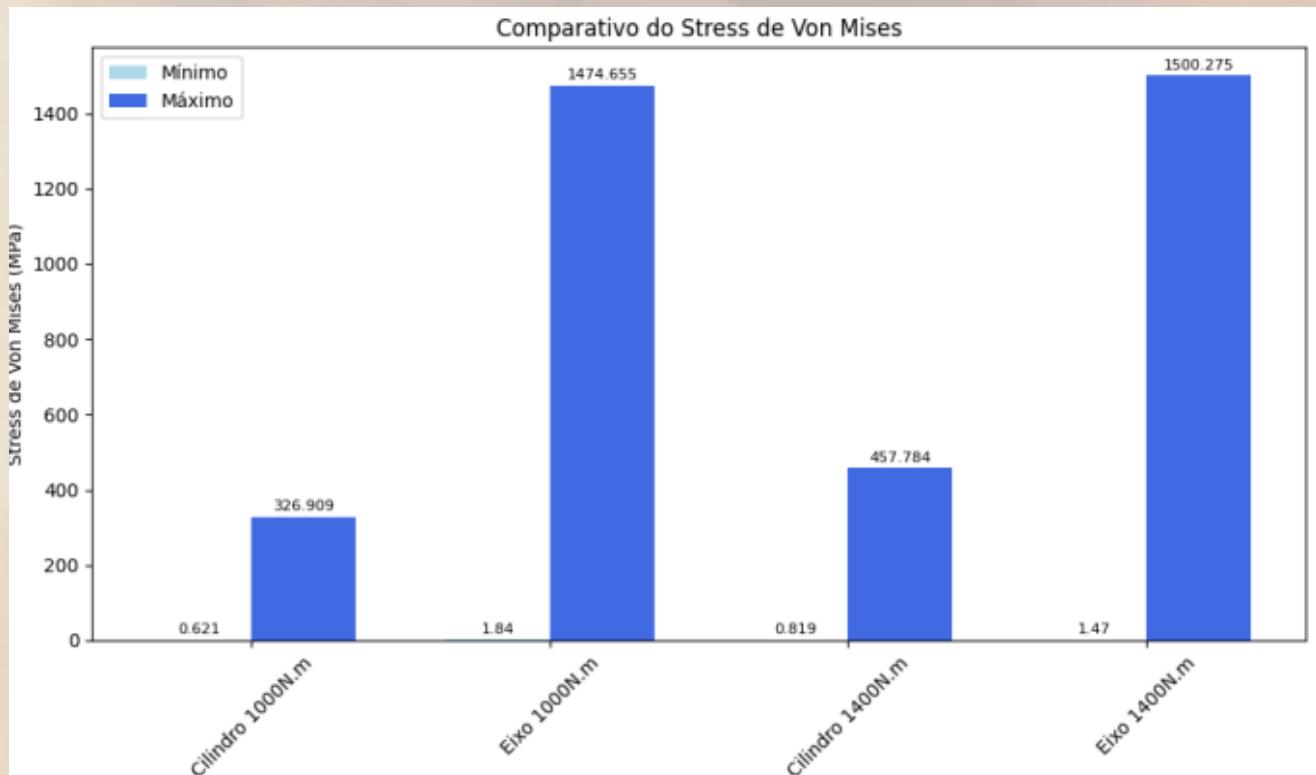
- Liga de Cromo-Molibdênio, de uso comum na indústria automotiva
- Alta Resistência Mecânica: Suporta tensões elevadas.
- Boa Tenacidade: Resiste à propagação de trincas e impactos.
- Elevada Resistência à Fadiga: Essencial para componentes sob cargas cíclicas.

Propriedades	Valores
Densidade (ρ)	7750 kg/m ³
Gravidade Específica	7.75
Coeficiente de Poisson (v)	0.29
Limite de Escoamento (Sy)	986 MPa
Limite de Resistência à Tração (UTS)	1075 MPa
Resistência à fadiga (Se)	~500 - 650 MPa



Resultados: Tensões

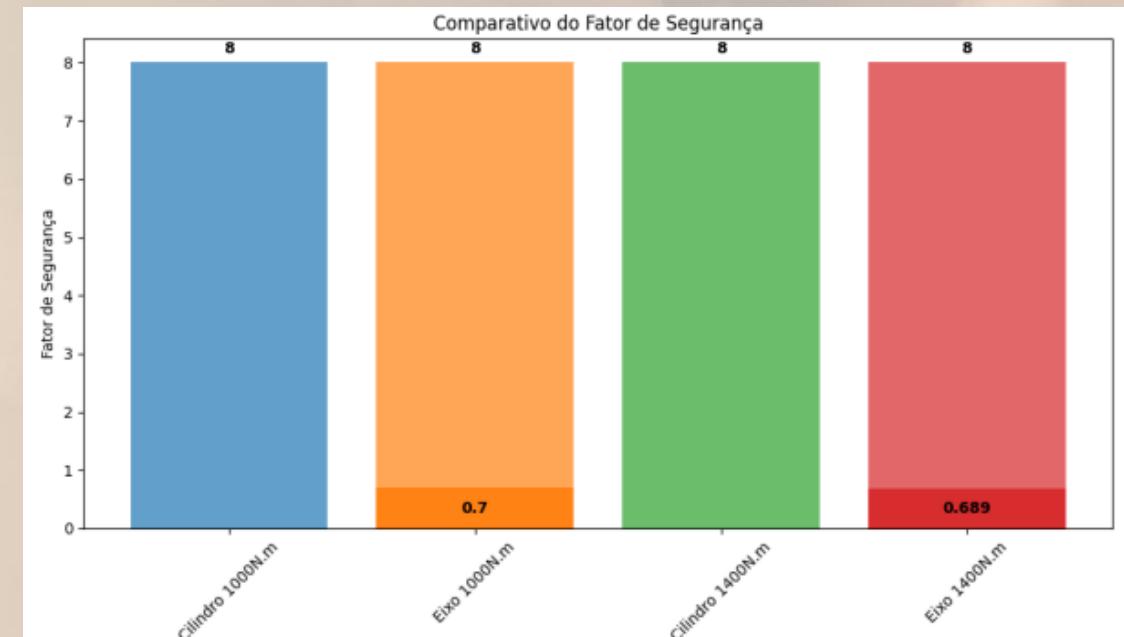
- Eixo: picos acima de 1470 MPa → muito além do limite do material.
- Cilindro: até 457 MPa → dentro da capacidade do aço.
- Concentrações de tensão explicam a falha.





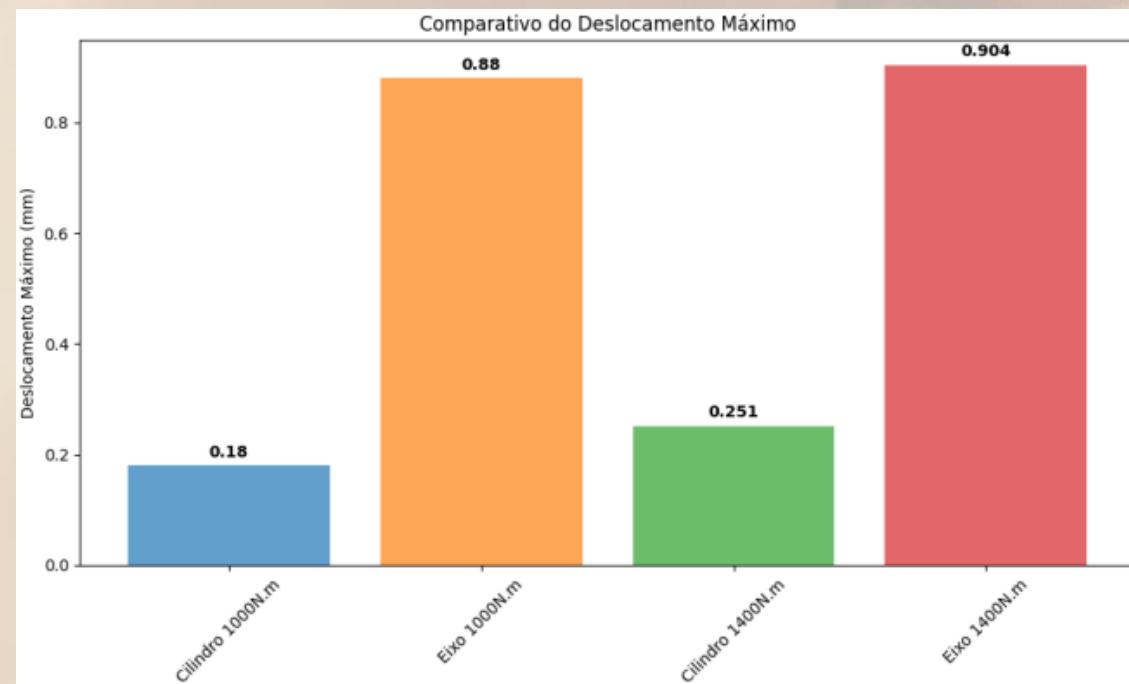
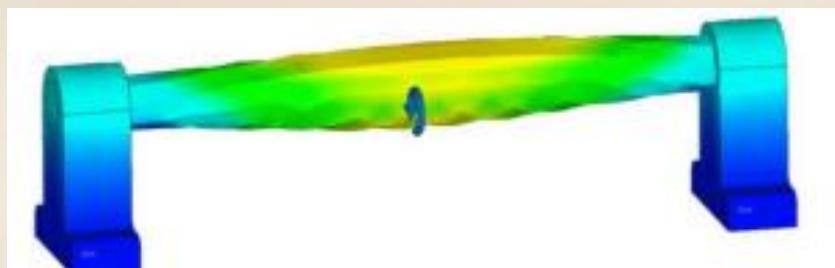
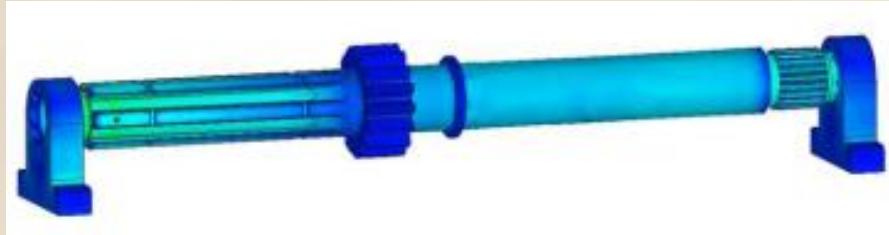
Resultados: Fator de Segurança

A O Fator de Segurança (FS) indica quão longe o componente está de falhar, sendo calculado com base no limite de escoamento do material. Um FS abaixo de 1.0 indica falha iminente.



Resultados: Análise de Vida em Fadiga

💡 O maior deslocamento está associado a menor rigidez e maior concentração de tensão. A geometria complexa do eixo, com transições bruscas e entalhes, amplifica deformações locais.





Conclusões

- As simulações revelaram que o eixo real atinge tensões de Von Mises (até MPa) que excedem o limite de resistência do material (SAE 4140).
- A falha não se deveu a uma falha primária de fadiga cíclica, mas sim à **sobrecarga estática localizada** e subsequente falha por fadiga.
- A causa principal da ruptura é o efeito de **Concentração de Tensão** provocado pelas descontinuidades geométricas (base dos dentes e raios de concordância).

Obrigado Pela Atenção



Efeitos de Vibrações em Conforto e Segurança de Passageiros: Comparação entre Aeronaves, Automóveis e Trens de Alta Velocidade

Pedro Faria

Faria.p@aluno.ifsp.edu.br

Rodrigo Antunes Pinheiro

Rodrigo.antunes@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Nos últimos anos, o transporte de passageiros evoluiu significativamente, trazendo avanços tecnológicos em aerodinâmica, sistemas de propulsão e conforto estrutural. No entanto, um dos fatores persistentes que impactam diretamente a experiência do usuário é a exposição à vibração de corpo inteiro(VCI).
- Diante desse cenário, torna-se fundamental investigar de forma comparativa como aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade transmitem vibrações aos passageiros.
- A apresentação busca consolidar um estudo abrangente sobre o tema, detalhando conceitos, normas técnicas, análise por modal e comparações quantitativas.



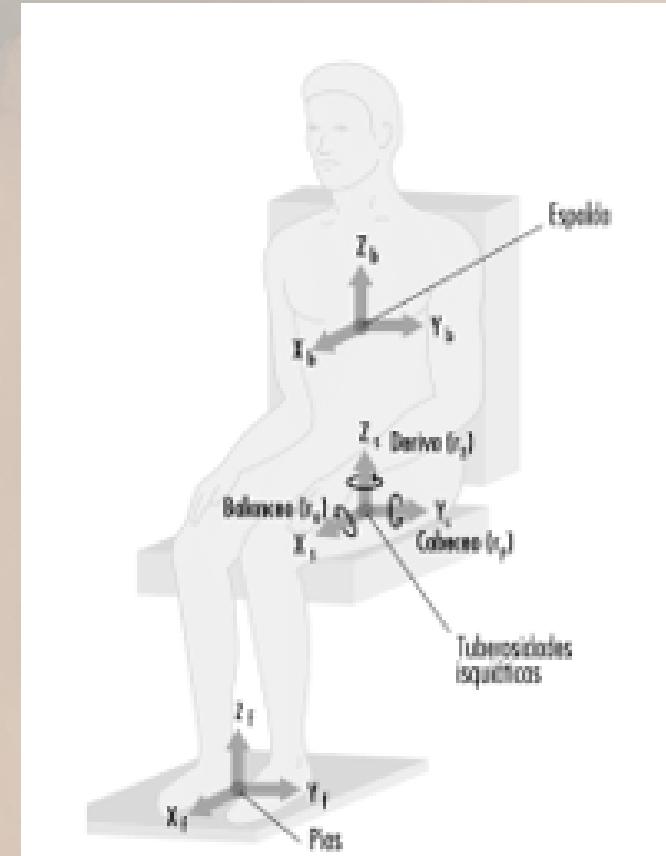
Vibração

- A vibração é um movimento oscilatório de um corpo em torno de um ponto de referência, que pode ser descrito por sua posição, velocidade ou aceleração. É caracterizado por parâmetros fundamentais:
- Amplitude: Refere-se à magnitude do movimento oscilatório;
Frequência: Indica o número de ciclos completos de oscilação que ocorrem em um segundo;
Valor RMS: O valor RMS é considerado a medida mais relevante da amplitude de vibração. Possibilita avaliar a média de energia contida no movimento oscilatório, mostrando o potencial de dano ou desconforto para o corpo humano.

$$X_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_2}^{T_1} [f(t)]^2 dt \right)}$$

Vibração de Corpo Inteiro (VCI)

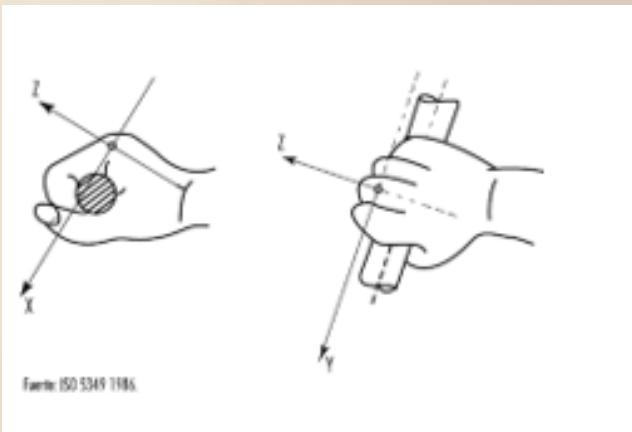
- 💡 Vibração de Corpo Inteiro (VCI): Ocorre quando uma parte significativa do peso corporal (como sentado, em pé ou deitado) está em contato com uma superfície vibratória. Afeta o corpo como um todo, geralmente em uma faixa de frequência de 0,5 a 80 Hz. É comum em veículos de transporte, como automóveis, trens e aeronaves.
- 💡 A ISO 2631-1 (1997) é amplamente utilizada para avaliar a exposição humana à vibração de corpo inteiro.





Vibração do Sistema Mão-Braço (VMB)

- ⚠ Transmitida às mãos e braços através do contato com ferramentas vibratórias ou superfícies. Afeta principalmente os membros superiores, em uma faixa de frequência de 8 a 1000 Hz. É relevante para motoristas que seguram o volante e trabalhadores que operam máquinas manuais.
- ⚠ ISO 5349 é amplamente utilizada para avaliar a exposição humana à vibração de mão-braço(VMB).



Efeitos da Vibração no Corpo Humano

- A Em uma locomoção normal, como caminhando, o sistema músculo-esquelético amortece os efeitos dos movimentos corporais que possam ser estranhos à cabeça. Entretanto, quando existe um ambiente vibratório, estas mesmas partes do corpo podem ressonar.
- A A exposição à vibração pode induzir uma série de respostas fisiológicas e psicológicas.

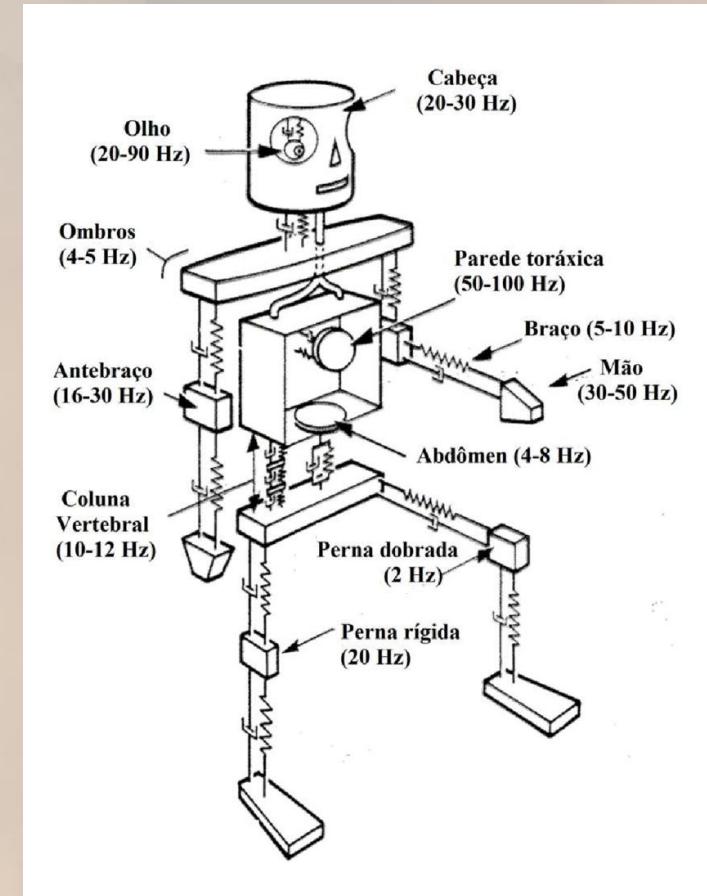
Tipo de vibração	Valor de ação de Exposição	Valor Limite de Exposição
Mão-Braço (VMB)	2,5 m/s ²	5 m/s ²
Corpo Inteiro (VCI)	0,5 m/s ²	1,15 m/s ²

Decreto-Lei n.º 46/2006.



Ressonância de Partes do Corpo Humano

- A ressonância de partes do corpo humano ocorre em faixas de frequência específicas: entre 5 e 10 Hz para o tórax e abdômen, 20 a 30 Hz para a cabeça e musculaturas de suporte, e 30 a 60 Hz para o sistema ocular
- Esses efeitos destacam a importância de controlar a exposição à vibração em ambientes de transporte para proteger a saúde e o bem-estar dos indivíduos.





Aeronaves

- As aeronaves são expostas a vibrações provenientes de diversas fontes, incluindo motores, turbulência atmosférica e sistemas aerodinâmicos.
- De forma objetiva, valores apresentados no anexo C da ISO 2631-1 (1997) define reações prováveis quanto a vibração e ao conforto, com base em 6 graus:

Aceleração (m/s^2)	Reação provável
Menor do que 0,315	Confortável
Entre 0,315 e 0,63	Pouco desconfortável
Entre 0,6 e 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 e 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 e 2,5	Muito desconfortável
Superior a 2	Extremamente desconfortável

Fonte: ISO 2631-1 (1997)



Taxa de Incomodo

A Mas é uma medida objetiva da vibração. Para solucionar essa problemática a taxa de incômodo surgiu em uma tentativa de quantificar essa percepção subjetiva.

$$f(x|u) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi u\sigma)}} \exp\left[\frac{-(\ln u - (\ln x - \frac{1}{2}\sigma^2))^2}{2\ln(1+\delta^2)}\right]$$

$$v(u) = \begin{cases} 0 & u < u_{\min} \\ a \ln(u) + b & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ 1 & u > u_{\max} \end{cases}$$

A onde x é a aceleração da vibração, u é a aceleração que os indivíduos sentem e δ é o coeficiente de variação de u , cujo valor é 0,3

A pela fórmula de Fechner, que considera um limite mínimo e um limite crítico para a aceleração, em que a percepção de incômodo se altera conforme a aceleração varia entre esses limites.

Avaliação do Conforto de Vibração

 Yongshuai Wen avaliou o conforto de vibração e a taxa de incômodo das partes dianteira, central e traseira de uma aeronave sob diferentes condições de voo utilizando a aceleração ponderada abrangente.

Altura I				Altura II		
Velocidade	Frontal	Meio	Traseira	Frontal	Meio	Traseira
I	ND	UPD	UPD	ND	ENTRE	UPD
II	UPD	RD	ENTRE	ND	ENTRE	UPD
III	UPD	RD	UPD	ND	ENTRE	ND
IV	ENTRE	RD	ND	ND	ENTRE	UPD

 Os resultados da avaliação da taxa de incômodo indicam que as probabilidades máximas de se sentir incomodado para as partes frontal, intermediária e traseira são de cerca de 10%, 45% e 25%, respectivamente.



Automóveis

- Em automóveis de passeio, as vibrações são geradas principalmente pela interação dos pneus com a superfície da estrada, pelo motor e pela transmissão. A qualidade do pavimento e a velocidade do veículo são fatores determinantes na intensidade e nas vibrações transmitidas aos ocupantes.
- Em um estudo realizado por Francisco Kaderli e Herbert Martins Gomes para avaliar o conforto vibracional, realizaram-se as medições em quatro automóveis nacionais da mesma categoria de cilindradas. Dois tipos de pavimentação foram escolhidos para realização dos testes: pavimentação de asfalto e de paralelepípedos.



Automóveis



Os resultados mostraram que, embora um veículo pudesse ser mais confortável em média, a exposição à vibração em certas condições, especialmente para motoristas profissionais, poderia exceder os limites de exposição diária estabelecidos pelas normas, o que pode levar a dores nas costas, coluna e desconforto geral.





Trens de Alta Velocidade

- A Os trens de alta velocidade, embora projetados para oferecer uma viagem suave e rápida, também estão sujeitos a vibrações que podem impactar o conforto e, em menor grau, a segurança dos passageiros. As principais fontes de vibração incluem a interação roda-trilho, irregularidades na via, sistemas de propulsão e, em velocidades muito altas, cargas aerodinâmicas.
- A Um estudo de Fedatto Neto e Gomes sobre trens urbanos (Trensurb) em Porto Alegre, Brasil, avaliou os níveis de vibração de corpo inteiro em passageiros.
- A Foi investigado como as irregularidades de longo comprimento de onda afetam a vibração e o conforto dos passageiros.



Trens de Alta Velocidade

- Vibrações verticais têm maior impacto no desconforto que as laterais ou longitudinais. Às velocidades mais altas, ocorrem efeitos de flexão do corpo do trem, especialmente sobre os bogies, elevando os índices de desconforto.
- A exposição contínua à vibração no trem pode resultar em problemas de coluna e agravar dores lombares — além de ser uma métrica útil para avaliação de manutenção da via e do veículo.



Conclusões

- As vibrações são um componente inevitável da experiência de viagem em aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade, com impactos diretos no conforto e na segurança dos passageiros. A análise comparativa revelou que, embora as fontes e as características das vibrações variem entre os modais, a necessidade de avaliá-las e mitigá-las é uma constante.
- Para automóveis, a atenção se concentra na interação com o pavimento e na otimização dos sistemas de suspensão.
- Em aeronaves, a prioridade é a segurança operacional e o desempenho dos pilotos, com a vibração afetando a capacidade de realizar tarefas críticas.
- Nos trens de alta velocidade, o desafio é manter o conforto em altas velocidades, gerenciando as irregularidades da via e os efeitos aerodinâmicos. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias de mitigação são essenciais para aprimorar a qualidade da viagem e proteger a saúde dos ocupantes em todos os modais de transporte.

Obrigado Pela Atenção



Deformações Plásticas em Chapas Metálicas na Indústria Automotiva: Estudo de Estampagem e Conformação Mecânica

Alana Camile Marins
alana.marins@aluno.ifsp.edu.br

Mariana Trevisan Fragoso
mariana.trevisan@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- A indústria automotiva busca reduzir peso, aumentar eficiência e manter segurança estrutural.
- A deformação plástica permite moldar chapas metálicas em geometrias complexas.
- Falhas como trincas, enrugamento e springback comprometem qualidade e desempenho.
- O estudo combina análise teórica, ensaios experimentais e simulações numéricas.
- Materiais como AHSS e alumínio são destaque por suas características mecânicas.



Fundamentos da Deformação Plástica

- ▶ A deformação plástica ocorre quando a tensão excede o limite de escoamento do metal.
- ▶ Encruamento aumenta a resistência devido ao acúmulo de discordâncias.
- ▶ Anisotropia influencia a distribuição da deformação na chapa.
- ▶ Ductilidade uniforme/localizada determina risco de fratura.
- ▶ Modelos como Hollomon descrevem o comportamento tensão–deformação.



Modelos Constitutivos

- Hollomon: $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ — representa o encruamento clássico.
- Swift: $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ — inclui pré-deformação.
- Voce — modela saturação do encruamento.
- Ludwik — combina tensão inicial com encruamento.
- Hill 48 e Barlat 2000 — fundamentais para simulações de chapas automotivas anisotrópicas.



Materiais na Indústria Automotiva

- ▶ DC01: boa conformabilidade e baixo risco de falha.
- ▶ DP600 (AHSS): alta resistência, menor ductilidade.
- ▶ Alumínio 6061-T6: leve, porém com alto springback.
- ▶ AHSS reduzem peso estrutural, mas exigem maior controle do processo.
- ▶ Alumínio é amplamente usado em carrocerias e capôs para reduzir massa.



Metodologia do Estudo

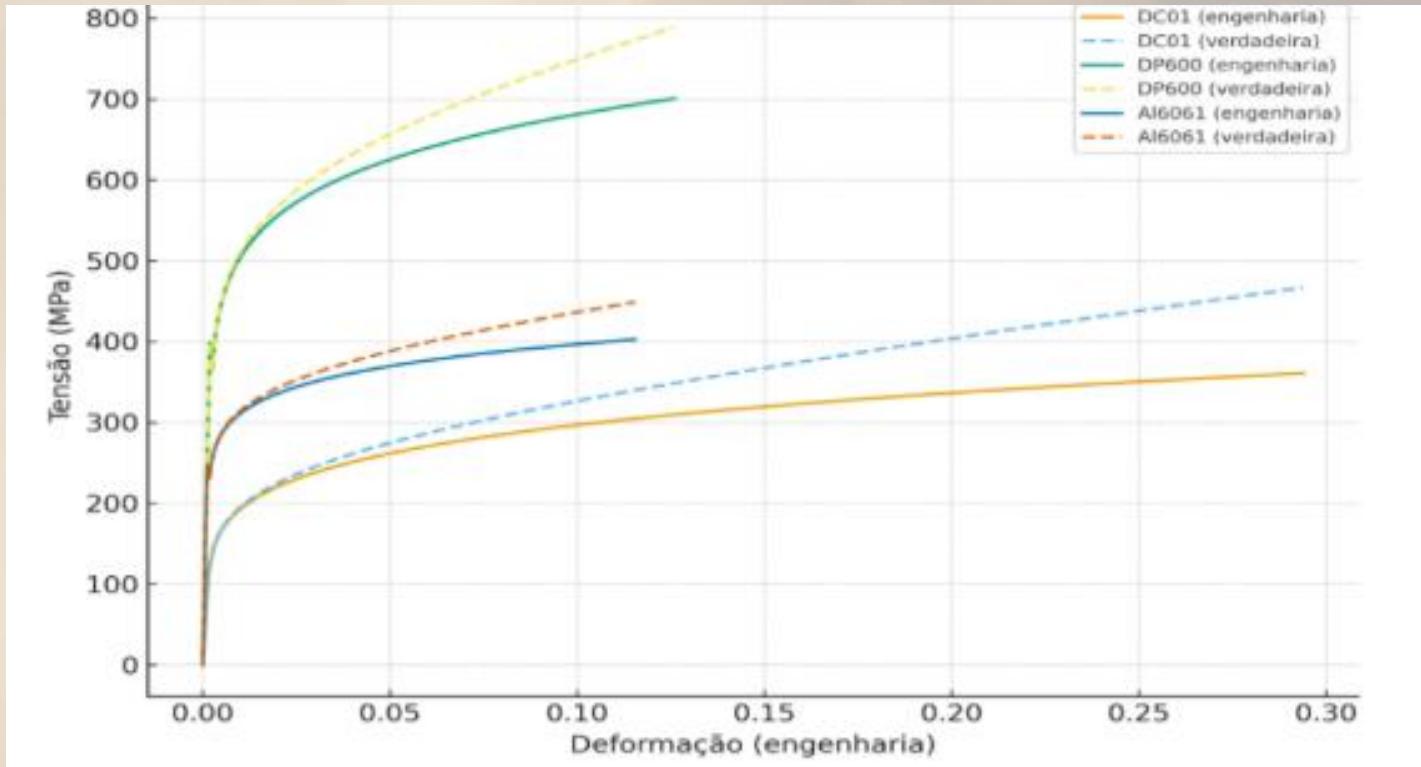
- Materiais analisados: DC01, DP600 e alumínio 6061-T6.
- Ensaios de tração obtiveram YS, UTS, alongamento, K e n.
- Ensaios de estampagem: repuxo profundo e dobramento em V.
- Simulações numéricas pelo método dos elementos finitos.
- Validação realizada comparando simulação e ensaios reais.



Diagramas Tensão–Deformação

- Curvas mostram comportamento elástico, plástico e fratura.
- DC01 apresenta maior alongamento e boa conformabilidade.
- DP600 apresenta maior tensão de escoamento e menor ductilidade.
- Alumínio possui menor alongamento e maior recuperação elástica.
- Diagramas fundamentais para prever desempenho na estampagem.

Diagramas Tensão–Deformação





Resultados Mecânicos

- DC01: maior profundidade de estampagem e menor springback.
- DP600: maior resistência, porém com trincas leves nas bordas.
- Alumínio 6061-T6: ocorreu enrugamento e alto springback.
- Diferenças em YS, UTS e alongamento influenciam formabilidade.
- Parâmetros K e n determinam o nível de encruamento.



Índices de Formabilidade

- FLD identifica regiões seguras e críticas de deformação.
- Índice Erichsen mede profundidade máxima antes da fratura.
- Coeficiente r analisa anisotropia e tendência à formação de orelhas.
- Utilizados para prever falhas e calibrar simulações.
- Reforçam a confiabilidade dos procedimentos experimentais.

Índices de Formabilidade

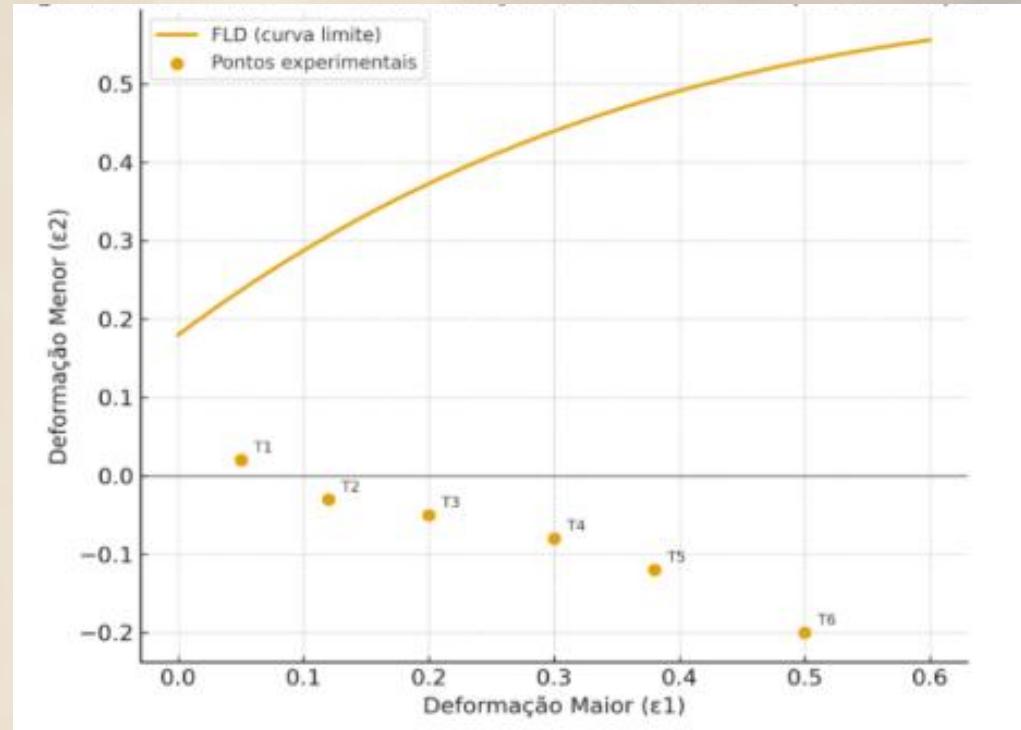


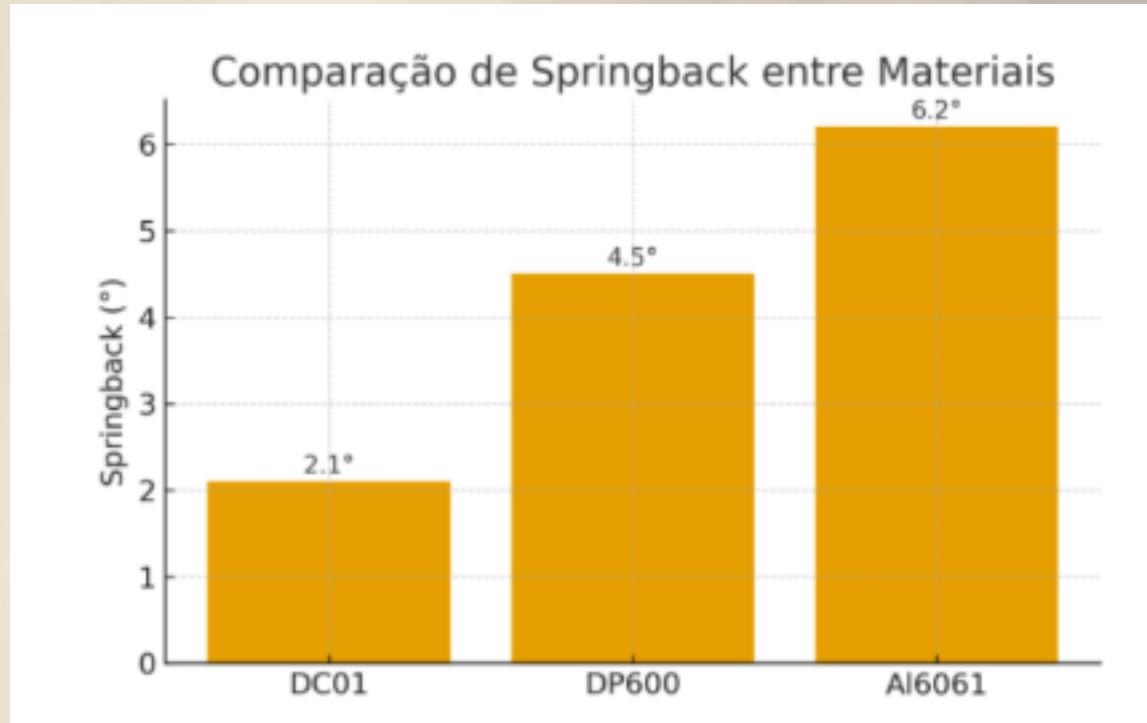
Diagrama de Limite de Conformação (FLD) com pontos experimentais.



Resultados das Simulações

- ▶ Previsões indicaram regiões críticas de tensão e possíveis falhas.
- ▶ DP600 e alumínio mostraram maiores gradientes de tensão.
- ▶ Diferença entre simulação e experimento foi de apenas 5–8%.
- ▶ Simulações confirmaram necessidade de compensação geométrica.
- ▶ Auxiliam na otimização de matrizes e ferramental.

Resultados das Simulações



Comparação do ângulo de springback entre os materiais estudados. O alumínio apresenta maior recuperação elástica, exigindo compensações geométricas mais rigorosas.

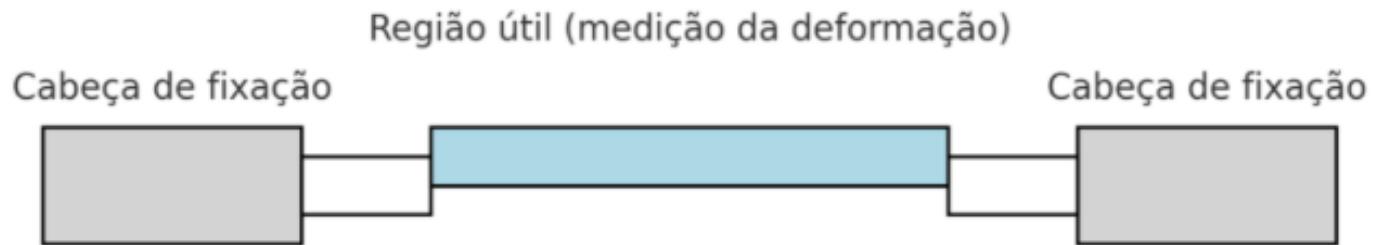


Estudos de Caso na Indústria Automotiva

- ▶ Ford e Volkswagen aplicam AHSS para reduzir peso estrutural.
- ▶ Tesla e Jaguar usam carrocerias de alumínio com processo HFQ.
- ▶ Volvo utiliza estampagem a quente com aço ao boro (>1500 MPa).
- ▶ Toyota e Hyundai combinam AHSS com alumínio em modelos modernos.
- ▶ Integração entre novos materiais e processos é tendência consolidada.

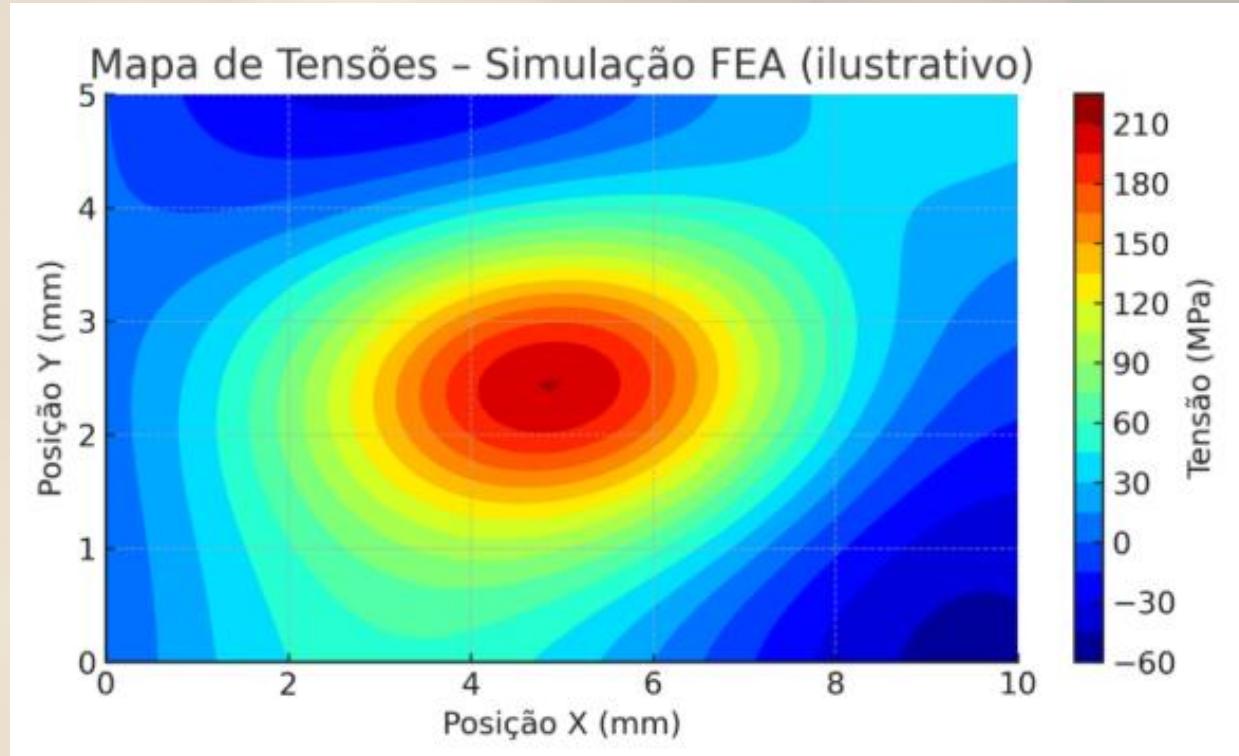
Esquema de Corpo de Prova

Esquema de Corpo de Prova (Dog-bone) - Ensaio de Tração



Esquema de Corpo de prova - Ensaio de Tração.

Mapa de Tensões





Exemplo de Defeitos





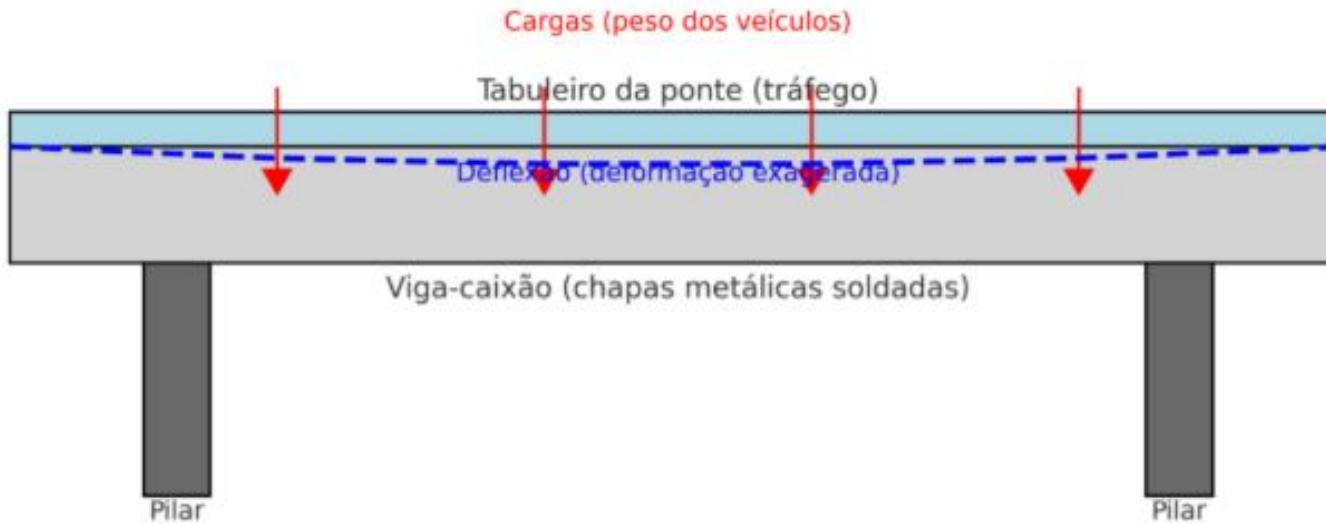
Setor Aeronáutico

- Requer tolerâncias rigorosas e resistência à fadiga.
- Ligas aplicadas: alumínio aeronáutico, titânio e aços especiais.
- Processos: hot forming, superplastic forming e SPF.
- Springback influencia geometria e aerodinâmica final.
- Exige inspeções NDT e validação estrutural intensiva.



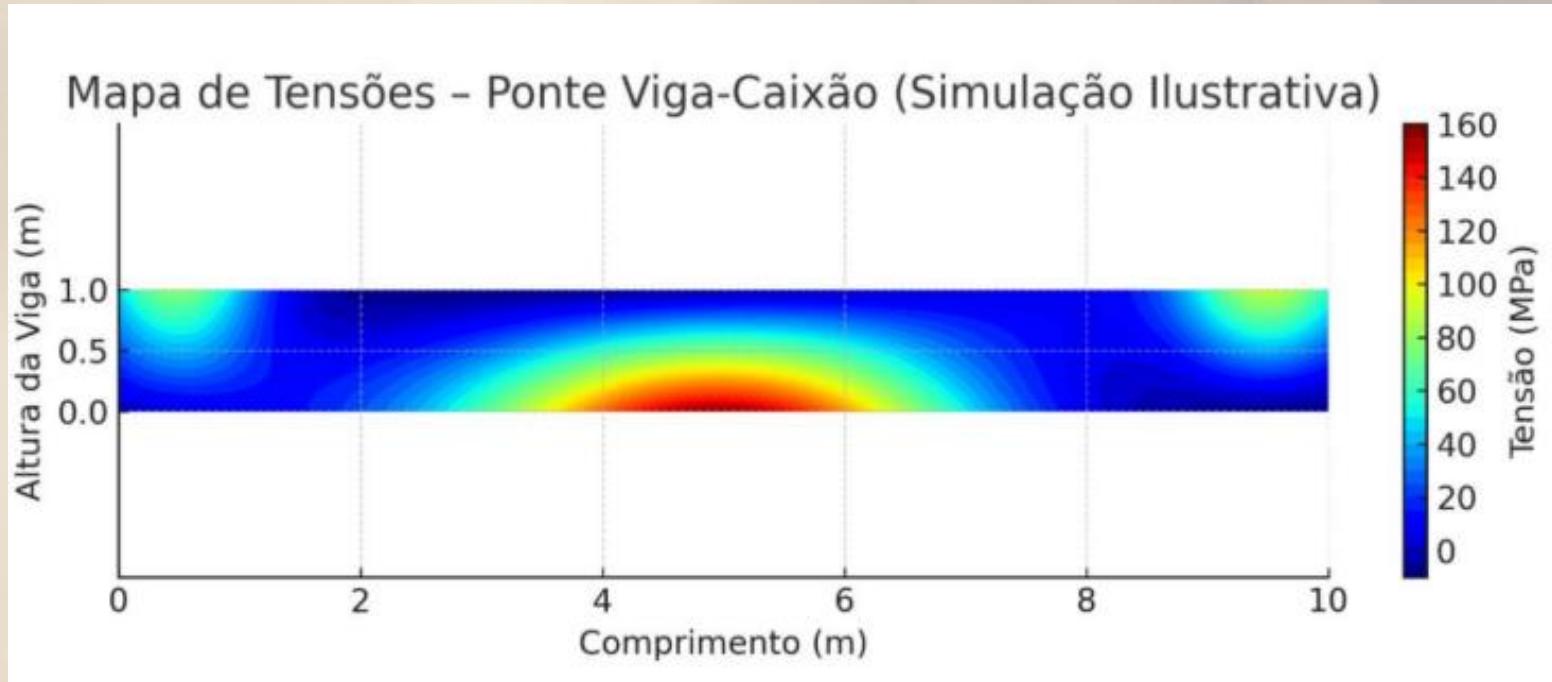
Esquema de Ponte Metálica

Esquema de Ponte Metálica em Viga-Caixão (Comportamento Estrutural)



Esquema de Ponte Metálica em Viga-Caixão.

Mapa de Tensões



Mapa de Tensões (Ponte Viga-Caixão).



Conclusões

- A A análise confirmou que o comportamento de deformação plástica dos materiais é decisivo para a qualidade e a segurança dos componentes automotivos.
- A Materiais como AHSS e alumínio trazem vantagens estruturais, mas exigem maior controle devido à baixa ductilidade e ao elevado springback.
- A A integração entre ensaios experimentais e simulações numéricas mostrou alta eficácia, permitindo prever falhas e otimizar o processo antes da produção.
- A Os estudos de caso evidenciam que a indústria já depende de processos avançados, como estampagem a quente e HFQ, para atender às exigências de desempenho e redução de peso.
- A O futuro aponta para manufatura digital, uso de IA e maior sustentabilidade, consolidando a combinação entre novos materiais e modelos constitutivos avançados como caminho central para o avanço da engenharia de conformação.

Obrigado Pela Atenção



Tensões Térmicas em Discos de Freio Automotivos: Estudo do Efeito da Variação de Temperatura em Componentes de Alta Rotação

Matheus José Ferreira Borelli
borelli.matheus@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- ▶ O sistema de freios é essencial para a segurança veicular.
- ▶ Converte energia cinética e potencial em calor por atrito.
- ▶ O sistema de freios é essencial para a segurança veicular
- ▶ Historicamente: freios a tambor dominaram devido a simplicidade e baixo custo.
- ▶ Hoje: freios a disco encontram em ascensão por oferecer melhor desempenho, especialmente em condições severas.



Introdução

- Geração e dissipação de calor afetam todos os componentes:
 - Fluido de freio, Cilindros, Mancais, Selos.
- Potência de frenagem:
 - Máxima no início da desaceleração
 - Reduz progressivamente até a parada
- Temperaturas em frenagens severas (veículos comerciais): 300 °C a 400 °C no disco
- Consequência crítica: fenômeno de fade que provoca perda de eficiência de frenagem



Introdução

- Materiais com alta condutividade térmica e calor específico, como fibra de carbono.
- Otimização geométrica e uso de canais de ventilação nos discos





Definições

Segundo LIMPERT, temos a seguinte equação para a energia de frenagem:

$$E_b = \frac{m}{2} \left(1 + \frac{I}{R^2 m}\right) V_1^2 \approx \frac{kmV_1^2}{2}$$

A partir de sua derivada ao tempo obtemos:

$$P_b = Kma(V_1 - at)$$

Assim temos a potencia media, total e o fluxo de calor superficial:

$$P_{bav} = \frac{kmaV_1}{2}$$

$$P_{(0)} = 2P_{bav}$$

$$P''_{(0)} = \frac{P_{(0)}}{A_s}$$

Para determinarmos a temperatura máxima da superfície do disco em uma única parada, sem considerarmos o resfriamento do ambiente, utilizaremos a seguinte equação:

$$T_{máx} - T_i = \frac{5}{18} \frac{\frac{1}{2} P''_{(0)} t_s^{1/2}}{(\rho c k)^{1/2}}$$

Onde:

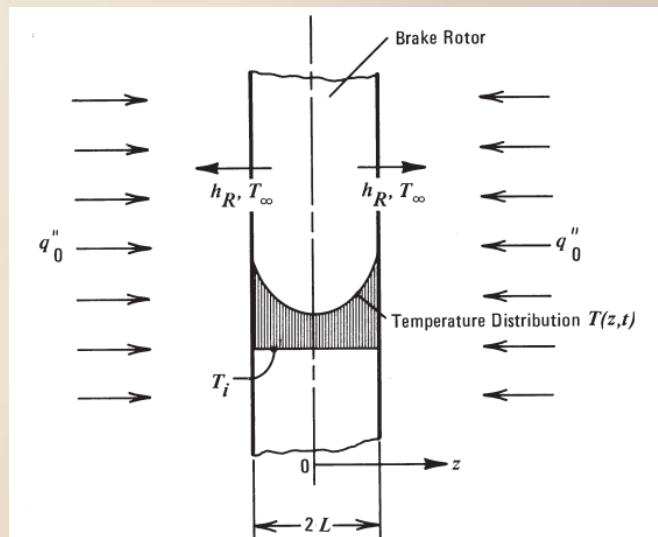
- t_s é o tempo de frenagem.
- ρ é a massa específica do material.
- c é o calor específico.
- k é condutividade térmica do material.



Definições

 LIMPERT explica que para encontrar a fórmula da distribuição de calor ao longo do rotor para um fluxo de calor constante, é utilizado uma superposição $\theta(z, t) = \Psi(z, t) + \Phi(z)$, além de determinar suas condições iniciais. Por fim, obtemos a seguinte equação a qual representa o efeito físico da imagem abaixo:

$$\theta_0(z, t) = \left(\frac{q''_0}{h_r} \right) \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\theta_i h_r}{q''_0} - 1 \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L + \sin(\lambda_n L) \cos(\lambda_n L)} \times e^{-\alpha_t t \lambda_n^2} \cos(\lambda_n z) + 1 \right]$$





Definições

Abaixo temos a equação da tensão de compressão pelo aumento de temperatura:

$$\sigma = - \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \alpha_T \Delta T$$

Sendo ela utilizada para determinar a equação da tensão para um fluxo de calor constante e para um fluxo de calor decrescente ao tempo:

$$\sigma(z, t) = \frac{2a_T E q''_0}{(1-\nu)h_r} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(\lambda_n L) e^{-a_t \cdot t \cdot \lambda_1^2}}{\lambda_n L + \sin(\lambda_n L) \cos(\lambda_n L)} \times \left(\frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L} - \cos(\lambda_n z) \right) \right\}$$

$$\sigma(z, t) = \frac{q''(0)}{q''_0} \sigma_0(z, t) + \frac{2 \cdot q''(0) \cdot a_T \cdot E}{t_s(1-\nu)h_r} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha_1)}{\lambda_1 L + \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1)} \times \frac{1 - e^{-a_t \cdot \lambda_1^2 \cdot t}}{a_t \cdot \lambda_1^2} \cdot \left(\frac{\sin(\alpha_1)}{\lambda_1 L} - \cos\left(\lambda_1 z \cdot \frac{180}{\pi}\right) \right)$$



Objetivo

Para definição do estudo, foi considerada uma situação de parada única, onde o veículo escolhido foi um Volkswagen Gol GL 1.8, pesando 950kg, o qual possui dois passageiros de 70kg e 10kg de bagagem. Sendo a desaceleração do veículo de 0.4g a uma velocidade 100 km/h (27.7 m/s), com porcentagem de frenagem de 75% nos freios dianteiros, fator de massa rotativa $k = 1$, distribuição de calor sobre os rotores de 0.90, e um deslizamento de 10% do pneu, e temperatura inicial nos freios de 333.15 K (60°C) e temperatura ambiente de 298.15 K (25°C).

Foi escolhido o modelo de freio a disco da *Brembo*, por ser similar e compatível com os freios a disco de carros como o Volkswagen Gol I, Gol II, Passat entre outros carros.

O material do rotor escolhido foi o **Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 40**.



Resultados



Ao calcular o aumento da temperatura para um fluxo de calor constante, obtemos os seguinte valores considerando $z_1 = L$, $z_0 = 0$ e $t_s = 7,079$.

$$\theta_0(z_1, t_s) = T_0 - T_i = 237.68 \text{ K}$$
$$\theta_0(z_0, t_s) = T_0 - T_i = 49.09 \text{ K}$$



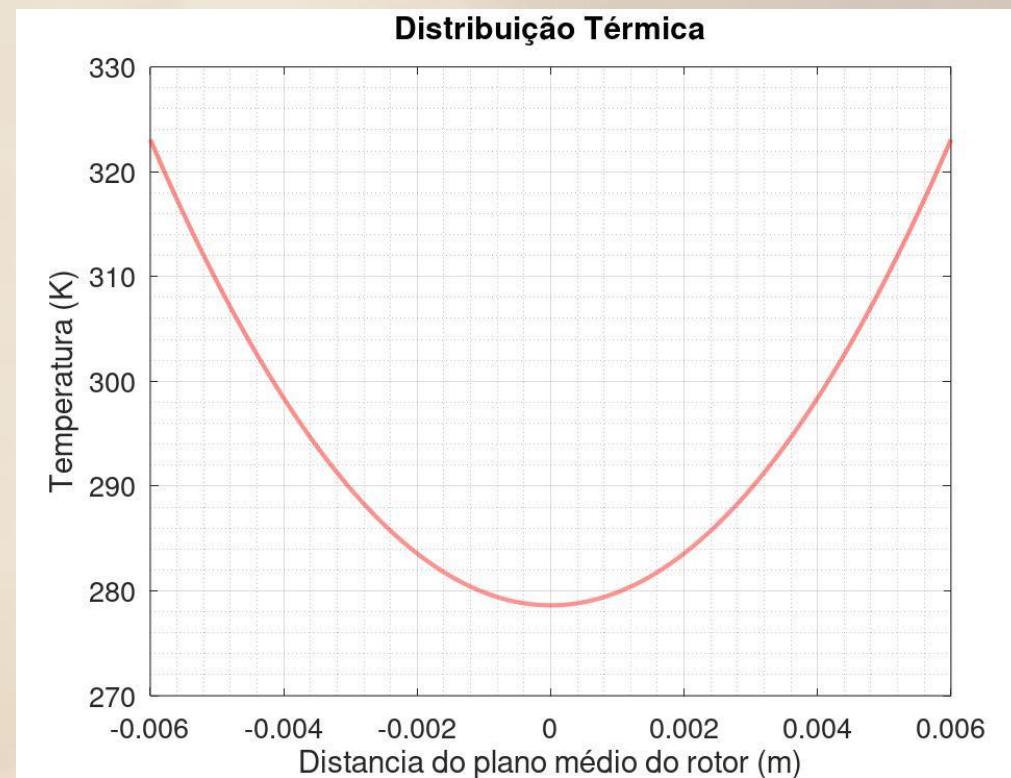
Ao calcular a tensão para um fluxo de calor constante, obtemos o seguinte valor considerando $z_1 = L$ e $t_s = 7,079$.

$$\sigma(z, t) = 65,375 \text{ MPa}$$



Resultados

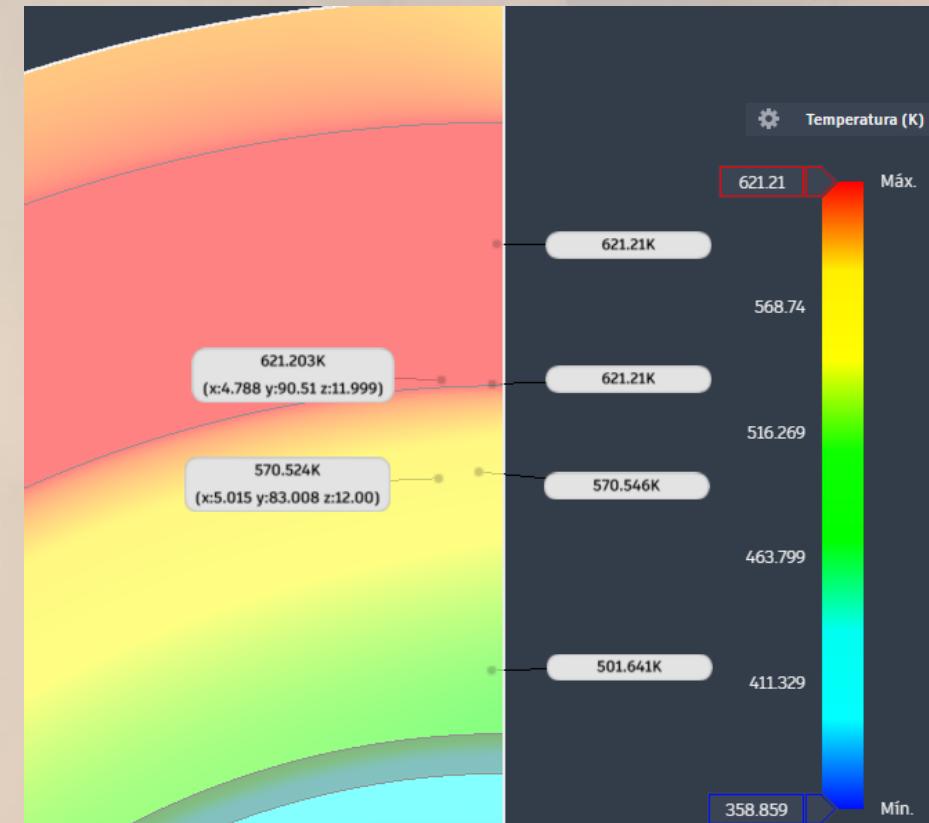
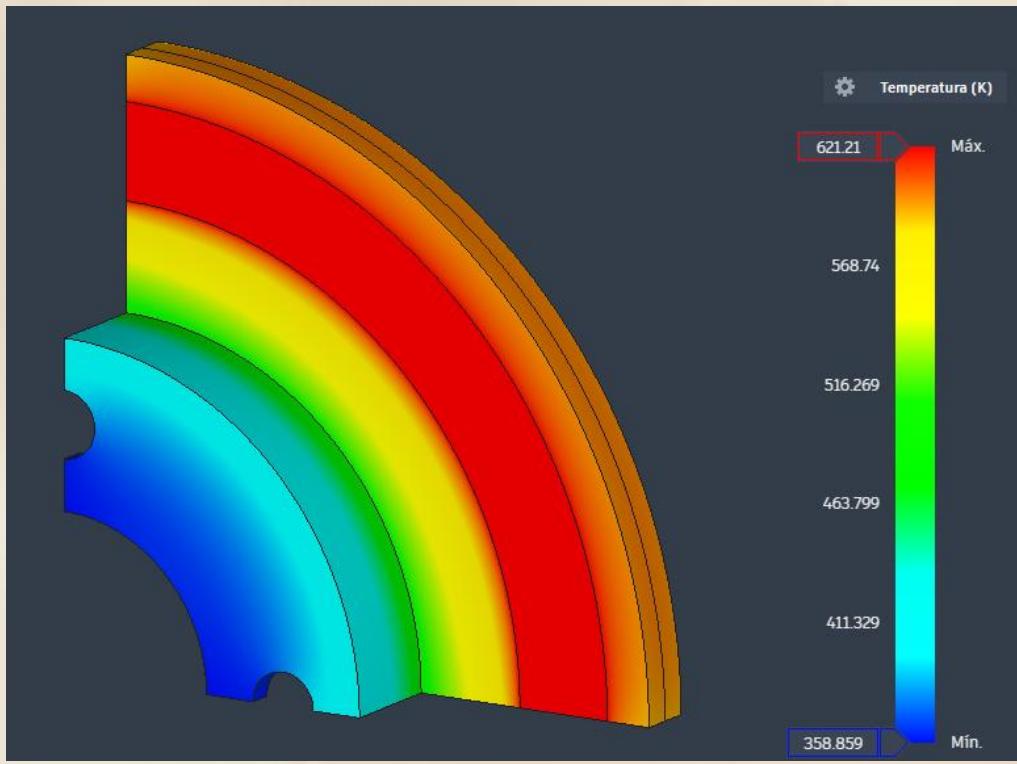
A Distribuição do aumento térmico no rotor ao longo da distância z (distância horizontal do rotor ao seu centro).



Resultados



Resultado da simulação térmica no rotor.

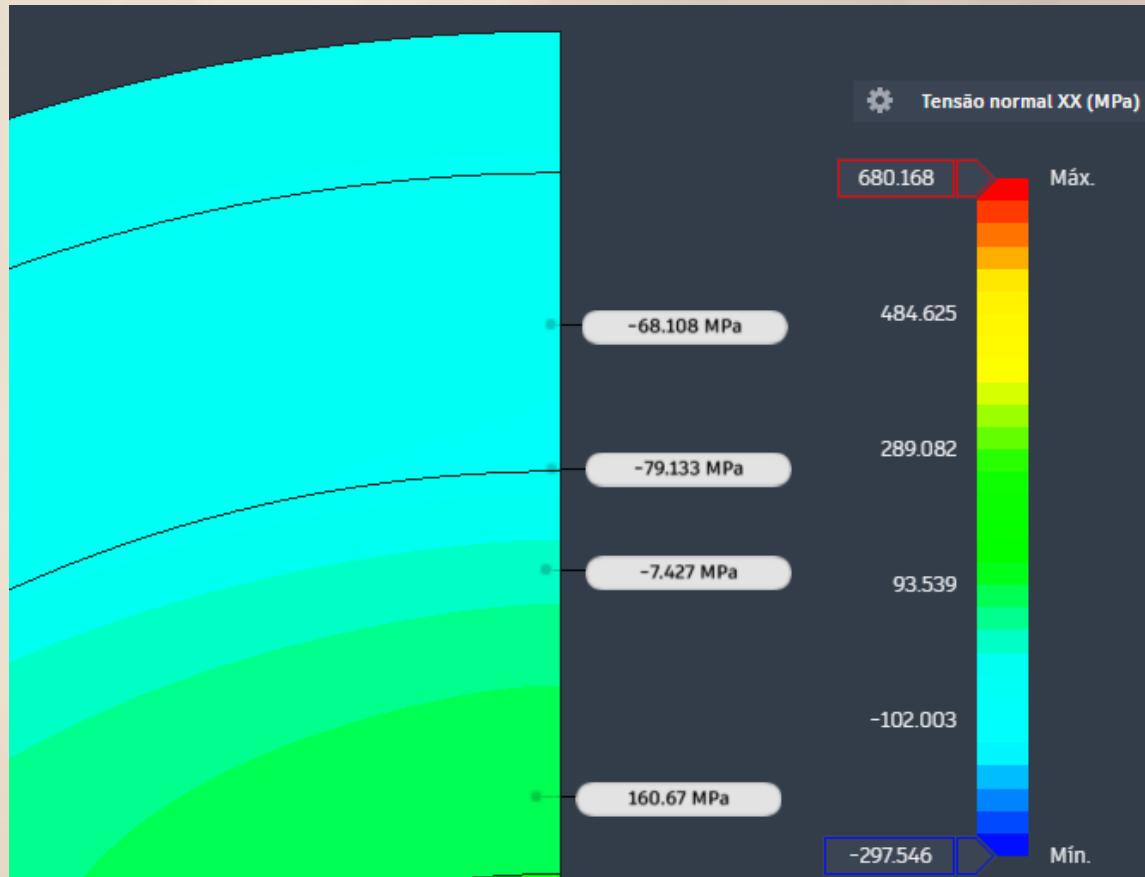




Resultados



Resultado da simulação para tensão perpendicular ao eixo X.

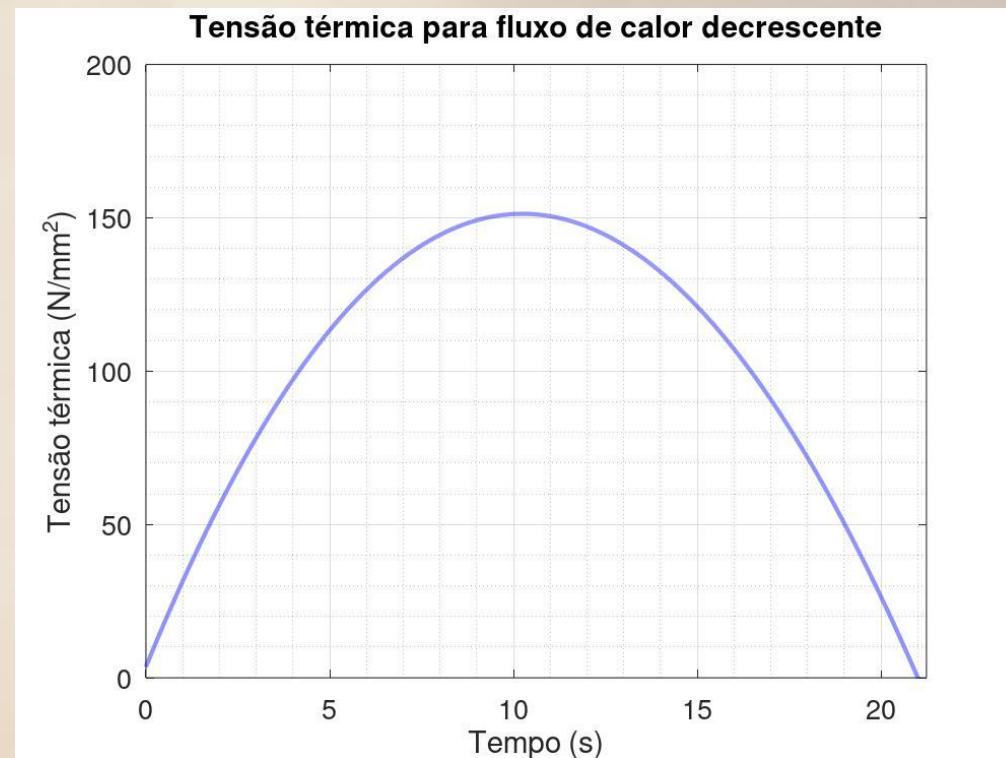




Resultados



Simulação analítica da tensão térmica para um fluxo de calor decrescente ao tempo.





Conclusões

- Compreensão completa dos efeitos térmicos e mecânicos em discos de freio durante frenagens intensas.
- Modelo analítico de Limpert mostrou-se eficiente para estimativa rápida de:
 - Variação da temperatura máxima ≈ 237 K (superfície do rotor).
 - Tensões compressivas máximas ≈ 65 MPa.
- Validação da simulação CAD/CAE (Fusion 360) confirmou qualitativamente:
 - Distribuição térmica simétrica.
 - Gradiente radial esperado.
- Temperatura máxima fortemente influenciada pela Energia dissipada e pelo Coeficiente de convecção (Re).
- Fluxo de calor constante apresenta resultado mais conservadoras, enquanto no fluxo decrescente ao tempo representação mais realista da frenagem.

Obrigado Pela Atenção



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

Jafar Mourad Mourad
jafar.m@aluno.ifsp.edu.br

João Pedro Gomes Tozzo
j.tozzo@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



O artigo trata das vibrações em motores de combustão interna, focando nos efeitos dessas vibrações sobre mancais.
(rolamentos) e virabrequim.



Destaca-se que essas vibrações são críticas para a durabilidade dos componentes e para a confiabilidade do motor.



Objetivo do estudo: analisar os modos de vibração (torcional, flexional, translacional), modelá-los de forma teórica/numerérica e discutir mitigação.



Tipos de Vibração



Torsional: causada por torque alternado no virabrequim, e é especialmente perigosa por poder gerar ressonância.



Flexional: curvatura do virabrequim devido a cargas radiais, afetando os mancais.



Longitudinal (axial): movimento ao longo do eixo; embora muitas vezes menos estudado, pode influenciar bastante a durabilidade.



Também é explicado o conceito de modos de vibração (formas vibracionais) e frequências naturais, e o fenômeno de ressonância.

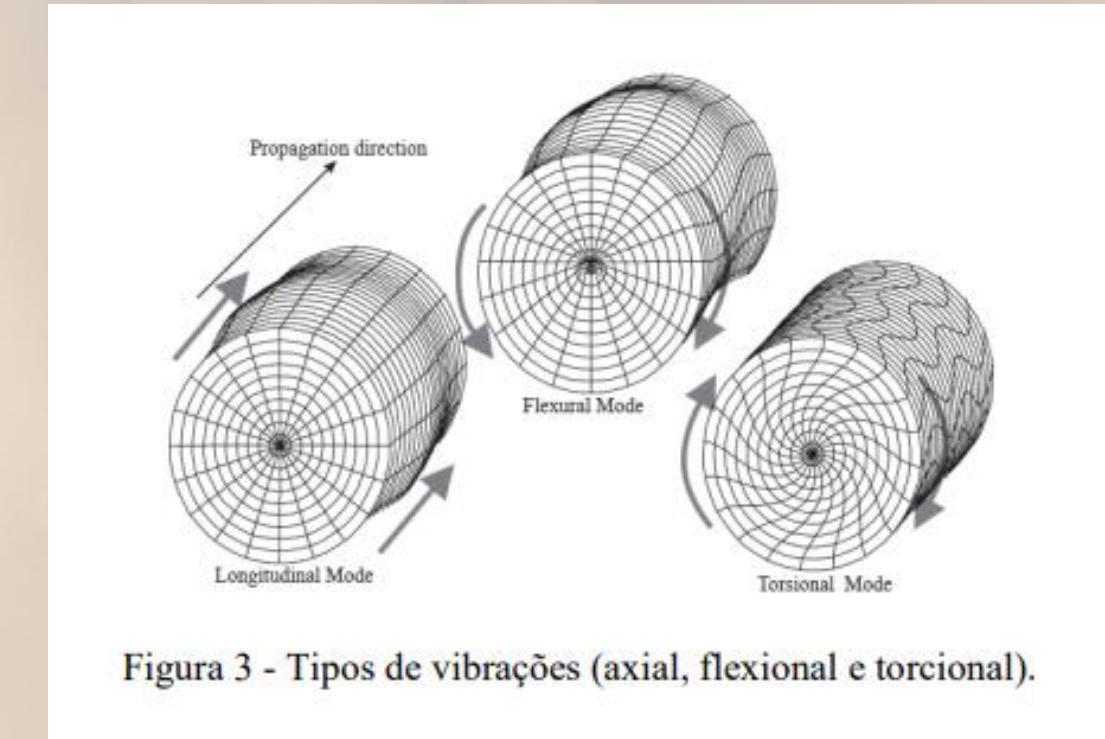


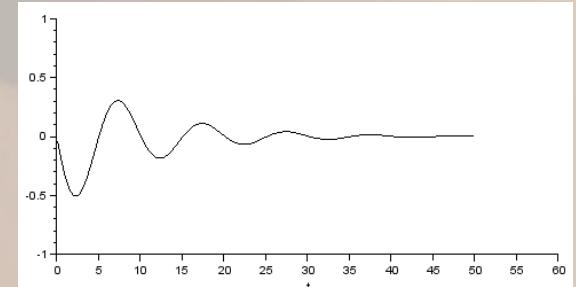
Figura 3 - Tipos de vibrações (axial, flexional e torcional).



Modelagem Dinâmica



Modelos analíticos básicos: sistema massa-mola-amortecedor para representar vibração translacional.
(1 GDL)



Vibração torsional: modelada com momento de inércia, rigidez torsional e amortecimento.
(n GDL rigidez torcional e axial, além de amortecimentos.)



Flexão: é usada a equação da viga de Euler–Bernoulli para modelar o virabrequim como uma viga com massas concentradas (contra-pesos, pinos, etc.).

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

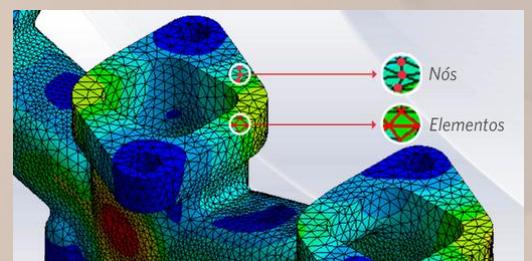


Métodos numéricos:

- Modelo de parâmetros concentrados (“lumped-parameter model”).
- Elementos Finitos (FE): para analisar com precisão tensões, modos acoplados torção-flexão, geometria realista.



Também são mencionados modelos acoplados fluido-estrutura para considerar a lubrificação dos mancais.





Mitigação das Vibrações

O artigo propõe várias estratégias para reduzir os efeitos das vibrações:

Balanceamento: ajustar o equilíbrio do virabrequim para reduzir forças iniciais.

Dampers (amortecedores): principalmente amortecedores torsionais (“harmonic damper”) para absorver energia em frequências críticas.

Suportes resilientes / isoladores: reduzir a transmissão de vibração para a estrutura.

Projeto do virabrequim: aumentar rigidez, otimizar geometria de filetes, tratamentos superficiais para reduzir concentração de tensão.

Manutenção e monitoramento: lubrificação adequada + análise de vibração para detectar problemas cedo.

Balance shafts: em motores com menos cilindros ou desbalanceados, eixos de平衡amento podem ser usados.



Efeitos Dinâmicos sobre Mancais e Virabrequim



As vibrações podem afetar mancais e virabrequins de varias maneiras. Esforços cílicos, desgaste por contato metal-metal, aumento de temperatura e variações de carga no filme de óleo são algumas delas.



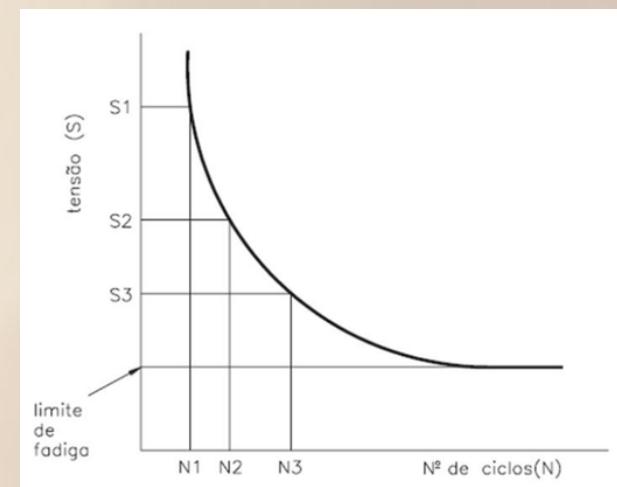
Os principais mecanismos de dano são:



Lubrificação Hidrodinâmica e Perturbações



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



A Regra de Miner fornece uma aproximação da deterioração acumulada:

$$D = \Sigma \left(\frac{n_i}{N_i} \right)$$



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



Análise Modal e Aplicações



Análise modal experimental: testes com martelo de impacto ou “shaker” em junção a acelerômetros para medir modos naturais.

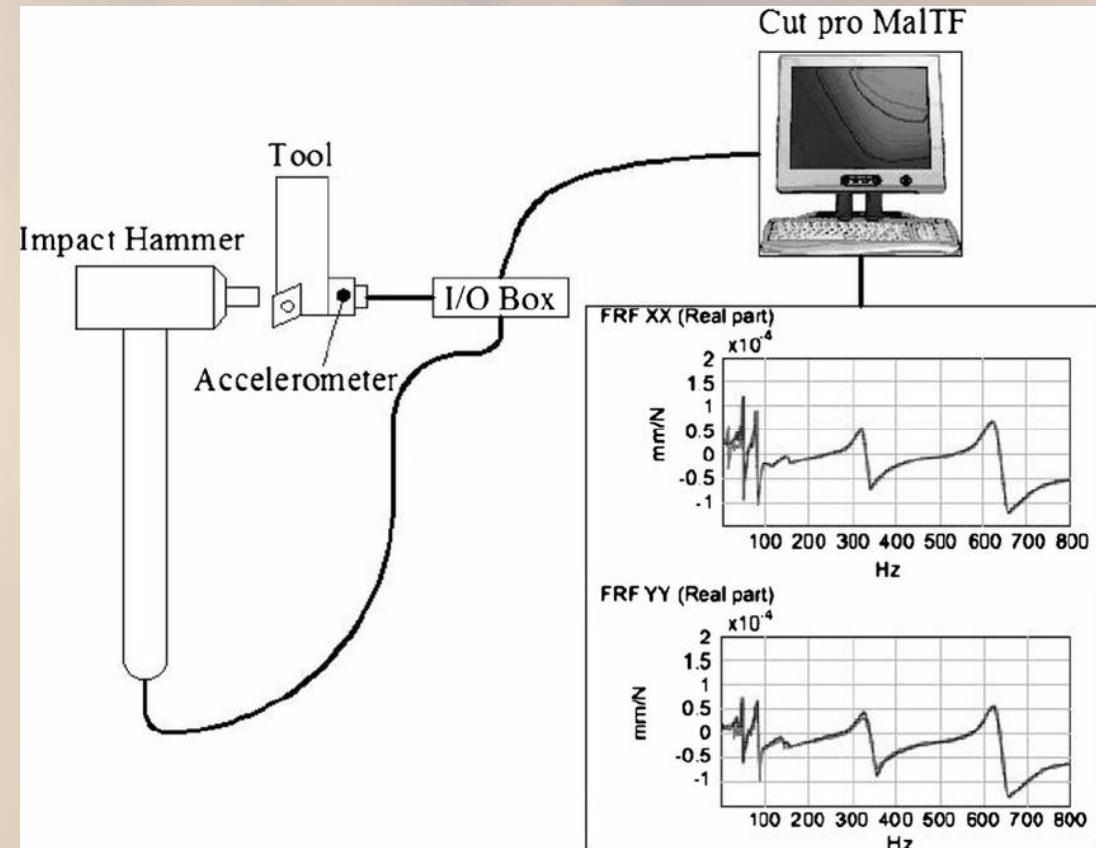


Análise modal numérica: uso de FEM para obter frequências naturais e tensões locais.



A junção das análises permite aplicações como:

- Definição de regimes de operação seguros
- otimizar geometria do virabrequim para reduzir tensões
- monitoramento de vibração para manutenção preditiva





Relevância Prática



Engenheiros de projeto de motores podem usar esses modelos para evitar falhas por ressonância e projetar componentes mais duráveis.



Técnicos de manutenção podem aplicar o monitoramento de vibração para detectar problemas antes de falhas.



Em automotivo, naval, aero, etc., a durabilidade do virabrequim e mancais é crítica — reduzir vibração significa menor custo de manutenção e maior confiabilidade.



Conclusões



O artigo apresenta uma visão consolidada sobre os modos de vibração principais (torsional, flexional, translacional) e seu impacto sobre virabrequim e mancais.



Reforça que a combinação de análise modal (experimento + numérico), projeto apropriado (balanceamento, dampers) e manutenção (lubrificação + monitoramento) é a estratégia mais eficaz para aumentar a vida útil dos componentes.

Obrigado Pela Atenção



Análise de Vibrações em Asas de Aeronaves Durante Manobras de Voo: Estudo da Influência do Flutter e de Modos de Vibração

Julia Cristina de Oliveira
cristina.o@aluno.ifsp.edu.br

Layssa de Jesus Silva São Silverio
l.silverio@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- 💡 Importância da aeroelasticidade na aviação, especialmente para garantir segurança e eficiência estrutural.
- 💡 O que é flutter: instabilidade autoexcitada que pode gerar falha estrutural
- 💡 Objetivo: analisar modos de vibração e identificar condições críticas de flutter



Fundamentos de Vibrações Mecânicas

A Vibração mecânica:

- Movimento oscilatório ao redor de uma posição de equilíbrio, resultante das forças de inércia, elasticidade e amortecimento.

A Tipos de vibração:

- Livre: após uma perturbação inicial, sem forças contínuas.
- Forçada: provocada por excitações constantes, como turbulência ou escoamento do ar.

A Frequências naturais e modos de vibração:

- Cada estrutura possui frequências próprias associadas a modos como flexão, torção ou modos combinados.

A Ressonância:

- Ocorre quando a frequência de excitação coincide com a frequência natural, podendo gerar altas amplitudes e favorecer o surgimento de flutter.



Dinâmica de Asas em Aeronaves de Pequeno Porte

- Asas de pequeno porte são altamente flexíveis, o que as torna mais suscetíveis a vibrações e fenômenos aeroelásticos.
- Equilíbrio entre leveza e rigidez.
- Projeto exige otimização estrutural, garantindo frequências naturais afastadas das excitações mais prováveis para evitar instabilidades.





Flutter em Asas de Aeronaves Não Tripuladas

- ⚠ Flutter é uma instabilidade aeroelástica que gera oscilações autoalimentadas e perigosas.
- ⚠ O fenômeno ocorre pelo acoplamento entre flexão e torção da asa.
- ⚠ A velocidade crítica de flutter define o ponto onde qualquer perturbação se torna instável.



Métodos de Análise e Prevenção

- A análise modal identifica frequências naturais e modos de vibração para prever riscos aeroelásticos.
- Ensaios em túnel de vento permitem observar flutter em condições controladas
- Fatores de segurança mantêm a aeronave longe da velocidade crítica de flutter
- Aumentar a rigidez torcional reduz a chance de acoplamento flexo-torcional.





Conclusões

- A O estudo das vibrações é essencial para garantir segurança estrutural e desempenho aerodinâmico.
- A O flutter é um dos principais riscos aeroelásticos, pois surge do acoplamento entre flexão e torção.
- A Aeronaves do AeroDesign são mais suscetíveis a instabilidades devido à leveza, flexibilidade e escala reduzida.
- A Vibrações devem ser tratadas como parte essencial do projeto, contribuindo para aeronaves mais seguras.

Obrigado Pela Atenção



Comparativo de Comportamento Mecânico entre Aço e Alumínio em Estruturas Aeronáuticas e Automobilísticas: Avaliação de Vantagens e Limitações

Breno Augusto Gabaldi Wolf
breno.wolf@aluno.ifsp.edu.br

Pedro Virgílio Bueno
pedro.virgilio@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- A engenharia moderna busca duas coisas ao mesmo tempo: Eficiência energética (menos combustível) e maior segurança.
- A escolha do material correto é a chave para resolver esse dilema.
- Vamos comparar os dois gigantes: o Aço de Alta Resistência (DP980) e as Ligas de Alumínio (6061 e 7075).



Prioridades: Custo vs. Peso

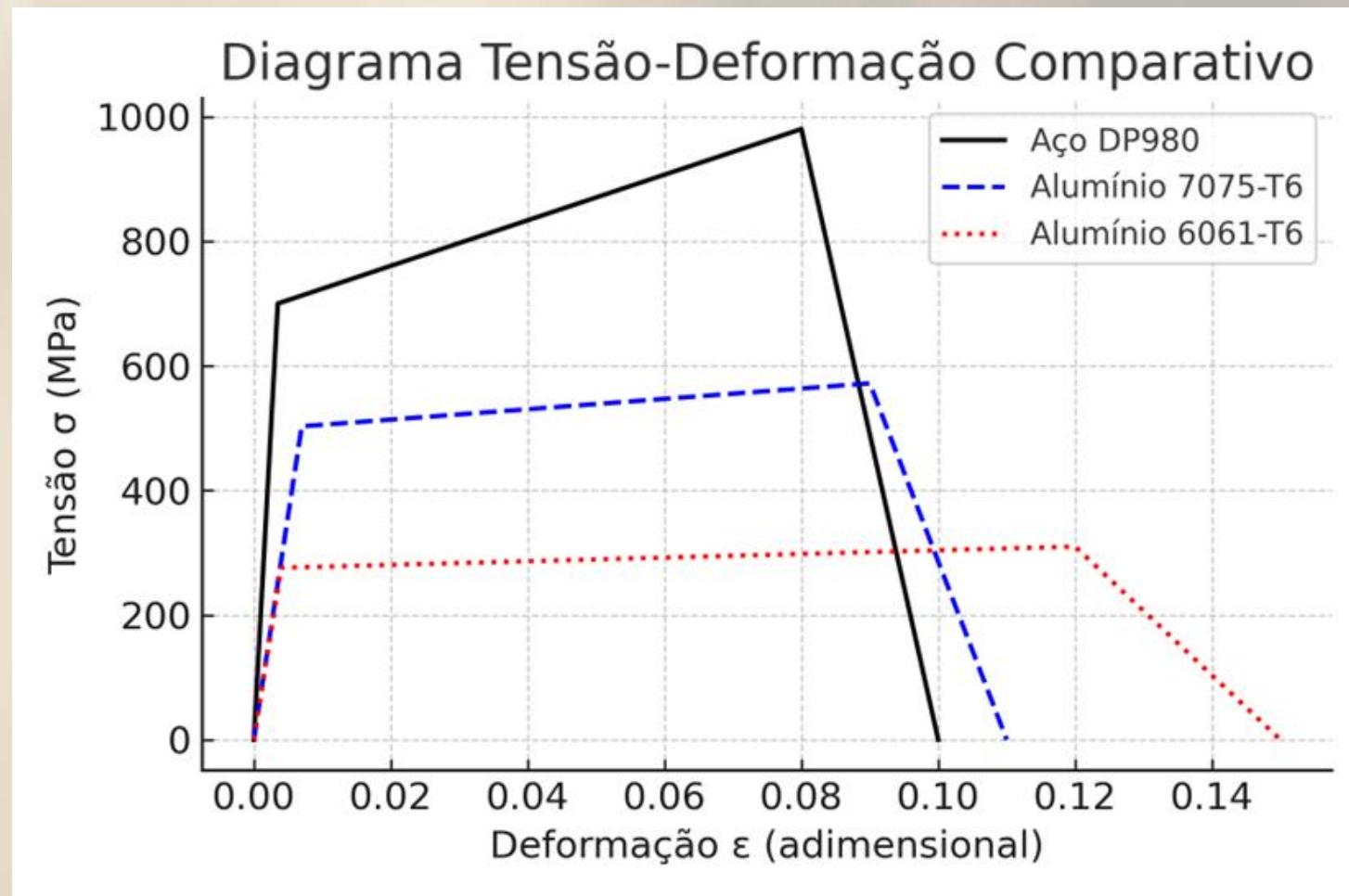
- ▶ Indústria Automotiva (Carros): O foco principal é o baixo custo para produção em massa.
- ▶ Busca o equilíbrio perfeito entre segurança e preço.
- ▶ Indústria Aeronáutica (Aviões): O foco principal é a minimização do peso.
- ▶ Cada quilo economizado vale o investimento, pois reduz o consumo de combustível.



Conceitos: O que é Tensão-Deformação?

- Este gráfico é o "RG" de um material. Mostra como ele se comporta ao ser esticado.
- Rigidez (Módulo E): O quanto "duro" é o material. É a inclinação da reta.
- Limite de Resistência: A força máxima que o material aguenta.

Conceitos: Diagrama Tensão-Deformação





Os Materiais: Quem são eles?

- Aço DP980: Aço "Dual-Phase". Combina uma fase macia (para moldar) e uma fase dura (para resistir).
- Alumínio 6061-T6: Liga de média-alta resistência. Ótima contra corrosão.
- Alumínio 7075-T6: O "campeão" do alumínio. Resistência altíssima, padrão da aviação.



Resultado 1: Força Bruta

- 💡 Olhando apenas os números absolutos, sem considerar o peso:
- 💡 Rigidez: O Aço DP980 é 3x mais rígido que os alumínios.
- 💡 Resistência: O Aço DP980 é 70% mais resistente que o melhor alumínio (7075).



Resultado 1: Propriedades Absolutas (Tabela)

Propriedades	Unidade	Aço DP980	Alumínio 6061-T6	Alumínio 7075-T6
Densidade (ρ)	g/cm ³	7,85	2,70	2,81
Modulo de Elasticidade	GPa	210	69	71,1
Limite de Escoamento	MPa	~780	~276	~503
Limite de Resistência	MPa	~980	~310	~572
Alongamento na Ruptura	%	~10	~17	~11

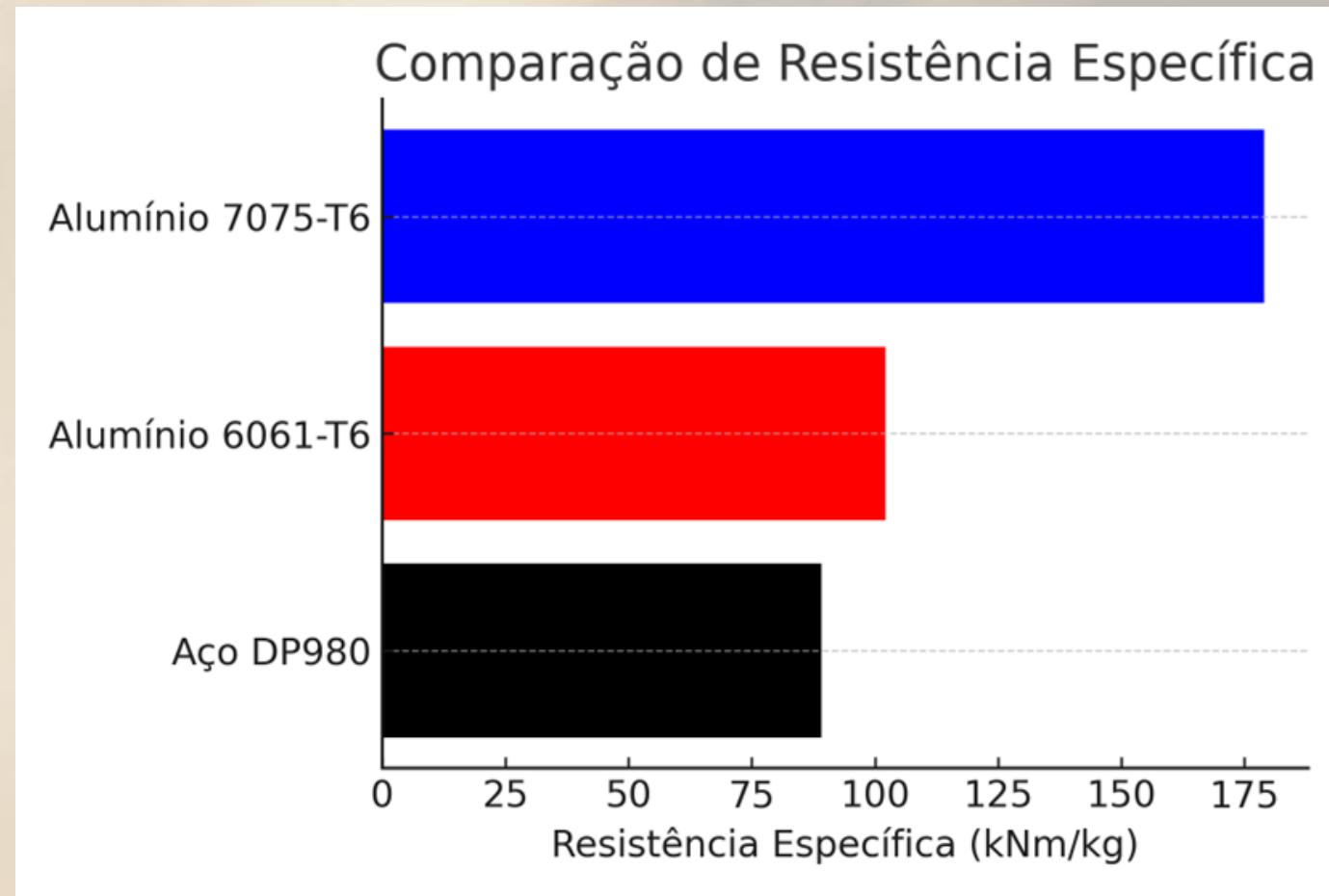


A Métrica Decisiva: "Resistência Específica"

- ⚠ Não é justo comparar só a força, o aço é 3x mais denso (pesado).
- ⚠ Precisamos corrigir pelo peso. A métrica correta é a Resistência Específica.
- ⚠ A fórmula é simples: Resistência / Peso (Densidade).



Resultado 2: A Reviravolta (Resistência/Peso)



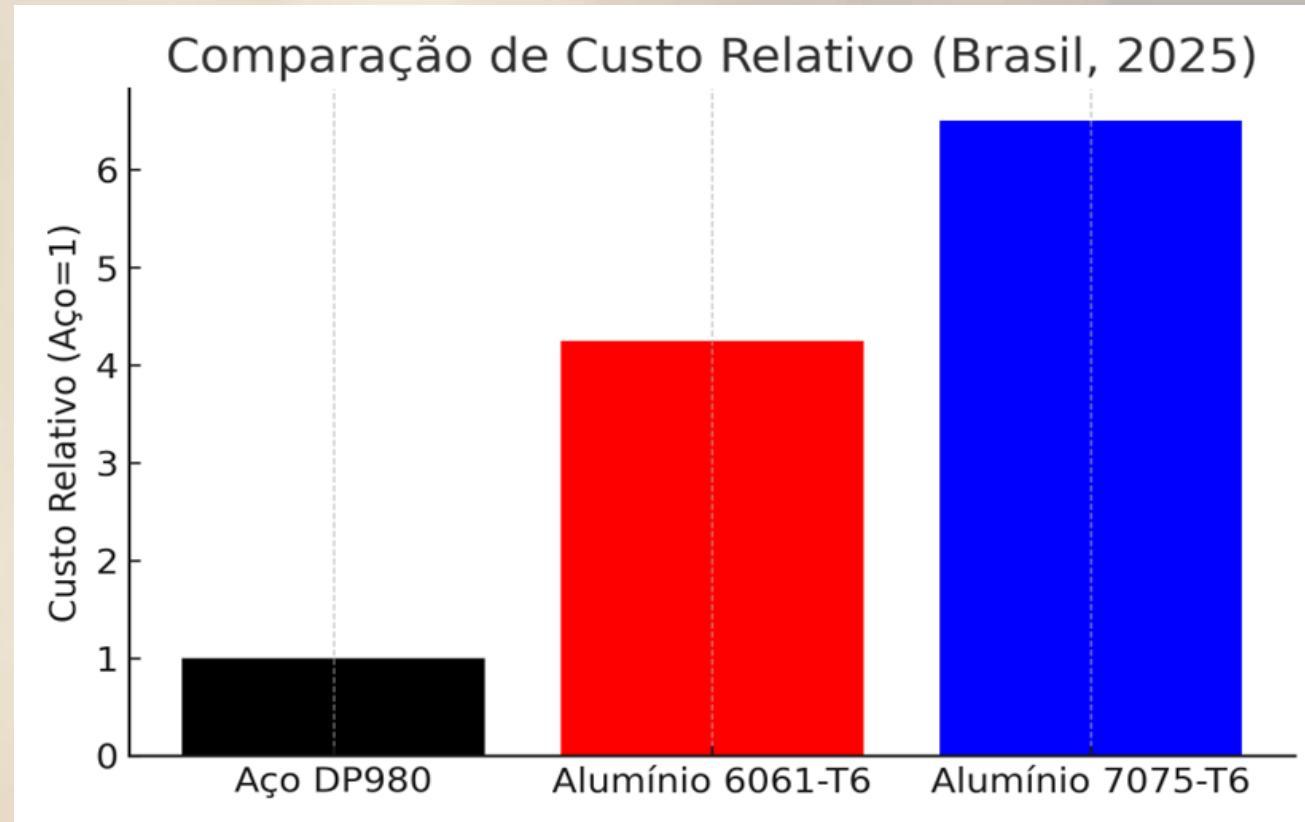


Discussão: O Veredito do Custo

- ⚠ Se o Alumínio 7075 é tão bom, por que não o usamos em carros?
- ⚠ Custo: É de 8 a 12 vezes MAIS CARO que o aço.
- ⚠ Fabricação: Unir alumínio é difícil e caro (exige rebites ou soldas especiais).



Discussão: Comparação de Custo Relativo





Conclusões

- Não existe "o melhor material", mas sim o material certo para a aplicação certa.
- AÇO (DP980): É o rei dos Carros. Oferece a máxima segurança pelo menor custo.
- ALUMÍNIO (7075): É o rei dos Aviões. Sua "resistência por peso" justifica o custo altíssimo.

Obrigado Pela Atenção



Uso de Tecnologias de Monitoramento de Vibrações em Estruturas de Obras de Grande Porte

Celso Rene dos Santos
rene.s@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- O monitoramento estrutural de obras de grande porte é um campo que tem evoluído significativamente, ao longo das últimas décadas, impulsionado tanto pelos avanços tecnológicos quanto pela crescente demanda por infraestruturas seguras e resilientes.
- Estas tecnologias não apenas aumentam a precisão e a eficiência do monitoramento, mas, também, permitem uma resposta mais rápida a potenciais problemas, garantindo, assim, a segurança e a longevidade das estruturas.
- A escolha deste tema reflete a importância de se compreender e aplicar essas tecnologias avançadas, no contexto brasileiro, especialmente em obras de grande porte, que são vitais para o desenvolvimento econômico e social do país

Modelos de Obras de Grande Porte

 As obras de grande porte são caracterizadas, Feldmann (2010), pelo seu tamanho físico considerável, o que pode incluir vastas áreas de terreno, grandes volumes de construção, ou extensas infraestruturas lineares (como usinas hidroelétricas, tuneis, aeroportos).





Definições das Obras

- A **Barragens:** Obras de grande porte que, neste contexto, são essenciais para a geração de energia hidrelétrica, abastecimento de água e controle de inundações.
- A **Aeroportos:** A construção de aeroportos de grande porte requer uma coordenação complexa de recursos, para atender à demanda do transporte aéreo em larga escala.
- A **Túneis:** A construção de túneis envolve técnicas avançadas de escavação, arrimo e estabilização de maciços, e requer constante monitoramento, devido aos riscos geológicos.



Análise e Uso de Tecnologias Avançadas

- A As tecnologias não apenas aumentam a precisão e a eficiência do monitoramento, mas, também, permitem uma resposta mais rápida a potenciais problemas, garantindo, assim, a segurança e a longevidade das estruturas.
- A De acordo com Cheng (2018), esse campo de estudo é essencial para a estanqueidade dessas estruturas no terreno, ao longo do tempo, cuidando especialmente de identificar qualquer sinal indicativo de problema estrutural, antes que o mesmo cresça e se agrave.
- A Nesse contexto, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas e aplicadas com sucesso, em nível global, conforme demonstrado por estudos recentes na literatura especializada. (CHENG, HUA PENG, 2018).



Tecnologias – Monitoramento

 O monitoramento contínuo permite a identificação precoce de potenciais problemas estruturais, contribuindo, significativamente, para a prevenção de acidentes e para a extensão da vida útil das estruturas. Nesse contexto, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas e aplicadas com sucesso, em nível global, conforme demonstrado por estudos recentes na literatura especializada. (CHENG, HUA PENG, 2018)

 Obras de grande porte, como pontes, barragens, arranha-céus, e centrais energéticas, suportam cargas pesadas e estão expostas a fatores ambientais severos. Qualquer falha nessas estruturas pode causar acidentes de grandes proporções, resultando em perdas humanas, materiais e ambientais.



Principais Tecnologias de Monitoramento Encontradas

- A Inspeção Visual:** A inspeção visual é a abordagem mais básica e inicial na avaliação estrutural. Consiste na observação direta da estrutura, para identificar sinais visíveis de danos, deterioração ou falhas;

- A Ensaios Não Destrutivos:** Os métodos de ensaio não destrutivo permitem avaliar as propriedades e condições dos materiais sem danificá-los. Entre os exemplos deles, incluem-se: Ultrassom; Radiografia; Termografia;

A Principais Tecnologias de Monitoramento Encontradas

- Monitoramento Estrutural:** O monitoramento estrutural envolve a instalação de sensores e sistemas de medição em tempo real, para avaliar o desempenho da estrutura, ao longo do tempo. Tecnologias como strain gauges, acelerômetros e sistemas de medição de deslocamento são comumente usados;
- Análise de Elementos Finitos (FEA):** A análise de elementos finitos é uma técnica computacional que divide a estrutura em elementos menores e simula o comportamento sob várias condições de carga. Essa metodologia é utilizada para prever tensões, deformações e identificar pontos críticos;



Principais Tecnologias de Monitoramento Encontradas

-  **Ensaios de Carga:** Os ensaios de carga envolvem a aplicação de cargas controladas à estrutura, para avaliar sua capacidade de suporte e seu comportamento, sob essas condições.
-  **Análise Dinâmica:** A análise dinâmica avalia como a estrutura reage a cargas dinâmicas, como vento, tráfego e atividades sísmicas. Inclui a identificação de frequências naturais de vibração e os modos de falha;
-  **Análise de Estabilidade:** A análise de estabilidade avalia a segurança de estruturas sob diferentes condições de carga, identificando modos de falha potencial, como o colapso progressivo.



Os Sensores Geodésicos

- A Os Sensores Geodésicos são fundamentais para medir e monitorar a integridade estrutural e de acordo com Martins Diego (2019) eles permitem a detecção de movimentos milimétricos, essenciais para a segurança das obras.
- A O uso de sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems), especialmente com técnicas como o RTK (Real Time Kinematic), proporciona medições precisas em tempo real, sendo crucial para monitorar deslocamentos e deformações.
- A Os sensores geodésicos são dispositivos utilizados na geodésia para medir e representar a forma e dimensões da Terra, bem como seu campo gravitacional. Eles são fundamentais para a medição de distâncias e ângulos, utilizando métodos como triangulação e tecnologias modernas, como o GPS.



Os Instrumentos dos Sensores Geotécnicos (Monitoramento de Barragens)

- **Sensores Geotécnicos** (como medidores de tensão e inclinômetros) são utilizados para monitorar as condições do solo e da estrutura ao redor. Um conjunto de mini sensores completam os dados.
- **Piezômetros**, para identificar a pressão neutra (poro pressão) no aterro;
- **Acelerômetros** que monitoram deslocamentos e vibrações no solo.
- **Indicadores de nível de água**, para identificar a cota na qual o solo se encontra saturado, definido assim o nível freático naquele ponto;



Os instrumentos dos Sensores Geotécnicos (Monitoramento de Barragens)

-  **Medidores de vazão**, utilizados para aferir as vazões de percolação que se processam pelo corpo da barragem;
-  **Medidores de turbidez**, empregados para medir a concentração de materiais sólidos carreados pelas águas de percolação do maciço;
-  **Marcos superficiais** que, a partir da sua leitura de forma automatizada ou manual, identificam deslocamentos verticais (recalques) das estruturas;
-  **Inclinômetros** que medem deformações horizontais em relação a um tubo guia vertical, os quais podem ser aplicados em maciços de solo, de rocha ou de concreto;



Sensores de Bragg em fibra (FBG - Fiber Bragg Grating)

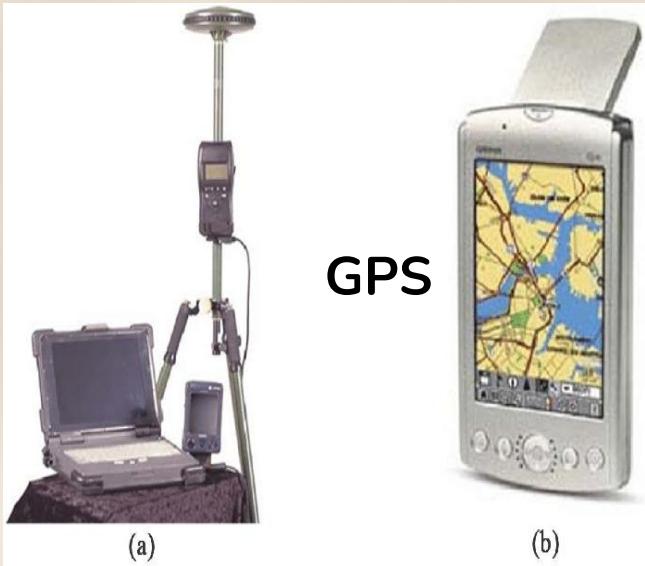
► São os mais populares para monitoramento estrutural. Eles funcionam refletindo luz em comprimentos de onda específicos, e mudanças na deformação ou temperatura da estrutura alteram o comprimento de onda refletido

► **Sensores interferométricos:** Usam interferência de luz para medir deformações e são extremamente sensíveis, embora mais complexos de implementar. Os sensores distribuídos (baseados em espalhamento): permitem o monitoramento ao longo de comprimentos de fibra optica muito longos, oferecendo uma visão contínua da integridade estrutural

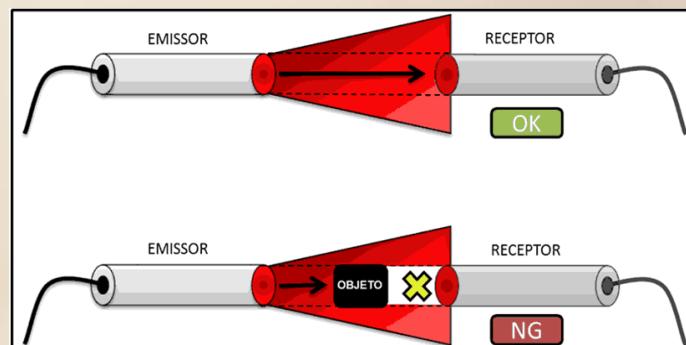
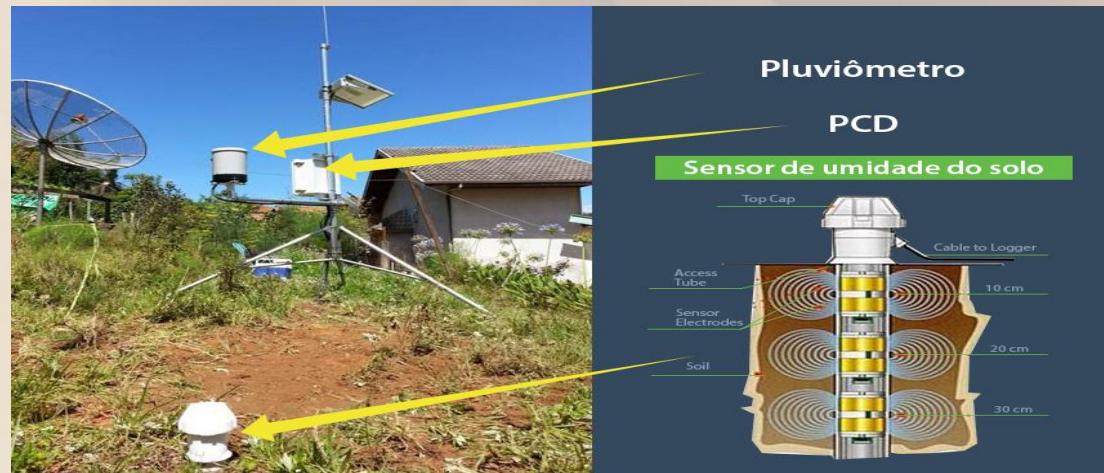


Sensores Geodésicos Geotécnicos e Ópticos

Sensor Geodésico



 Sensor Geotécnico





Conclusões

- A A avaliação estrutural de obras de grande porte é um processo crítico que envolve a inspeção, análise e o monitoramento das condições físicas e operacionais de estruturas como pontes, barragens, edifícios altos e plataformas industriais. Hilgert, Bibiana Barella, (2023) afirmam que a finalidade da avaliação estrutural é garantir a segurança, a durabilidade e o desempenho adequado dessas obras, ao longo do tempo.
- A Para compreender e realizar a avaliação, de forma eficaz, é necessário utilizar uma combinação de teorias de engenharia estrutural com métodos analíticos e tecnologias avançadas.

A

Barragem de Grande Porte



Obrigado Pela Atenção



Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

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:

A ✓ Vibração Torsional

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

Determina como o eixo reage às variações periódicas de torque.

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

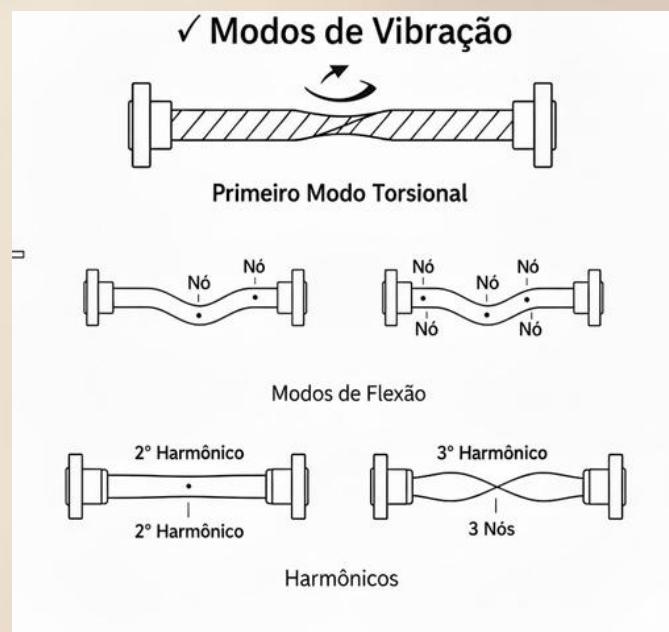


Revisão Teórica



✓ 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

A 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.

A 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

A Análise

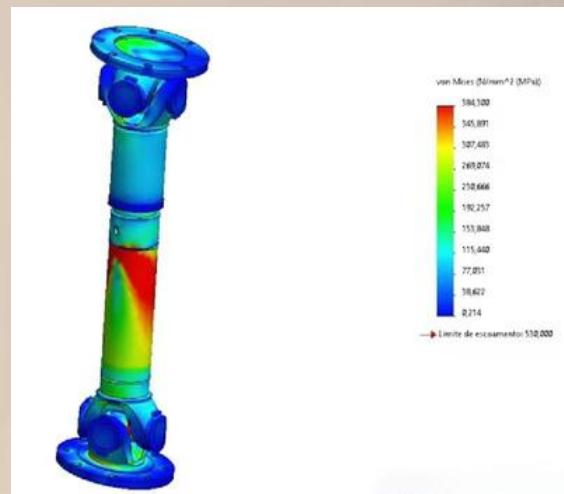
O cálculo da frequência crítica de um eixo rotativo é dado por:

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

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

A 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

A 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

A Exemplo Numérico

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

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

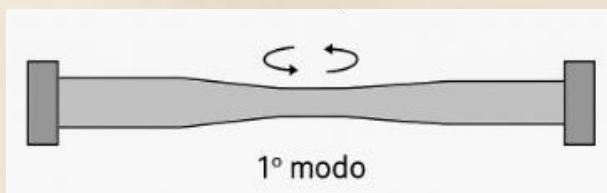
Logo, ressonâncias são esperadas próximas de 1650 rpm

Resultados e Discussões

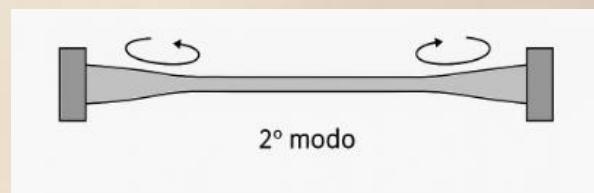
A Modos de Vibração Identificados

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

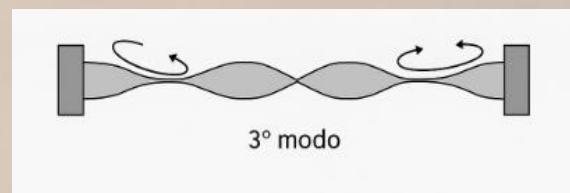
1º Torção uniforme:
Praticamente todo o eixo
sofre deslocamento
angular em relação a um
dos apoios



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



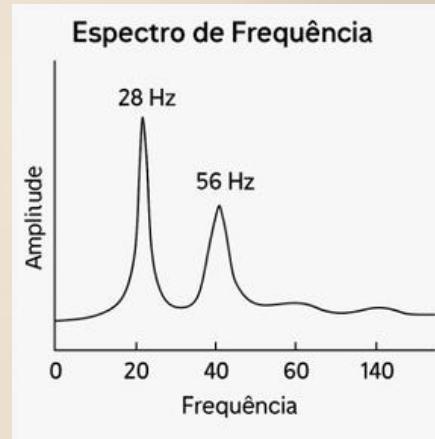
3º Dois pontos nodais:
com alternância de
regiões de maior e menor
deslocamento angular.



Resultados e Discussões

A 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
 - Corrigi a distribuição de massa
 - Minimiza a excentricidade do eixo
 - Garante um funcionamento mais suave
 - Aumenta a vida útil dos mancais e rolamentos

Acoplamientos 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

A Materiais compósitos

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

A Controle ativo NVH

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

A 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



Análise Modal Experimental em Estruturas Aeronáuticas: Uso de Acelerômetros e Martelos Instrumentados para Determinar Frequências Naturais

Eduardo Zambotti Marzocchi
Eduardo.marzochi@aluno.ifsp.edu.br

Giovane José da Silva
Giovane.silva@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



Vibrações e Integridade Estrutural

Estruturas aeronáuticas estão sujeitas a carregamentos dinâmicos que geram vibrações, podendo comprometer a integridade, conforto e segurança.



Ressonância

Ocorre quando a frequência de excitação externa se aproxima da frequência natural da estrutura, causando aumento da amplitude de vibração, acelerando a fadiga e potencial ruptura.



Flutter Aeroelástico

Instabilidade dinâmica crítica, resultante da interação entre forças aerodinâmicas, inércia e elasticidade, que pode levar a oscilações autoalimentadas e falhas catastróficas.



A Solução: Análise Modal Experimental (AME):

Ferramenta essencial para determinar frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração de uma estrutura, e caracterizar as propriedades dinâmicas e validar modelos numéricos, garantindo a segurança e a manutenção.



Fundamentos Teóricos: Vibrações e Frequências Naturais

-  **Vibrações:** Oscilações de toda estrutura mecânica quando submetida a forças externas, resultando em movimento repetitivo
-  **Frequências Naturais:** Frequências próprias em que uma estrutura tende a vibrar quando excitada e liberada, dependendo de sua massa, rigidez e condições de contorno. Operar próximo delas gera ressonância.
-  **Modos de Vibração:** Padrões de deformação espacial da estrutura durante a oscilação (ex: flexão, torção ou combinações), cruciais para prever a resposta estrutural e evitar flutter.
-  **Observação:**
A operação próxima às frequências naturais (ressonância) amplifica as vibrações, aumentando o risco de falhas e reduzindo a vida útil dos componentes.



Equação De Frequência Natural

 **Relação Fundamental**, onde a frequência é uma "batalha" entre a rigidez (que quer trazer a estrutura de volta à posição original) e a massa (que quer manter o movimento devido à inércia).

$$\text{Equação: } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

 **Fn (Frequência Natural)**: É a frequência em que a estrutura tende a vibrar livremente após sofrer uma excitação inicial. A unidade de medida padrão é o **Hertz (Hz)**, que representa oscilações por segundo.

 **k (Rigidez)**: Representa a rigidez equivalente da estrutura (ou "constante elástica"). Fisicamente, é a resistência que o material ou a estrutura oferece à deformação quando uma força é aplicada.

Relação: Quanto **maior** a rigidez (k), **maior** será a frequência natural (a estrutura vibra mais rápido).

 **m (Massa)**: Representa a massa equivalente da estrutura ou do ponto analisado.

Relação: Quanto **maior** a massa (m), **menor** será a frequência natural (a estrutura vibra mais lentamente).

 $\frac{1}{2*\pi}$, é o fator de conversão para transformar a frequência angular (radianos/s) para a frequência linear (Hertz/ciclos por segundo).



Métodos de Análise



Métodos Numéricos (MEF):

Utilizam modelos matemáticos e simulações (Método dos Elementos Finitos) para prever frequências e modos. São eficientes em análises preliminares, mas dependem da precisão dos parâmetros modelados (massa, rigidez, etc.).



Métodos Experimentais (AME):

Baseiam-se em medições reais com excitação controlada e sensores. São fundamentais para validar os modelos numéricos e representar o comportamento físico real da estrutura em suas condições efetivas.

Acelerômetro (Sensor de Resposta)

A São Transdutores que convertem a aceleração mecânica em um sinal elétrico, permitindo a medição das respostas vibratórias da estrutura, onde uma massa interna reage à aceleração, gerando um sinal proporcional. ($F=ma$ – baseado na segunda lei de newton). **APLICAÇÕES AERONÁUTICAS:** Asas: prevenção de flutter aeroelástico, **Fuselagem:** análise de fadiga estrutural, **Motores:** diagnóstico de falhas, **Trens de pouso:** resposta dinâmica (impacto).

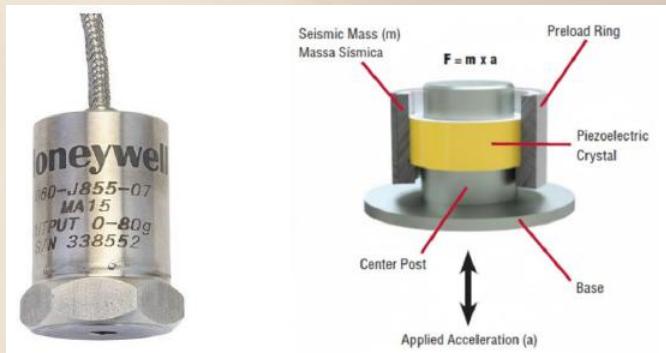


Figura 1 – Acelerômetro Piezoelétrico MA15 e esquema interno - Fonte: Technosupply (2025).

A **Piezoelétricos:** Cristais geram carga elétrica sob deformação, ideais para altas frequências (mais usados em AME).

Capacitivos: Deslocamento da massa altera a capacitância, para medições sensíveis.

Resistivos: Medem deformações em elementos flexíveis, para baixas frequências.

MEMS: Sensores miniaturizados, comuns em drones e smartphones.



Martelos Instrumentados

Fornece uma excitação mecânica controlada (um impulso) à estrutura durante o teste modal. Possui um transdutor de força (célula de carga) que mede a força de impacto aplicada, gerando um sinal elétrico proporcional. **Aplicações Aeronáuticas:** Asas e superfícies de controle, Fuselagem e cauda, Pás de hélices e turbinas e Componentes internos críticos. **Aplicação na AME:** O sinal do martelo (entrada de força) é comparado com o sinal dos acelerômetros (saída de resposta) para determinar a Função de Resposta em Frequência (FRF).



Figura 2 – Marreta modal (Médias e Grandes Estruturas) e Martelo de impacto - (Médias e Pequenas estruturas), Fonte: Brüel & Kjær (2025).

- **Rígidas:** Para altas frequências, ideais para estruturas leves.
- **Macias:** Para baixas frequências, indicadas para estruturas grandes ou flexíveis.
- **Massas Variáveis:** Permitem ajustar energia do impacto conforme a estrutura.



Processamento de Sinais: Transformada de Fourier (FFT)

A A Transformada Discreta de Fourier (DFT) converte sinais do domínio do tempo (Impacto e Vibração) para o domínio da frequência, identificando quais frequências estão presentes na resposta da estrutura durante a análise modal.

FFT - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A FFT é um algoritmo eficiente para calcular a DFT, reduzindo drasticamente o tempo de processamento e permitindo a análise rápida de sinais longos. Na análise modal, a FFT é utilizada para gerar espectros de frequência.

RESULTADO PRÁTICO

O resultado da FFT é o espectro de frequência, mostrando picos de energia nas frequências naturais da estrutura. Esses picos são indicadores das frequências em que a estrutura vibra naturalmente.

A A fórmula da DFT pega cada ponto do nosso sinal de vibração medido no tempo ($[n]$) e calcula o quanto ele contribui para cada frequência específica ($[k]$). É isso que nos permite ver os picos de vibração no gráfico de espectro.

Fórmula da DFT

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} [x[n] * e^{\left(\frac{-j2*pi*kn}{N}\right)}]$$

- A **X[k] (Componente de Frequência)**: Representa a amplitude e a fase do sinal na frequência específica de índice k. "Quanto dessa frequência k existe no meu sinal de vibração?" – O que queremos encontrar.
- A **$\sum_{n=0}^{N-1}$ (Somatório)**: Percorre todo o sinal amostrado, ponto a ponto, do instante inicial ($n=0$) até o final ($N-1$).
- A **x[n] (Sinal no Domínio do Tempo)**: É o dado bruto de entrada, [n] pode ser o valor da força medida pelo martelo ou a aceleração medida pelo acelerômetro num instante específico n.
- A **e^{-j} (Exponencial Complexa)**: Este termo vem da Fórmula de Euler e representa senoides e cossenos. Ele funciona como uma "sonda" que testa se o sinal de entrada [n] "combina" com uma frequência específica.
- A **j (Unidade Imaginária)**: É necessária pois a DFT lida com amplitude e fase simultaneamente (nº complexos).
- A **N (Número Total de Pontos)**: É a quantidade total de amostras coletadas durante o experimento.
- A **k (Índice de Frequência)**: O índice da frequência que estamos analisando no momento (0 Hz, 1 Hz, 2 Hz...).
- A **n (Índice de Tempo)**: O índice da amostra no tempo atual dentro do somatório.



Funções de Resposta em Frequência (FRF)

As FRFs é a principal ferramenta da análise modal, representam a relação entre a entrada (força do martelo (F)) e a saída (aceleração medida (X)) de um sistema linear no domínio da frequência. (Processamento de Sinais). Utilizado para:

- **Frequências Naturais:** Identificadas pelos picos no espectro da FRF.
- **Amortecimentos:** Determinado pela largura e forma dos picos.
- **Modos de Vibração:** Comportamento relativo em diferentes pontos ((Analizando FRFs)

Essa é a equação fundamental da **Função de Resposta em Frequência (FRF)**, que descreve a dinâmica do sistema no domínio da frequência. A equação diz que a característica da estrutura (H) é a razão entre o quanto ela vibrou (X) dividida pela força que você aplicou (F).



Fórmula da FRF

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\textit{Saída (Resposta)}}{\textit{Entrada (Excitação)}}$$

- A **$H(\omega)$ (Função de Resposta em Frequência):** É o valor que queremos encontrar. Ele descreve a "assinatura dinâmica" da estrutura. Matematicamente, é um número complexo que contém informações sobre a magnitude (o quanto vibra) e a fase (o atraso da vibração) para cada frequência ω .
- A **$X(\omega)$ (Transformada da Saída/Resposta):** É o sinal de **Aceleração** (medido pelo acelerômetro) convertido para o domínio da frequência através da FFT. Representa como a estrutura vibrou.
- A **$F(\omega)$ (Transformada da Entrada/Excitação):** É o sinal de **Força** (medido pelo martelo instrumentado) convertido para o domínio da frequência através da FFT. Representa o quanto de força foi aplicada.



Metodologia Experimental: O Estudo de Caso

Baseado no experimento de Raimundo (2025), sobre o projeto do Grupo Carancino Aerodesign (UFSM), Asa de aeromodelo simplificada.

-  **Objetivo:** Determinar as frequências naturais, modos de vibração e amortecimento estrutural da asa, validando o comportamento dinâmico real da estrutura.
-  **Método Experimental:** Teste por meio do martelo de impacto móvel, com acelerômetro fixado em ponto estratégico e impactos aplicados em múltiplos pontos.
-  **Configuração Do Teste:**
 - Acelerômetro fixado sobre nervura da asa
 - Impactos distribuídos ao longo do extradorso
 - Condições de contorno: raiz fixa, ponta livre
-  **Resultado Esperado:** Identificação dos modos de vibração flexionais e torcionais da estrutura, permitindo validar modelos numéricos e prever comportamento em operação.



Passo a Passo do Experimento



1º Preparação da Estrutura: Posicionar a asa simplificada em suportes fixos simulando as condições reais de contorno. Raiz fixa, ponta livre (condição típica), Identificar e marcar pontos estratégicos, Garantir estabilidade durante o teste.



2º Instalação dos Sensores: Fixar acelerômetros piezelétricos nos pontos marcados com contato firme. Garantir contato firme e sem folgas, Conectar ao Sistema de Aquisição (DAQ), Verificar calibração dos sensores
Registrar aceleração no domínio do tempo.



3º Aplicação de Excitação: Utilizar o martelo instrumentado para aplicar impactos controlados nos pontos definidos.
Célula de carga registra força aplicada, Variar ponteira (rígida ou macia), Ajustar energia conforme a estrutura.



4º Aquisição de Dados: Registrar simultaneamente o sinal de força do martelo e a resposta de aceleração dos acelerômetros, Realizar múltiplos impactos em cada ponto para aumentar a confiabilidade, Sincronização: Sistema DAQ registra força e aceleração com mesma taxa de amostragem, Reduzir ruído ambiental e garantir contato firme dos sensores.



Passo a Passo do Experimento

- **5º Processamento de Dados: FFT (Transformada Rápida de Fourier)** : Aplicar FFT aos sinais de tempo (força e aceleração), Converter para domínio da frequência, Resultado: Espectros de frequência mostrando componentes presentes nos sinais. **FRFs (Funções de Resposta)**: Calcular FRFs como razão entre saída (aceleração) e entrada (força), Gerar gráficos de amplitude e fase, utilizando $H(\omega) = Y(\omega) / X(\omega)$ para cada ponto de medição.
- **6º. Análise Modal: Identificação de Frequências Naturais**: Localizar picos nas FRFs que correspondem às frequências naturais, Registrar amplitude e frequência de cada pico.
- **Com isso realizar o Mapeamento de Modos de Vibração**: Analisando a forma dos picos (largura = amortecimento), Comparando respostas em diferentes pontos para mapear padrões de deformação. Cada modo corresponde a um padrão de vibração específico (flexão, torção, etc.).

Imagens do Procedimento



Figura 3 – Visão do extradorso e intradorso da asa com o acelerômetro instalado - Fonte: Raimundo (2025).



Link Vídeo - Teste com acelerômetro e martelo

<https://www.youtube.com/watch?v=5wrYc5rZeLc>

Momento 00:56 – 01:03



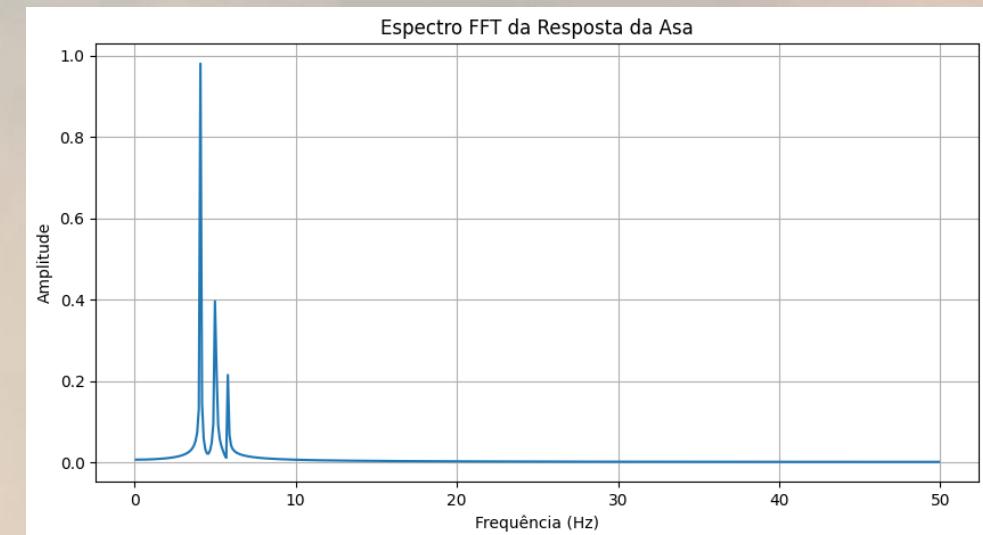
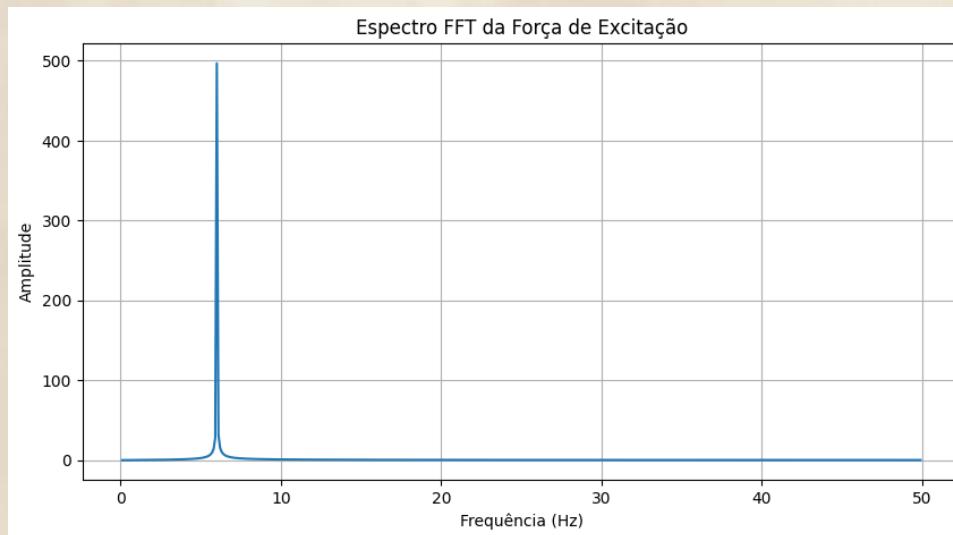
Resultados Obtidos e Validação

- Identificação Modal Eficiente: A metodologia aplicada (martelo instrumentado e acelerômetros) foi eficaz na extração das Funções de Resposta em Frequência (FRFs).
- Modos Críticos Identificados: Foram isolados com clareza os 3 modos de vibração fundamentais da asa: **Flexão Fundamental (~5,81 Hz)** - **Torção (~5,03 Hz)** - **Modo Combinado (~4,11 Hz)**.
- Consistência Teórica: Os dados experimentais apresentaram alta correlação com os cálculos teóricos (modelo massa-mola), validando a consistência do ensaio.

Tabela 1 – Frequências Naturais, Amplitudes e Tipos de Vibração dos Modos Principais da Asa.

Modo	Frequência Natural (Hz)	Amplitude de Deslocamento (m)	Tipo de Vibração
1	5,81	0,002	Flexão fundamental
2	5,03	0,001	Torção
3	4,11	0,0005	Combinado (flexão+torção)

Gráficos - Resultados Obtidos e Validação





Impacto na Engenharia e Segurança

-  **Segurança Operacional:** A identificação precisa dessas frequências é vital para evitar fenômenos catastróficos como **ressonância** e **flutter aeroelástico**.
-  **Correlação Numérico-Experimental:** A Análise Modal Experimental (AME) mostrou-se indispensável para validar e refinar modelos numéricos (Método dos Elementos Finitos - MEF), reduzindo incertezas de projeto.
-  **Ciclo de Vida da Aeronave:** Os dados servem de base não apenas para a certificação, mas para a manutenção preditiva e monitoramento de degradação estrutural.
-  **Ferramenta Essencial:** A AME consolida-se como uma etapa obrigatória no design aeronáutico, unindo a teoria à realidade física da estrutura.
-  **Limitações e Cuidados:** O estudo destacou a importância da fixação correta dos sensores e das condições de contorno para evitar erros de medição.
-  **Análise de Impacto:** A integração entre métodos experimentais e simulações garante projetos mais robustos, otimizados e, acima de tudo, seguros para a operação de voo.



Conclusões

A Análise Modal Experimental (AME) realizada permitiu identificar com clareza os três modos de vibração críticos (flexão, torção e combinado) e suas respectivas frequências naturais, comprovando a eficácia da metodologia com martelos de impacto e acelerômetros na caracterização dinâmica da estrutura. Os resultados obtidos, consistentes com a teoria, são fundamentais para a segurança do projeto, pois permitem prever fenômenos como o *flutter* e evitar a ressonância. Ao validar modelos numéricos (FEM) e simulações, a AME não apenas otimiza o ciclo de projeto e certificação, mas também assegura o cumprimento de requisitos rigorosos de engenharia, consolidando-se como um pilar indispensável para a inovação, desempenho e confiabilidade operacional no setor aeroespacial.

Obrigado Pela Atenção



Efeitos de Vibrações em Turbinas Eólicas Instaladas em Edifícios ou Plataformas Offshore: Análise Estrutural e de Fadiga

Gustavo Lacerda Cardoso
[Gustavo.lacerda @aluno.ifsp.edu.br](mailto:Gustavo.lacerda@aluno.ifsp.edu.br)

José Bonsaver Neto
Bonsaver.j@aluno.ifsp.edu.br

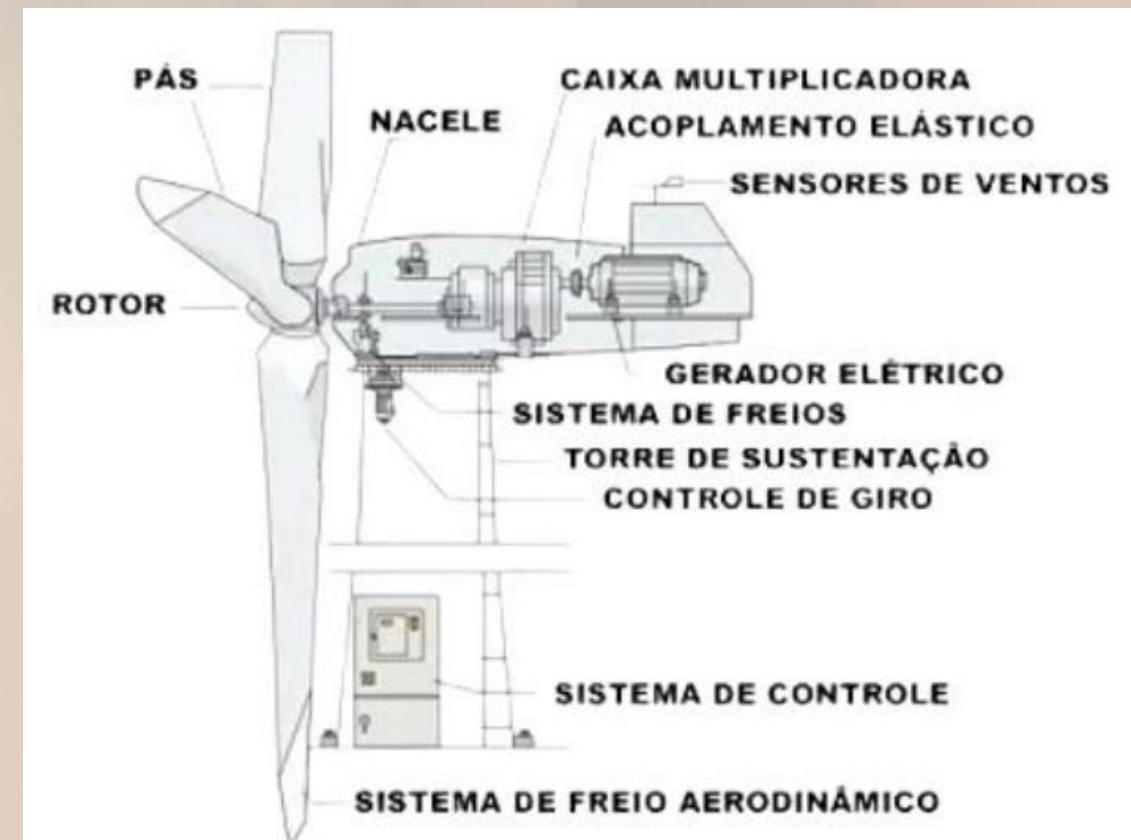


Introdução

As turbinas eólicas instaladas em ambientes urbanos e offshore estão sujeitas a intensas vibrações decorrentes de ventos turbulentos, ondas, correntes marítimas e cargas operacionais. Essas vibrações, quando não analisadas adequadamente, reduzem a vida útil, afetam a segurança e elevam os riscos operacionais. O artigo explora conceitos de dinâmica estrutural, ressonância, análise modal, fadiga e metodologias numéricas como o MEF, propondo uma abordagem completa para projetar e monitorar turbinas com maior confiabilidade.

Como Funciona uma Turbina Eólica

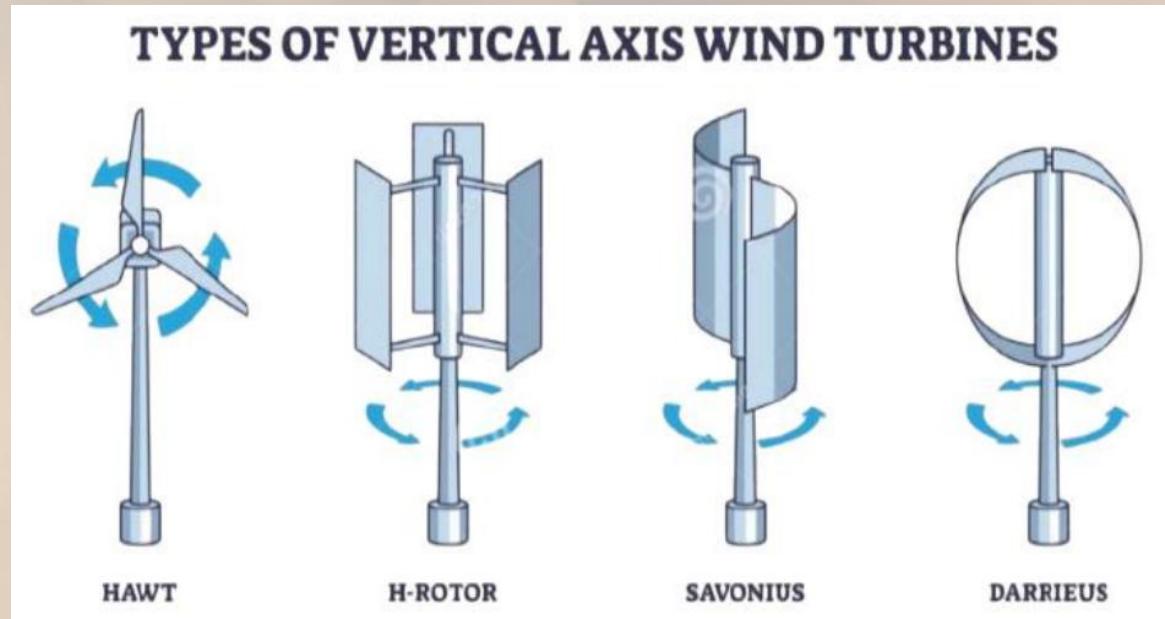
A turbina eólica transforma a energia do vento em eletricidade por meio da rotação das pás, que acionam o eixo principal e o gerador localizado na nacelle. Componentes como torre, hub, fundação e sistemas de yaw e pitch garantem estabilidade e eficiência. O funcionamento depende da interação entre aerodinâmica, mecânica e estrutura, tornando a análise dinâmica essencial para prevenir vibrações excessivas.





Tipos de Turbinas

As turbinas HAWT, de eixo horizontal, são as mais comuns e eficientes, porém dependem da orientação ao vento. Já as turbinas VAWT — como H-Rotor, Savonius e Darrieus — captam vento de qualquer direção, sendo adequadas a ambientes urbanos com turbulência intensa. Embora menos eficientes, possuem vantagens como simplicidade e operação silenciosa.



Aplicações em Edifícios e Offshore

Instalações em edifícios enfrentam ventos irregulares e turbulentos, exigindo análise da interação com a estrutura para evitar desconforto ou danos. Já plataformas offshore recebem ventos fortes e cargas cíclicas de ondas e correntes, tornando o ambiente mais severo e complexo. A dinâmica fluido–estrutura é essencial para garantir a segurança em alto-mar.





Fontes de Vibração

As vibrações surgem de fenômenos como desbalanceamento das pás, passagem das pás pela torre (efeito torre-shadow), vibrações do trem de força e frequências de rotação (1P e 3P). Além disso, turbulência, rajadas, desprendimento de vórtices e, no caso offshore, ondas e correntes marítimas reforçam a excitação dinâmica, exigindo controle cuidadoso no projeto; vamos dividir em três áreas .

Aerodinâmicas

- Desbalanceamento das pás
- Tower-shadow (3P)
- Turbulência e rajadas
- Desprendimento de vórtices
- Aeroelasticidade (stall, flutter)

Mecânicas

- Vibrações do trem de força (drive-train)
- Desgaste de engrenagens
- Folgas e desalinhamentos
- Vibrações do gerador
- Ruído estrutural interno

Ambientais / Offshore

- Ondas e correntes marítimas
- Cargas combinadas vento–onda
- Amortecimento hidrodinâmico
- Interação fluido–estrutura
- Variação de rigidez da fundação

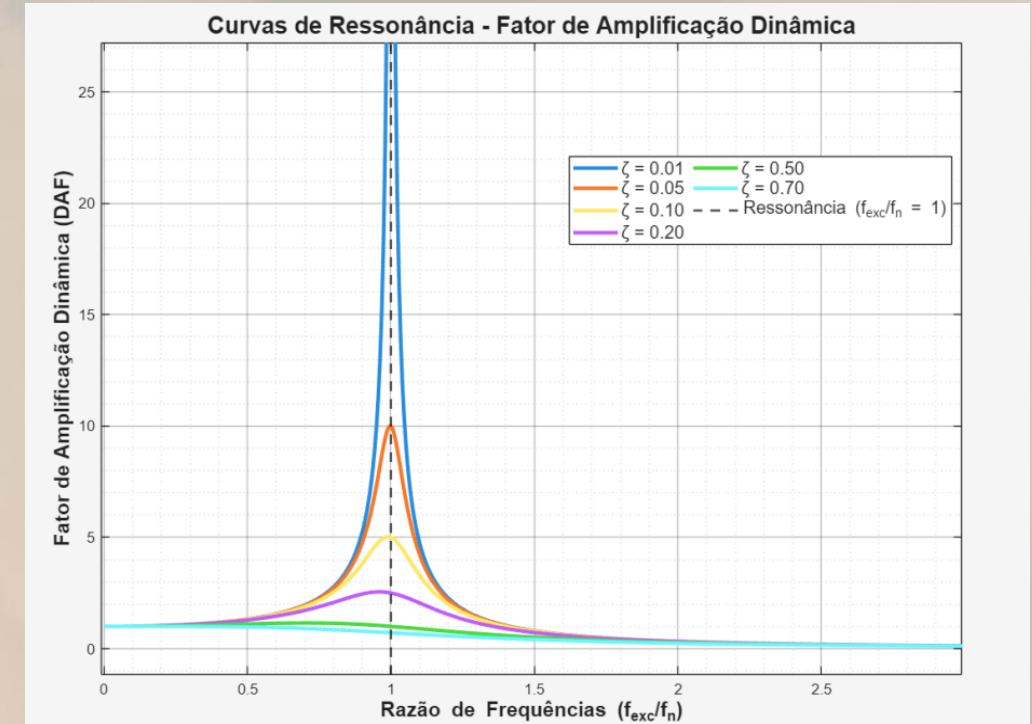


Ressonância e DAF

 Quando a frequência de excitação se aproxima da frequência natural da torre, ocorre ressonância, aumentando drasticamente as amplitudes de vibração. O Fator de Amplificação Dinâmica (DAF) quantifica essa amplificação. Projetos precisam manter as frequências naturais longe das faixas 1P, 3P e das ondas para evitar danos estruturais.

O **Fator de Amplificação Dinâmica (DAF)** quantifica o quanto a resposta dinâmica real é maior que a resposta estática (ignorando os efeitos dinâmicos). Para um sistema de 1-GL sob excitação harmônica, o DAF é dado por:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 - \left(\frac{f_{ex}c}{f_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta \left(\frac{f_{ex}c}{f_n} \right) \right)^2 \right]}}$$



Onde:

$f_{ex}c$: frequência da força de excitação [Hz]

f_n : frequência natural do sistema [Hz]

ζ : razão de amortecimento (adimensional)

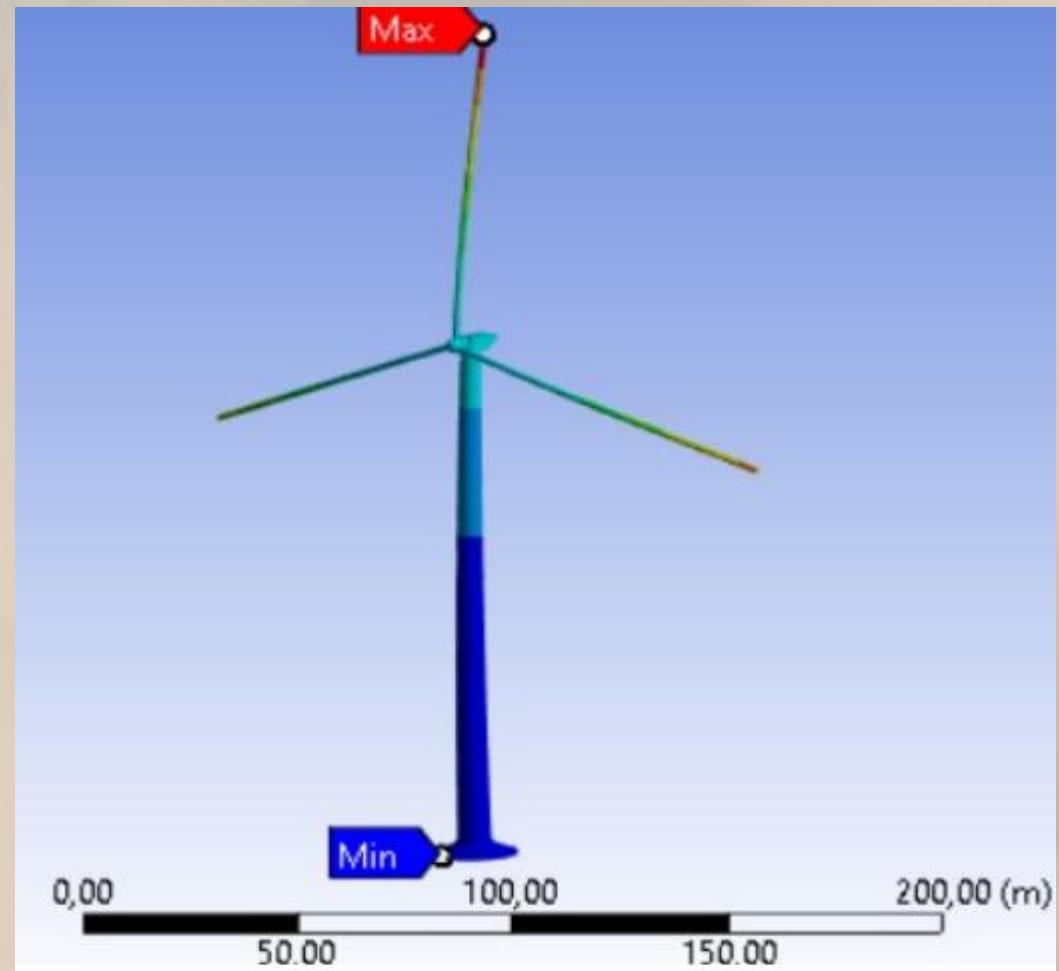


Análise Modal e MEF

A O Método dos Elementos Finitos (MEF)

complementa essa etapa ao possibilitar a modelagem detalhada da torre, das pás, da nacelle, da fundação e de suas interações. Por meio do MEF, é possível obter **tensões, deformações, deslocamentos, acelerações**, além de analisar regiões críticas como soldas, flanges, transições estruturais e pontos de concentração de esforços.

A combinação entre análise modal e MEF é indispensável para prever **comportamentos dinâmicos reais**, avaliar os efeitos da interação com vento e ondas, verificar a integridade estrutural ao longo da vida útil e orientar tanto o **dimensionamento de componentes** quanto as **estratégias de mitigação e monitoramento**.





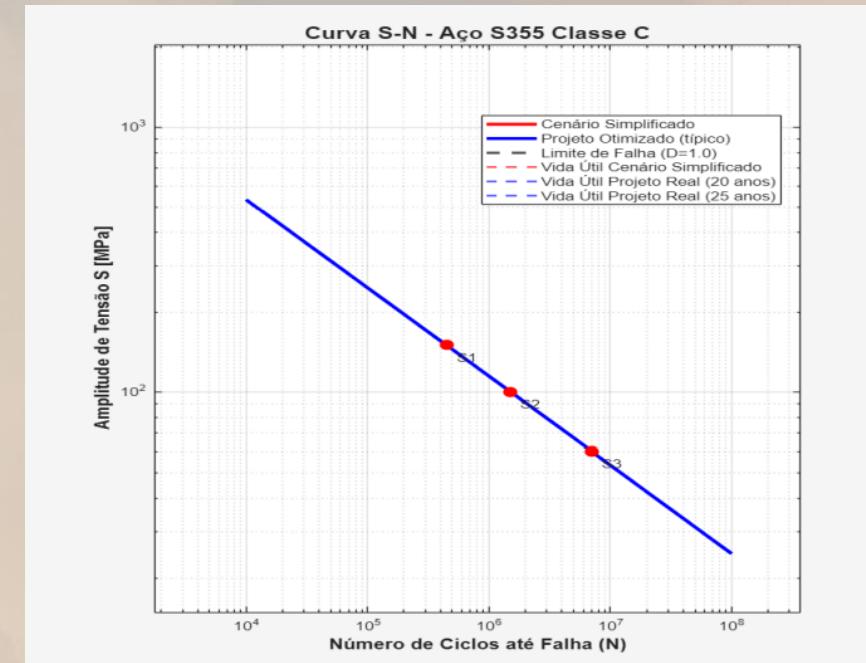
Interação com o Meio

-  Em edifícios, o comportamento do vento é amplamente influenciado pela geometria urbana. A presença de outras estruturas provoca **turbulência intensa, canalização dos fluxos**, redirecionamento e aceleração do escoamento, resultando em carregamentos altamente variáveis. Essas excitações podem gerar vibrações desconfortáveis para ocupantes, além de aumentar tensões na base e nas ligações entre turbina e edifício. A combinação entre as vibrações da turbina e a flexibilidade natural da edificação exige uma avaliação detalhada da **interação vento–estrutura–edifício**.
-  No ambiente **offshore**, a interação fluido–estrutura é um dos fatores mais determinantes no comportamento dinâmico da turbina. A presença da água introduz **massa adicional (added mass)**, que aumenta a inércia efetiva da estrutura e reduz suas frequências naturais. Além disso, o **arrasto** e o **amortecimento hidrodinâmico** dissipam energia e atenuam as vibrações, mas também impõem **cargas cíclicas significativas** oriundas das ondas e correntes marítimas. Essas forças variam continuamente e podem se combinar com a ação do vento, exigindo análises acopladas para prever a resposta real da torre e da fundação.



Fadiga e Vida Útil

A fadiga ocorre devido a ciclos repetitivos de tensão, mesmo quando inferiores ao limite de escoamento. Métodos como Palmgren-Miner e curvas S-N estimam o acúmulo de dano, enquanto o Rainflow Counting converte sinais variáveis em ciclos equivalentes. Tensões médias também afetam o limite de fadiga e devem ser consideradas no dimensionamento.





Riscos De Falha



Falhas por vibração e fadiga podem causar colapso da turbina, queda de componentes e danos ambientais, especialmente offshore, onde vazamentos podem afetar a vida marinha. Financeiramente, resultam em perda do ativo, interrompem a produção e elevam drasticamente o custo de manutenção. O acidente da plataforma Alexander Kielland evidencia a gravidade do problema.

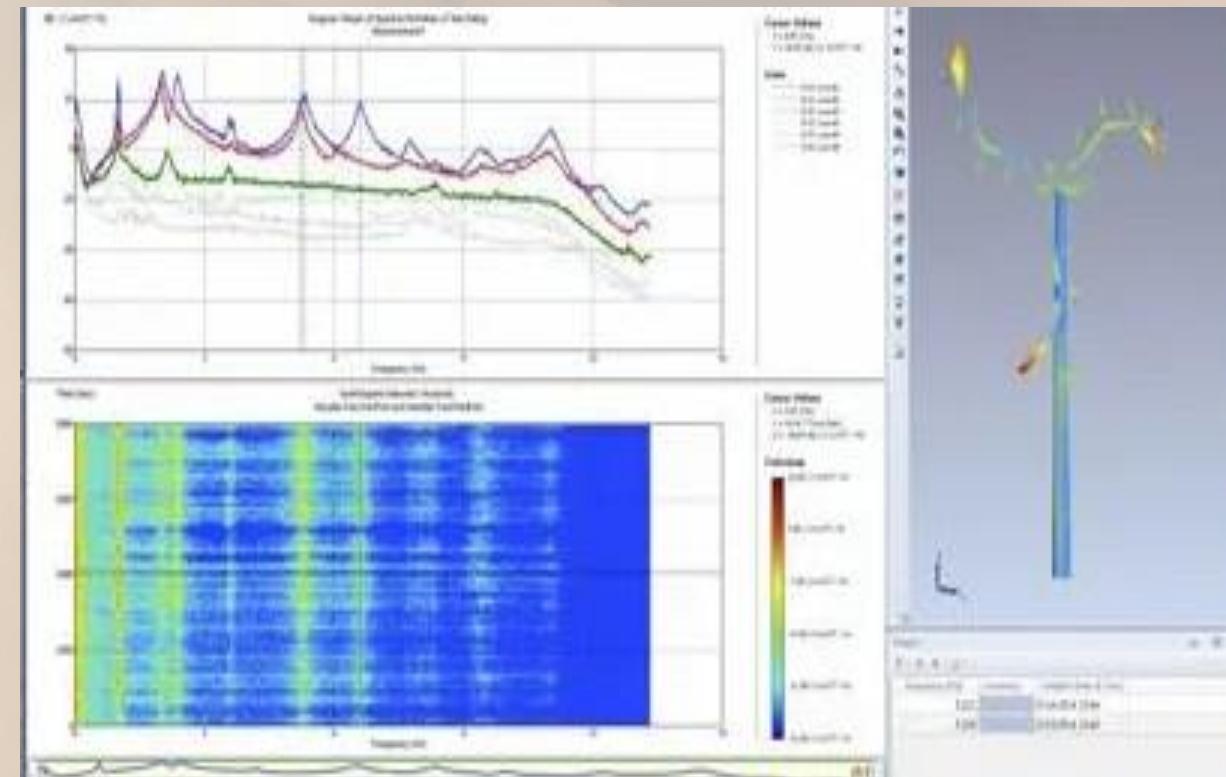




Monitoramento e Mitigação



O SHM monitora em tempo real o comportamento estrutural da turbina, identificando variações em frequências naturais, tensões, deformações e microtrincas. Sensores como acelerômetros, strain gauges, fibra óptica, inclinômetros e emissão acústica detectam danos iniciais. Essas informações alimentam rotinas de **análise modal operacional (OMA)**, algoritmos de detecção de anomalias e sistemas de manutenção preditiva, permitindo intervenções antecipadas. Combinado a inspeções e ensaios não destrutivos, o SHM aumenta a confiabilidade, reduz paradas não programadas, melhora a segurança e prolonga a vida útil da turbina, especialmente em ambientes offshore.





Estudo de Caso: SG 14-222 DD



A turbina Siemens Gamesa 14 MW apresenta frequências naturais projetadas para evitar 1P e 3P, garantindo segurança dinâmica. O amortecimento offshore reduz o DAF e mitiga vibrações. A análise simplificada de fadiga demonstra como tensões cíclicas podem acelerar falhas se não forem tratadas com critérios realistas de projeto.

Turbina Offshore Siemens Gamesa SG 14-222 DD:

Potência Nominal: 14 MW

Diâmetro do Rotor: 222 m

Altura do Cubo (Hub Height): 108 m

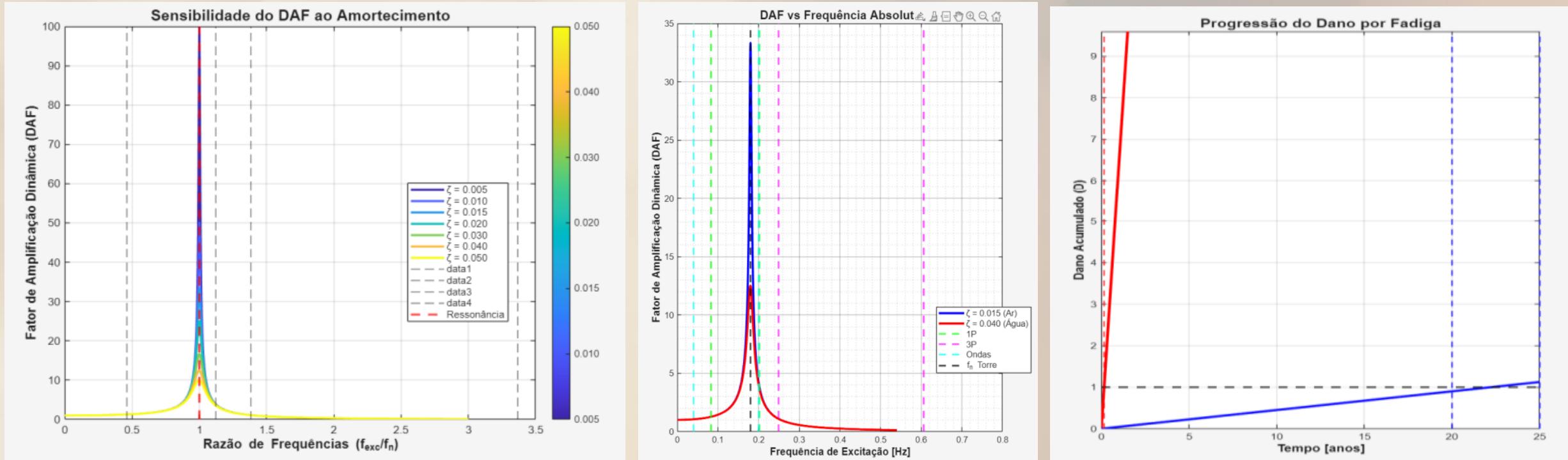
Massa da Nacelle: 500 toneladas

Velocidade de Rotação Nominal: 5,0 – 12,1 rpm

Área de Varredura do Rotor: 39.000 m²



Estudo de Caso: SG 14-222 DD





Conclusões

 As vibrações e a fadiga desempenham papel decisivo na durabilidade, no desempenho e na segurança de turbinas eólicas instaladas tanto em edifícios quanto em ambientes offshore. A combinação entre análise modal, MEF e monitoramento contínuo permite identificar riscos de ressonância, estimar tensões críticas e orientar soluções estruturais mais eficientes. A integração de sistemas SHM, associada ao uso de normas técnicas e práticas de engenharia avançadas, garante maior confiabilidade operacional, reduz falhas e sustenta a vida útil da turbina ao longo de todo o ciclo de operação.

Obrigado Pela Atenção



Uso de Amortecedores Dinâmicos em Arranha-Céus e Pontes: Mitigação de Vibrações Induzidas por Ventos e Tráfego

Henrique de Sá Braga Ferreira
h.sa@aluno.ifsp.edu.br

Leonardo Davi Barbosa
leonardo.davi@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Evolução das estruturas: Mais altas e mais leves.
- O Problema: Baixo amortecimento intrínseco (0,5% a 2%).
- Consequências: Desconforto humano e fadiga estrutural.



Fontes de Excitação e Fenômenos Físicos

A Vento: Vortex Shedding (Desprendimento de Vórtices).

A Tráfego/Pedestres: Ressonância e Sincronização.



Modelagem Matemática (Dinâmica Estrutural)

A Equação de Movimento (MDOF):

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = F(t) + F_{damper}(t)$$

A Objetivo: Maximizar a dissipação via Fdamper



Soluções Passivas: TMD e TMDI

A TMD (Clássico): Massa sintonizada + mola + amortecedor.

A TMDI (Inovação): Uso de Inerter.





Soluções Semi-Ativas (Fluido MR)

- Amortecedores Magnetorreológicos (MR).
- Mudança de viscosidade em milissegundos (Líquido <-> Semi-sólido).
- Baixo consumo de energia + Alta confiabilidade.



Controle Ativo (ATMD)

- ATMD: Atuadores aplicam força externa.
- Caso: Edifício Goldin Finance 117 (Aumento de 11x no amortecimento).
- Contras: Custo elevado e necessidade de backup de energia.



Metodologia de Projeto Robusto

➤ Abordagem Híbrida: CFD (Computacional) + Túnel de Vento.

➤ Incertezas: Variação de rigidez e cargas estocásticas.

➤ Otimização: Algoritmos Genéticos / PSO.



Metodologia de Projeto Robusto

Tecnologia / Tipo	Modo de Ação	Vantagens Principais	Limitações e Desafios de Viabilidade	Exemplos Notáveis
TMD Passivo	Massa auxiliar sintonizada que oscila em oposição de fase com a estrutura, dissipando energia através de um amortecedor viscoso ou friccional.	Simplicidade conceitual, alta confiabilidade, ausência de consumo de energia, custo relativamente baixo.	Requer massa elevada, ocupa espaço significativo, sensível a erros de sintonia (perda de eficácia se a frequência da estrutura mudar).	Taipei 101 (Taiwan); John Hancock Tower (Boston, EUA).
TMDI (com Inerter)	Similar ao TMD, mas incorpora um <i>inertor</i> que gera uma força proporcional à aceleração relativa, criando um efeito de "amplificação de massa".	Maior eficiácia com menor massa física, menor curso (<i>stroke</i>) necessário, maior robustez a erros de sintonia.	Maior complexidade mecânica, custo superior ao TMD passivo, as forças geradas pelo <i>inertor</i> devem ser acomodadas pela estrutura.	Aplicações em pesquisas e projetos de ponta; estudos de TMDFI para arranha-céus.
Amortecedor MR (Semi-Ativo)	Utiliza um fluido magnetorreológico cuja viscosidade é controlada em tempo real por um campo magnético, ajustando a força de amortecimento.	Adaptabilidade a diferentes condições de carga, baixo consumo de energia, alta confiabilidade (operação passiva em caso de falha), bom equilíbrio entre desempenho e custo.	Complexidade do sistema de controle e sensores, possível atraso na resposta do controle, custo de manutenção e monitoramento contínuo.	Controle de cabos em pontes estaiadas (ex: Ponte Dongting, China); suspensões automotivas.
ATMD (Ativo)	Utiliza atuadores para aplicar uma força externa controlada à massa do amortecedor, opondo-se ativamente ao movimento da estrutura.	Máximo desempenho na redução de vibrações, adaptabilidade total a mudanças na estrutura e na excitação, eficaz em ampla faixa de frequências.	Alto custo de instalação e operação, consumo significativo de energia (requer backup), alta complexidade do sistema de controle, risco de falha.	Arranha-céu de 600 m (China); Citigroup Center (Nova Iorque, EUA).

- **Passivo:** Confiável, mas pesado.
- **Semi-Ativo:** Adaptável e econômico.
- **Ativo:** Máxima performance, alto custo.



Tendências Futuras

► Inteligência Artificial: Redes Neurais (LSTM) para previsão de vibração.

► Energy Harvesting: Amortecedores que geram eletricidade.

► Projeto Integrado (Arquitetura + Engenharia).



Conclusões

- Amortecedores não são acessórios, são essenciais.
- Evolução: Reativo <-> Adaptativo <->Preditivo.
- Segurança e Conforto garantidos.

Obrigado Pela Atenção



Análise de Tensões em Pás de Turbinas Aeronáuticas: Verificação de Esforços Devido à Rotação e Variações Térmicas

Heitor De La Cruz Lui
heitor.lui@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



As pás de turbina aeronáutica representam um dos componentes mais exigidos da engenharia moderna, operando em condições ambientais extremamente severas. Localizadas nos rotores de alta pressão, essas pás são responsáveis por extrair energia dos gases de combustão em alta temperatura e pressão.

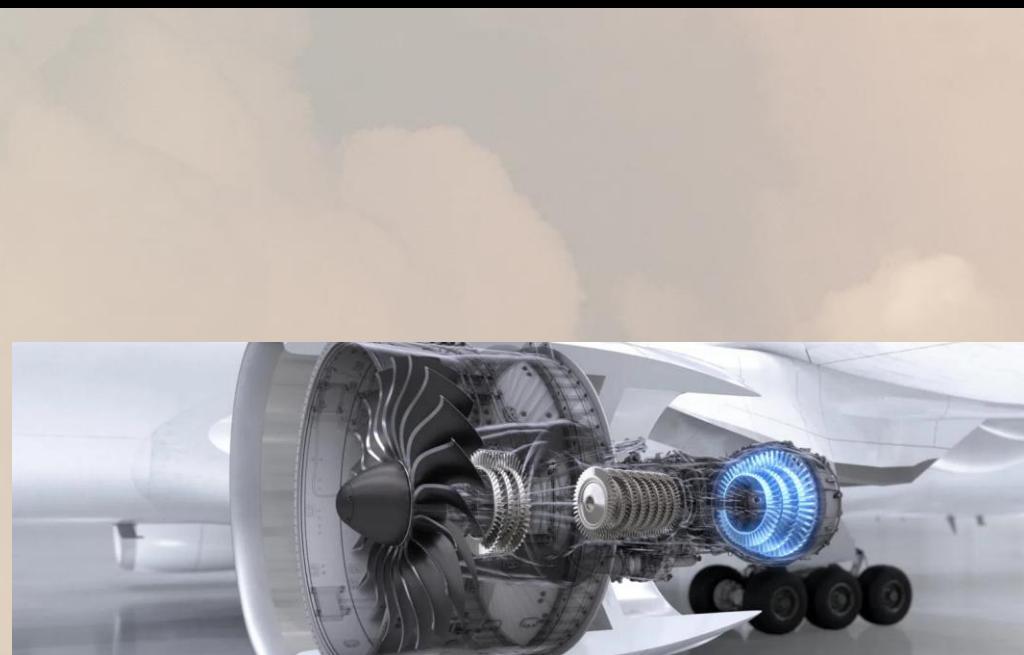


Condições Operacionais Extremas:

- Rotação em altíssima velocidade: podem exceder 10.000 RPM
- Exposição a gases de combustão: temperaturas superiores ao ponto de fusão do material
- Gradientes térmicos severos: exigem sofisticados sistemas de resfriamento interno
- Forças de inércia: geram tensões centrífugas significativas



Falhas em pás de turbina podem levar a consequências catastróficas, incluindo a perda total do motor e risco à aeronave.





Objetivo do Estudo

A Objetivo Geral

Aplicar os fundamentos da Resistência dos Materiais para analisar quantitativamente as tensões resultantes da combinação dos carregamentos mecânicos e térmicos em uma pá de turbina aeronáutica.

A Objetivos Específicos

- ✓ Modelar analiticamente as tensões centrífugas devido à rotação em alta velocidade
- ✓ Determinar o estado de tensão resultante pela superposição dos carregamentos
- ✓ Verificar a integridade estrutural com base em fatores de segurança
- ✓ Calcular as tensões térmicas resultantes de gradientes de temperatura severos
- ✓ Avaliar os critérios de falha aplicáveis a materiais de alta performance

A Relevância

Fornecer uma visão clara e aplicada dos conceitos teóricos, demonstrando sua relevância para o projeto de componentes críticos em sistemas de propulsão aeronáutica, área de grande interesse para engenheiros de controle e automação envolvidos com sistemas mecânicos de alta confiabilidade.

Materiais

Evolução dos Materiais

O desenvolvimento de materiais para pás de turbina acompanhou a evolução da tecnologia aeronáutica. Inicialmente utilizavam-se aços inoxidáveis, mas com o aumento das temperaturas de operação, as superligas de níquel tornaram-se o padrão na indústria.

• Superligas de Níquel (Inconel, Waspaloy)

- Excelente resistência mecânica em altas temperaturas
- Boa resistência à oxidação e à corrosão sob tensão
- Capacidade de operar em temperaturas próximas ao ponto de fusão
- Material padrão para estágios de alta pressão e temperatura

• Alternativas Modernas

- Ligas de titânio: utilizadas em estágios de baixa temperatura
- Compósitos de matriz cerâmica (CMCs): emergem como alternativa para estágios de alta temperatura, permitindo operação a temperaturas ainda mais elevadas com menor necessidade de resfriamento.



Componente de turbina em superliga de níquel Inconel 939



Tensões Centrífugas



Conceito Fundamental

Quando um corpo gira em torno de um eixo fixo, cada partícula do material experimenta uma aceleração centrípeta. Em uma pá de turbina, essa força de inércia distribui-se por todo o volume do material, gerando tensões internas conhecidas como tensões centrífugas.



Modelagem Matemática

Para uma barra rotativa de área de seção transversal A e massa específica ρ , girando com velocidade angular ω , a tensão centrífuga máxima na raiz da pá é:

Tensão Centrífuga Máxima:

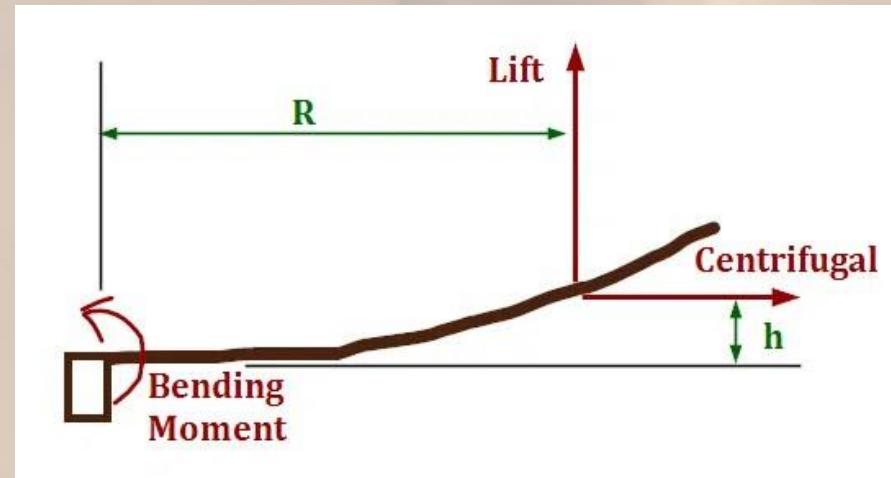
$$\sigma_{c,\max} = (\rho \omega^2 R^2) / 2$$



Características Principais

- ▶ Tensão máxima ocorre na raiz da pá ($r = 0$)
- ▶ Tensão zero na ponta da pá ($r = R$)
- ▶ Distribuição parabólica ao longo do comprimento
- ▶ Dependência crítica com o quadrado da velocidade angular (ω^2)
- ▶ Dependência com o quadrado do raio (R^2)

Implicação Prática: Esta relação quadrática explica por que limites de rotação são tão rigorosos em turbinas aeronáuticas.





Tensões Térmicas



Modelagem Matemática

$$\epsilon_{th} = \alpha \Delta T$$

Deformação térmica livre para variação de temperatura ΔT

$$\sigma_{th} = E \alpha \Delta T$$

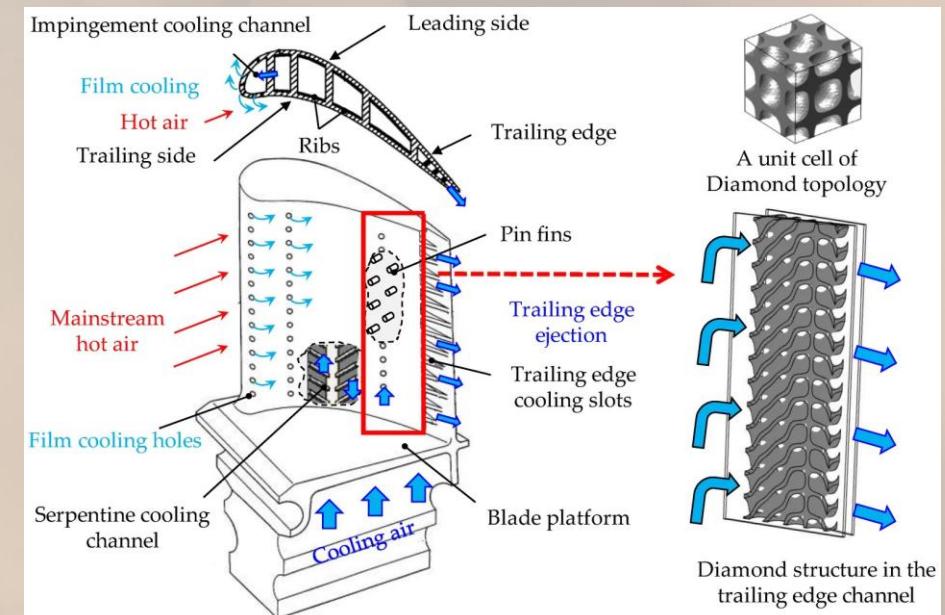
$$\sigma_{th,max} \approx E \alpha \Delta T / [2(1-\nu)]$$

Tensão máxima para gradientes ao longo da espessura



Características Principais

- ▶ Gradiente entre bordo de ataque (mais quente) e bordo de fuga (mais frio)
- ▶ Gera momento fletor térmico
- ▶ Dependência linear com ΔT e propriedades do material (E, α, ν)





Modelo Analítico



Geometria da Pá

Comprimento (L)	0,15 m
Largura (b)	0,032 m
Espessura (t)	0,025 m
Área da seção transversal (A)	$8,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$



Material: Inconel 718 (a 800°C)

Massa específica (ρ)	8190 kg/ms
Módulo de elasticidade (E)	150 GPa
Coef. expansão térmica (α)	$15 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Limite de escoamento (σ_{ys})	700 MPa



Condições Operacionais

Velocidade angular (ω)	1000 rad/s (~9550 RPM)
Temp. bordo de ataque (T_{BA})	900 °C
Temp. bordo de fuga (T_{BF})	700 °C
Gradiente de temperatura (ΔT)	200 °C
Fator de segurança (N)	1,5





Hipóteses de Simplificação

A 1 Comportamento do Material

- Material homogêneo, isotrópico e de comportamento linear elástico
- Validade da Lei de Hooke generalizada
- Pequenas deformações e deslocamentos

A 3. Carregamentos

- Perfil de temperatura linear ao longo da espessura
- Velocidade angular constante
- Tensões de flexão devido ao escoamento do fluido desprezadas

Justificativa

Estas hipóteses permitem uma análise analítica clara e aplicada, fornecendo resultados conservadores para verificação inicial da integridade estrutural. O modelo simplificado captura os efeitos dominantes das tensões centrífugas e térmicas, sendo adequado para análise preliminar de projeto.

A 2. Geometria

- Área da seção transversal constante ao longo do comprimento
- Modelagem como viga em balanço

A 4. Simplificações

- Acoplamento termo-mecânico não considerado em primeira aproximação
- Estado plano de tensões

Resultados Numéricos

Tensão Centrífuga Máxima (na raiz)

$$\sigma_{c,max} = 92,14 \text{ MPa}$$

Tensão Térmica Máxima (nos bordos)

$$\sigma_{th,max} = 326,09 \text{ MPa}$$

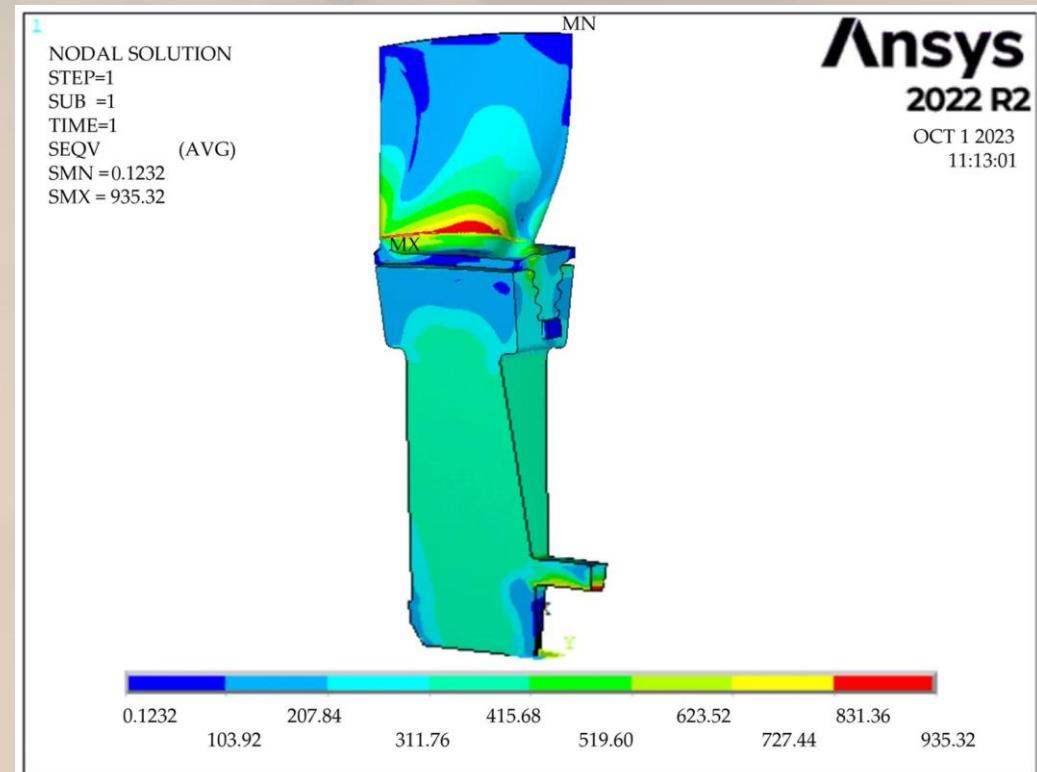
Tensão Total Máxima

$$\sigma_{total,max} = 418,23 \text{ MPa}$$

Análise Comparativa

Tensão Centrífuga	92,14 MPa	22,0%
Tensão Térmica	326,09 MPa	78,0%
Tensão Total	418,23 MPa	100%

As tensões térmicas são dominantes nas condições operacionais analisadas, representando aproximadamente 78% da tensão total máxima.





Verificação de Integridade



Critério de Falha

Para verificar a integridade estrutural, utiliza-se o critério de von Mises. Para o estado uniaxial de tensões predominante:

$$\sigma_{\text{total},\max} \leq \sigma_{ys} / n$$



Cálculo da Tensão Admissível

Límite de escoamento do Inconel 718 a 800°C: $\sigma_{ys} = 700 \text{ MPa}$

Fator de segurança: $n = 1,5$

Tensão admissível: $\sigma_{adm} = 700 / 1,5 = 466,67 \text{ MPa}$

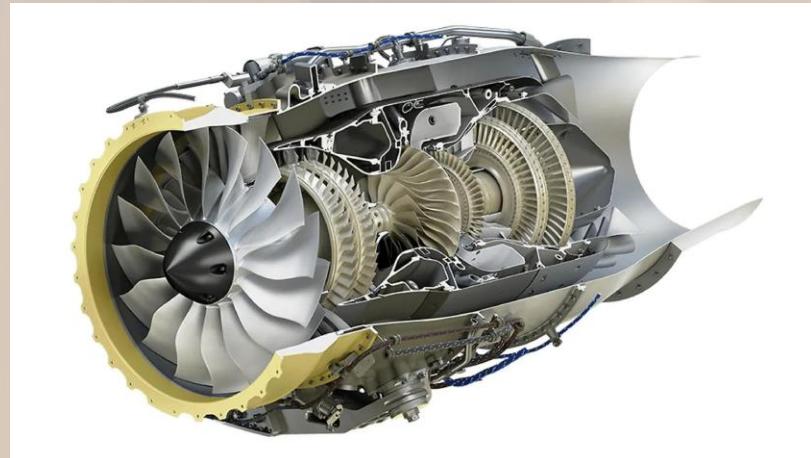


Comparação

Tensão total máxima: **418,23 MPa**

Tensão admissível: **466,67 MPa**

Margem de segurança: $[(466,67 / 418,23) - 1] \times 100\% = 11,6\%$ — operação próxima ao limite.





Fatores Críticos

Sensibilidade à Velocidade Angular

$\sigma_c \propto \omega^2$: pequenos aumentos em ω elevam rapidamente as tensões centrífugas.

Sensibilidade ao Gradiente Térmico

$\sigma_{th} \propto \Delta T$: controle térmico é essencial para manter tensões em níveis seguros.

Efeito de Concentração de Tensões na Raiz

Entalhe na transição pá–disco concentra tensões ($K_t \approx 1,5–3,0$).

Exemplo com $K_t = 2,0$:

$$\sigma_{c,max,real} = 2,0 \times 92,14 = 184,28 \text{ MPa}$$

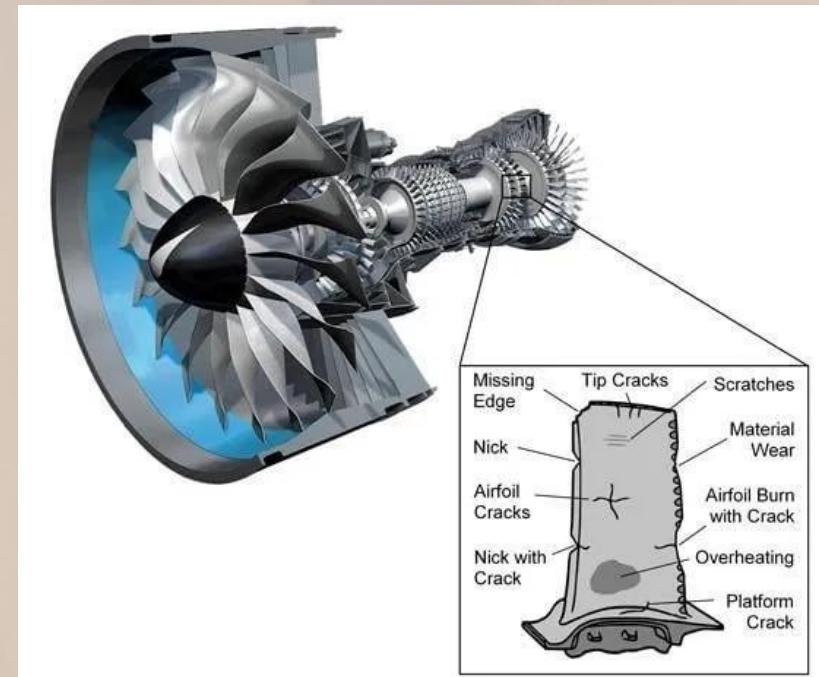
$$\sigma_{total,max,real} = 184,28 + 326,09 = 510,37 \text{ MPa}$$

⚠ Esta tensão excede a tensão admissível de 466,67 MPa!

Resultado: a fixação pá–disco é crítica.

Consideração da Fluênciça

A 800°C, o Inconel 718 apresenta fluênciça relevante em centenas de horas; projetar para vida limitada do componente.



Taxonomia de defeitos em pás de turbina



Conclusões e Recomendações

Principais Conclusões

1. **Dominância das Tensões Térmicas:** As tensões térmicas são dominantes nas condições analisadas, representando aproximadamente **78%** da tensão total máxima. O controle térmico é fundamental para a integridade estrutural.
2. **Margem de Segurança Limitada:** A tensão total máxima calculada (418,23 MPa) situa-se dentro da tensão admissível (466,67 MPa), porém com margem de segurança relativamente baixa (**11,6%**).
3. **Criticalidade da Concentração de Tensões:** A consideração de efeitos de concentração de tensões na raiz pode levar a tensões acima do limite admissível, destacando a importância do projeto detalhado desta região.
4. **Sensibilidade Operacional:** A sensibilidade quadrática da tensão centrífuga com a velocidade angular ($\sigma_c \propto \omega^2$) e linear da tensão térmica com o gradiente de temperatura ($\sigma_{th} \propto \Delta T$) foi quantificada.

Recomendações

- ▶ Projeto detalhado da região de fixação pá-disco para minimizar concentração de tensões e evitar falhas prematuras
- ▶ Implementação de sistemas de resfriamento eficientes para reduzir gradientes térmicos e controlar tensões térmicas dominantes
- ▶ Monitoramento contínuo de temperatura e rotação durante operação para garantir limites seguros
- ▶ Consideração de fluência no projeto para vida limitada do componente em altas temperaturas
- ▶ Desenvolvimento de sistemas de controle para limitação de rotação (controle de σ_c) e gerenciamento térmico (controle de σ_{th})
- ▶ Análise por elementos finitos para validação dos resultados analíticos e consideração de geometrias complexas
5. **Relevância para Engenharia de Controle:** Esta análise é fundamental para dimensionar sistemas de proteção e controle do motor, como limitadores de rotação e gerenciamento térmico.

Obrigado Pela Atenção



Estudo de Vibrações em Sistemas de Exaustão Automotiva: Análise do Comportamento Acústico e Estrutural para Redução de Ruído

Aurélio José de Genaro Roma
aurelio.roma@aluno.ifsp.edu.br

Luís Gustavo de Deus Sperandio
deus.sperandio@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Os sistemas de exaustão automotiva desempenham um papel multifuncional crítico, sendo essenciais tanto para a emissão de gases quanto para a atenuação sonora em veículos de combustão interna.
- Devido às severas condições operacionais (altas temperaturas e pressões) e características geométricas, esses sistemas estão intrinsecamente sujeitos a vibrações estruturais e oscilações de pressão, que podem comprometer tanto a durabilidade da estrutura quanto o conforto acústico do veículo
- Este trabalho tem por objetivo apresentar e validar uma metodologia de análise e controle das vibrações inerentes ao sistema de exaustão automotiva, com foco na identificação e mitigação de problemas de ressonância estrutural e acústica



Sistema de Exaustão Automotiva

A Análise de Controle Passivo e Mitigação Local de Vibração

O pilar inicial consiste na Análise Modal via Elementos Finitos (FEA) e para a mitigação ativa de ruído e vibração, é explorada a aplicação e modelagem de um Absorvedor de Massa Sintonizado (AMS)

A Diagnóstico Vibro acústico em Nível de Sistema (Estudo de Caso)

O trabalho visa investigar as causas sistêmicas de ruído, com um estudo de caso dedicado ao fenômeno conhecido como booming noise. Para tal, é aplicada a técnica de Análise dos Caminhos de Transferência de Energia (TPA)

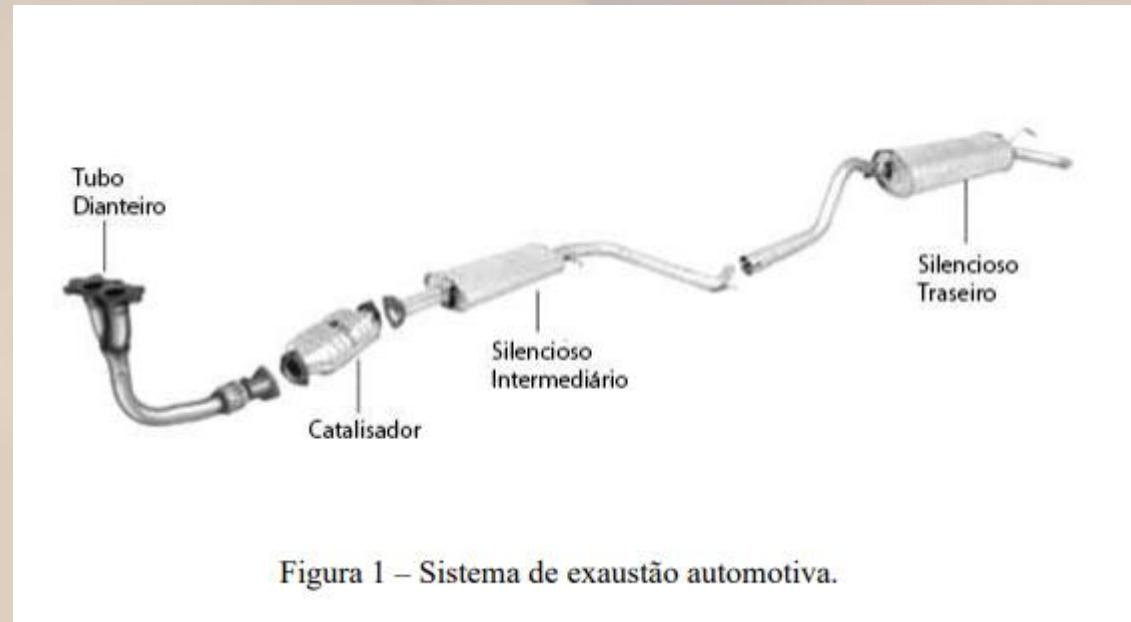


Figura 1 – Sistema de exaustão automotiva.



Fundamento Histórico

-  É pertinente mencionar avanços históricos que contribuíram para o controle de ruídos e vibrações.
-  Um marco relevante foi a descoberta da vulcanização da borracha natural por Charles Goodyear, em 1839. Este processo, que envolve aquecer a borracha misturada com enxofre, revolucionou as propriedades mecânicas do material, aprimorando significativamente sua durabilidade e resistência.
-  Essa inovação não apenas reduziu o ruído e a vibração de rodagem, mas também melhorou a segurança e a eficiência



Fundamentos Teóricos

- A A vibro acústica em sistemas automotivos estuda como vibrações e ruídos do motor se propagam pelo veículo, afetando conforto e desempenho. Quando a frequência da vibração coincide com a frequência natural do sistema, ocorre ressonância, aumentando significativamente a amplitude vibracional.
- A Um fenômeno comum é o **booming noise**, um ruído grave de baixa frequência percebido no interior do veículo, causado pelo acoplamento entre vibrações estruturais e ruído transmitido pelo ar. Esse efeito é influenciado principalmente pelo torque do motor, enquanto sua frequência depende da rotação.
- A O controle eficiente exige análise integrada dos caminhos de transmissão para evitar soluções isoladas e pouco eficazes.



Análise Estrutural

- 💡 O objetivo da análise modal é identificar as **frequências naturais estruturais (w_n)** do sistema de exaustão.
- 💡 O projeto deve garantir que (w_n) não coincide com as frequências geradas pelo motor (harmônicas de ignição), evitando **ressonância**.
- 💡 Utiliza-se como modelo um **segmento de tubo idealizado como viga**.
- 💡 As frequências naturais dependem de:
 - ✓ Módulo de elasticidade (E)
 - ✓ Geometria da seção transversal (I)
 - ✓ Condições de contorno (β)
 - ✓ Massa por comprimento (μ)
 - ✓ Comprimento do tubo (L).
- 💡 Equação utilizada para estimar a frequência natural:

$$\omega_n = \beta^2 L^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu}}$$



Análise Acústica

-  O ruído interno do sistema é causado pela **propagação da onda de pressão dos gases** dentro do duto.
-  Esse fenômeno é relacionado à **ressonância acústica longitudinal**, que amplifica frequências específicas.
-  A ressonância depende de:
 - ✓ Velocidade do som nos gases quentes (c)
 - ✓ Comprimento do duto (L)
 - ✓ Ordem harmônica (k)
-  Equação utilizada para estimar a frequência acústica:
$$f_k = k \frac{c}{2L}$$



Metodologia de Análise e Modelagem

-  **Testes de Bancada:** Ensaios experimentais em um sistema real usando acelerômetros (vibração estrutural) e microfones (resposta acústica) em condições que simulam a montagem veicular.
-  **Simulação (FEA):** Utilização de software de Elementos Finitos (FEA) para executar a análise harmônica, determinando as frequências naturais e os modos de vibração do sistema.
-  **Modelagem da Resposta:** Modelagem da resposta estrutural em regime ressonante, com foco na identificação dos picos críticos de vibração e suas respectivas amplitudes.



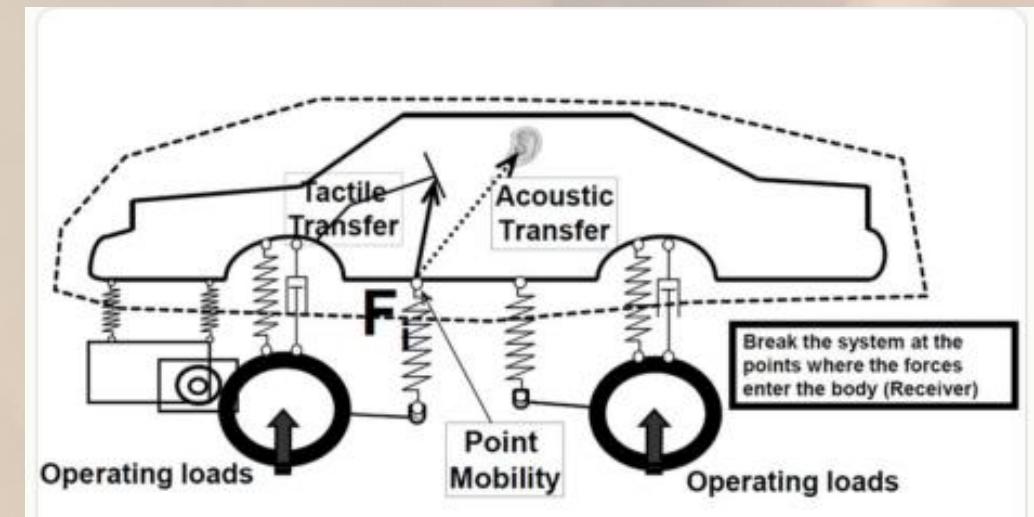
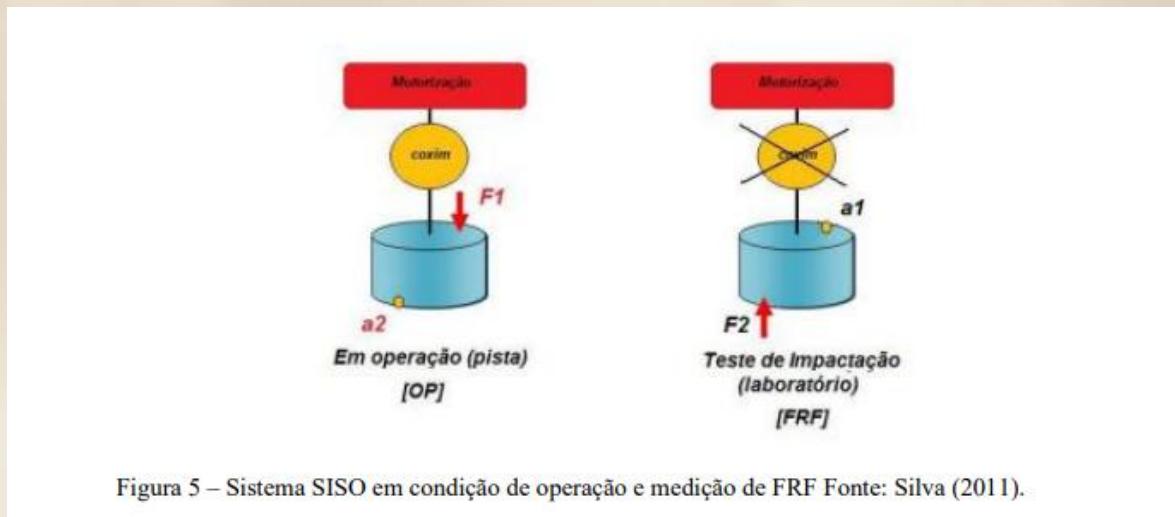
Análise dos Caminhos de Transferência (TPA)

Fundamentos da Análise TPA

- Usada para identificar as fontes dominantes e os caminhos de transmissão do ruído (estrutural vs. aéreo).
- Combina dados de carregamentos operacionais (obtidos em pista) com Funções de Resposta em Frequência (FRFs) (medidas em laboratório).
- Aplica a Lei da Reciprocidade para determinar forças desconhecidas no sistema.
- Permite quantificar a contribuição de cada fonte para o problema acústico geral.



Análise dos Caminhos de Transferência (TPA)





Análise de Sinais - Tempo vs. Frequência



Domínio do Tempo e Domínio da Frequência

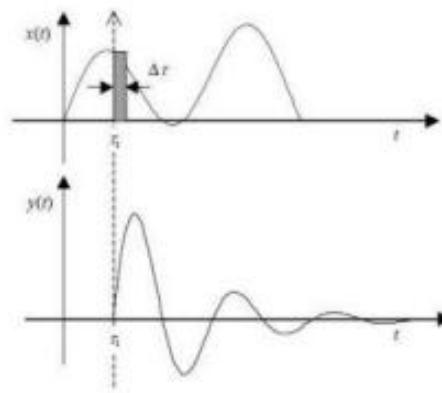


Figura 6 - Sinal de entrada indicando uma das entradas e respectiva resposta. Fonte: Silva (2011).



Domínio do Tempo e Domínio da Frequência

A resposta $y(t)$ é a **Convolução** da entrada $x(t)$ com a resposta ao impulso $h(t)$.

Integral de Duhamel: $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau$ mostra a resposta de um sistema linear causal a uma entrada qualquer.

A Transformada de Fourier converte a convolução em uma simples **Multiplicação**.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot g(-\tau) \cdot d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot G(f) \cdot df$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{i2\pi ft} \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} g(-t) \cdot e^{i2\pi ft} \cdot dt$$



Domínio do Tempo e Domínio da Frequência

A resposta a uma exponencial complexa é também uma exponencial complexa. Portanto da transformada de Fourier inversa podemos escrever.

A $x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{-i2\pi ft} \cdot df$, pelo método da superposição temos que:
 $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) \cdot h(f) \cdot e^{-i2\pi ft} \cdot df$.

A Por fim temos a solução : $\int_{-\infty}^{\infty} X(\varepsilon) \cdot H(\varepsilon) \cdot \delta(f - \varepsilon) \cdot d\varepsilon \rightarrow Y(f) = X(f) \cdot H(f)$



Conclusões

- A análise modal permitiu identificar e evitar frequências críticas, reduzindo vibração e ruído no sistema de exaustão
- A aplicação de TPA ajudou a mapear os caminhos de transmissão e entender as fontes do booming noise.
- Testes confirmaram que ajustes estruturais e soluções acústicas melhoram o desempenho NVH.
- A metodologia mostrou-se eficaz para otimizar projeto, reduzir retrabalho e garantir melhor conforto acústico.

Obrigado Pela Atenção



Cálculo de Tensões em Vigas de Pontes Rodoviárias e Ferroviárias: Análise de Cargas Móveis e seu Efeito na Segurança Estrutural

João Nadalucci Almeida
joao.nadalucci@aluno.ifsp.edu.br

Cauã Vieira De Carvalho
caua.carvalho@aluno.ifsp.edu.br



Introdução



Contexto & Objetivo:

- Pontes rodoviárias e ferroviárias são vitais para a infraestrutura, exigindo rigorosa análise de segurança.
- Cargas móveis variam em intensidade e posição, diferindo significativamente de cargas estáticas.
- Objetivo: Calcular e comparar tensões geradas por modelos normativos (TB-450 vs TB-270).



Propriedades do Material e Perfil



Propriedades:

- Material: Aço A36 (Dúctil) | Escoamento: 250 MPa
- Coeficiente de Segurança: $k = 1.1$ (conforme NBR 8800)
- Tensão Admissível: 227 MPa
- Perfil da Viga: W610x174 (Altura = 620 mm)
- Inércia (I): 1.478.700.000 mm⁴



Modelos de Carga Normativos



Rodoviário (TB-450) - NBR 7188:

- Veículo tipo de 450 kN (45 toneladas).
- 6 rodas, 3 eixos afastados 1.5m.
- Carga distribuída de 5 kN/m² na pista.



Ferroviário (TB-270) - NBR 7189:

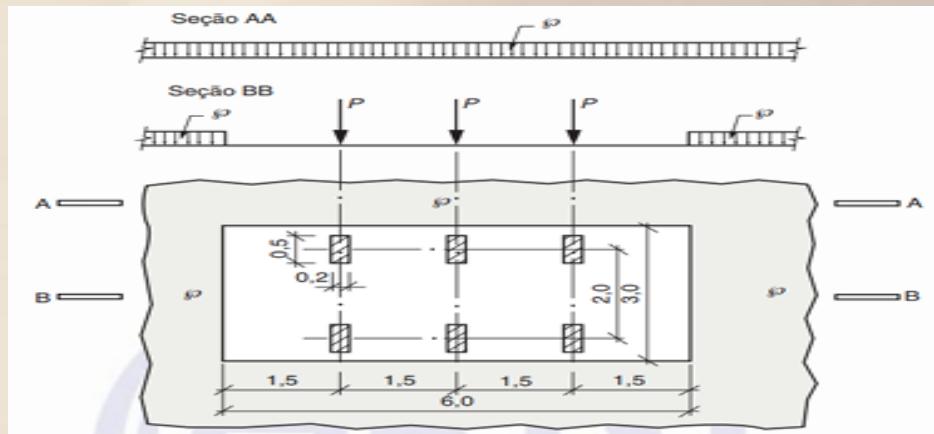
- Composição de 270 kN por eixo.
- 4 eixos concentrados (locomotiva).
- Carga distribuída de 90 kN/m (vagões carregados).



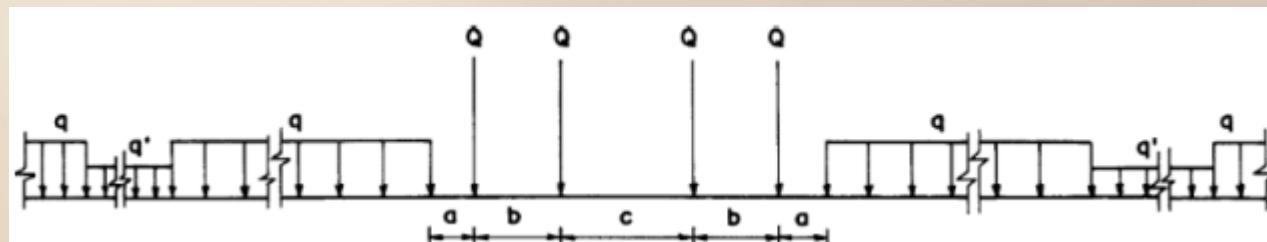
Visualização dos Treins-Tipo



TB-450 (Rodoviário): Cargas pontuais mais distribuída leve.



TB-270 (Ferroviário): Cargas axiais elevadas e distribuída pesada.





Conceito de Linhas de Influência

- A Linha de Influência (LI) registra a variação de um esforço (momento, cortante) em uma seção fixa conforme uma carga unitária percorre a viga.
- Para uma viga biapoiada, o momento máximo ocorre no meio do vão ($L/2$).
- Ordenada máxima (y) para vão de 20m = 5,0m.



Cálculo: Ponte Rodoviária (TB-450)

-  Posicionamento Crítico: Carga central no pico da LI ($x=10m$).
-  Momento Máximo: 1012.5 kNm.
-  Tensão Calculada: 212.5 MPa.
-  Resultado: Aprovado ($212.5 < 227$ MPa).



Cálculo: Ponte Ferroviária (TB-270)

- Carregamento Severo: Carga Distribuída (90kN/m) + Concentradas (270kN).
- Momento Total: 8955 kNm (quase 9x maior que o rodoviário).
- Tensão Calculada: 1877 MPa.
- Resultado: Falha Catastrófica ($1877 > 227$ MPa).



Análise Comparativa

- Limite Admissível (A36): 227 MPa.
- Ponte Rodoviária: 212 MPa (Seguro).
- Ponte Ferroviária: 1877 MPa (Colapso).
- Resumo: A viga W610x174 sofre colapso imediato sob cargas ferroviárias, excedendo o limite de resistência em mais de 800%.



Conclusões

- Adequação Rodoviária: O perfil W610x174 atende aos requisitos de segurança para o trem-tipo TB-450.
- Inviabilidade Ferroviária: A mesma viga é totalmente incapaz de suportar o trem-tipo TB-270.
- Normatização: É crucial aplicar a norma correta (NBR 7188 vs 7189) para evitar subdimensionamento.

Obrigado Pela Atenção



Tensões Residuais em Soldas de Estruturas Aeronáuticas: Análise de como Afetam a Durabilidade e a Segurança

Enzo Buldrini Contarini
contarini.e@aluno.ifsp.edu.br

Giovana Carvalho Viana
viana.c@aluno.ifsp.edu.br



Introdução: A importância da Segurança

- ▶ Problemas das tensões residuais geradas em processos de soldagem em estruturas aeronáuticas e seu impacto na segurança e durabilidade.
- ▶ Caso Piper PA-46 Malibu.



Caso Piper PA-46 Malibu

- ▶ A investigação apontou fadiga em solda mal executada no berço do motor, fundamental para o trem de pouso
- ▶ Soldas introduzem tensões residuais que comprometem a integridade do avião.
- ▶ A segurança aeronáutica depende rigorosamente da análise destas tensões





Objetivo

 **Objetivo geral:** Analisar e sintetizar o conhecimento e formação de tensões residuais em juntas soldadas de materiais aeronáuticos, principalmente alumínio e titânio.

 **Objetivos específicos:**

- Discutir mecanismos de formação;
- Avaliar impacto na fadiga e fratura;
- Apresentar técnicas de medição (DRX, Ultrassom);
- Propor métodos de mitigação (shot peeing);



Conceitos de Falha

- ⚠ O termo falha possui uma ampla definição, não somente o caso de ruptura ou fratura de algum material. Abrange qualquer alteração que impede o componente de cumprir, de maneira satisfatória, sua função.
- ⚠ Os principais tipos de falhas mecânicas para solda são:
 - Falha por deformação
 - Falha por fadiga
 - Falha por corrosão/desgaste
 - Falha por ruptura
- ⚠ Compreender que existem essas falhas é o primeiro passo para evitar problemas com as soldas no campo aeronáutico.



Fadiga

A fadiga é um processo de dano localizado progressivo que ocorre em materiais com processo a deformações cíclicas. É a principal falha que deve ser evitada na indústria aeronáutica, dado que os aviões são constantemente expostos a deformações cíclicas (rajadas de ventos, manobras).

Progresso da Fadiga:

Estagio I – Nucleação da trinca: Trincas microscópicas que geram nos pontos de alta concentração na superfície do componente.

Estagio II – Propagação da trinca: Assim a trinca começa a se propagar, porem apresentam as “marcas de praia” (visíveis a olho nu), e também as estrias (visíveis a microscópios).

Estagio III – Fratura final (Ruptura): Ocorre quando a estrutura remanescente não é mais capaz de suportar a carga aplicada a ela.



Concentradores de Tensão

- Concentradores de tensão são locais preferenciais para a nucleação de trincas. Depende principalmente da geometria da peça, cantos vivos, raios de concordância pequenos e defeitos agudos resultam em valores de concentração mais elevados.
- Nas soldas a transição geométrica do metal de solda para o metal de base é um dos mais severos concentradores de tensão encontrados na engenharia. Tornando-se um ponto de partida fácil para falhas por fadiga.



Mecânica da Fratura

- A A mecânica da fratura estuda os componentes que já possuem uma fratura existente nele. Este estudo é feito para que possa evitar a ruptura neste tipo de componente
- A Este estudo quantifica a relação entre a tensão aplicada, o tamanho do defeito, a resistência intrínseca do material à propagação de uma trinca.
- A Cada material possui sua própria resistência intrínseca, essa propriedade é chamada de tenacidade a fratura. A tenacidade a fratura é o valor critico de propagação da tensão, que ao ser atingido pode gerar a propagação da trinca de forma rápida e instável.



Processos de Fabricação

A Usinagem:

Rugosidade e Marcas de Usinagem: A ação de corte inevitavelmente deixa marcas e vales microscópicos na superfície usinada. Essas irregularidades, que compõem a rugosidade da superfície, atuam como microconcentradores de tensão.

Tensões Residuais de Usinagem: Tensões de tração na superfície são extremamente danosas, pois se somam às tensões de serviço, acelerando a iniciação e propagação de trincas de fadiga. Por outro lado, tensões de compressão são benéficas



Processos de Fabricação

 **Shot Peening:** O shot peening é um processo de tratamento superficial de trabalho a frio, projetado especificamente para aumentar a resistência à fadiga de componentes metálicos.

Mecanismo de Ação: Ele consiste em bombardear a superfície de uma peça com um fluxo de pequenas esferas, gerando uma deformação plástica localizada na camada superficial. O material logo abaixo da superfície, que não sofre deformação plástica, exerce uma força para restaurar a superfície à sua forma original. Essa interação entre a camada superficial "esticada" e o núcleo elástico subjacente resulta na criação de uma camada com alta magnitude de tensão residual de compressão

Benefícios para a Resistência à Fadiga:

Aumento da Vida em Fadiga: Torna-se muito mais difícil nuclear uma trinca.

Aumento da Tolerância ao Dano: Retarda a propagação de trincas pequenas que possam existir.

Mitigação de Concentradores de Tensão: O processo é eficaz em neutralizar os efeitos nocivos de marcas de usinagem, pequenos riscos e outros defeitos superficiais.



Simulação por Elementos Finitos (FEA/MEF) Difração de Raios-X (DRX)



Simulação (FEA/MEF)

Função: Prever o comportamento de sistemas complexos (ex: juntas soldadas) separando-os em "elementos finitos".

Aplicação em Soldagem: Simulação termo-mecânica acoplada para prever a distribuição e magnitude das tensões residuais de soldagem (evitando picos de tração antes da produção).



Medição Experimental (DRX) :

Função: Técnica de referência não-destrutiva para medir tensões residuais.

Princípio: Baseado na Lei de Bragg. Mede a alteração no espaçamento atômico do material (que funciona como um "calibrador de deformação") para calcular a tensão.

Uso: Validar resultados de FEA e quantificar a camada compressiva do shot peening



Ultrassom

- ▶ O método ultrassônico é uma técnica não destrutiva (END) para medir tensões residuais, baseada no efeito acustoelástico.
- ▶ Princípio: A velocidade da onda ultrassônica muda conforme o estado de tensão do material: Tração: Velocidade diminui. Compressão: Velocidade aumenta.
- ▶ Técnica Chave: Utiliza Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR), que se propagam paralelamente à superfície.
- ▶ Vantagem: Portátil, não destrutivo e versátil para geometrias complexas.
- ▶ Desafio: Requer calibração cuidadosa, pois é sensível a variações microestruturais do material.



Materiais e Métodos

- 💡 Preparação da amostra e os procedimentos laboratoriais utilizados para investigar a falha por fadiga.
- 1. Componente Analisado Material: Junta soldada de topo (butt joint) de liga de Alumínio 2024-T3 (6 mm de espessura).
- 2. Importância: Escolha primária para estruturas aeronáuticas críticas devido à sua alta resistência mecânica e tenacidade à fratura.
- 3. Processo de União: Soldagem por Fricção e Mistura (FSW).
- 4. Amostra de Ensaio: Foram extraídos corpos de prova transversais ao cordão, seguindo a norma ASTM E466 para ensaios de fadiga



Materiais e Métodos

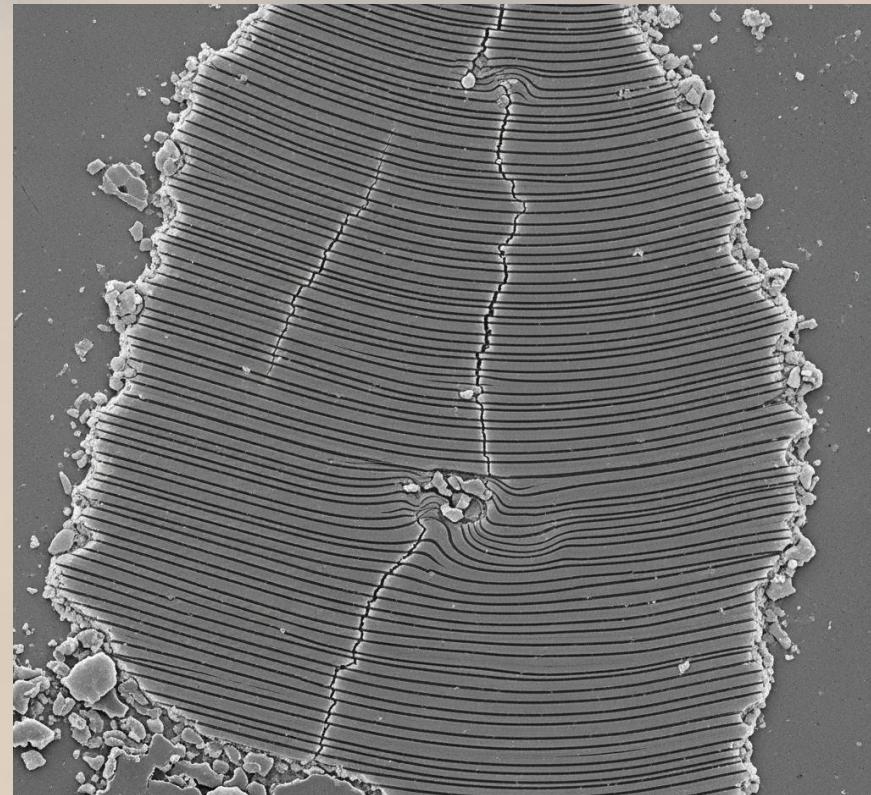
PROCEDIMENTOS REALIZADOS: Os procedimentos foram focados em caracterizar a microestrutura e o mecanismo de falha:

1. Análise Visual e Estereoscópica (10x): Inspeção macroscópica da superfície de fratura para localizar a origem da falha e identificar características macroscópicas (ex: deformação plástica).
2. Análise Metalográfica: Preparação padrão e ataque com Reagente de Keller. Objetivo: Caracterizar e delimitar as diferentes zonas da solda FSW: Nugget, ZTMA e ZTA.
3. Análise Fractográfica via MEV: Uso do Microscópio Eletrônico de Varredura para investigação detalhada da topografia da fratura.
4. Foco: Identificar o sítio de nucleação da trinca de fadiga, mapear a propagação através das estrias de fadiga e caracterizar a morfologia da fratura final.

Resultados e Discussão



Apresenta as imagens e os dados obtidos na análise visual.



Apresenta as imagens do MEV mostrando as marcas de praia típicas da fadiga.



Conclusões

- Síntese: A falha foi inquestionavelmente por fadiga, e a rugosidade da usinagem foi a causa raiz da nucleação. Isso reforça que mesmo processos de soldagem de alta qualidade (como o FSW) não compensam um acabamento superficial deficiente.
- Recomendação: A solução mais eficaz é a aplicação de Shot Peening após a usinagem. Isso irá introduzir a camada protetora de tensões residuais de compressão, garantindo maior vida útil em fadiga e segurança estrutural, neutralizando o efeito de pequenos defeitos superficiais inevitáveis.

Obrigado Pela Atenção



Análise de Falha em Eixos de Transmissão Automotiva: Um Estudo Abrangente sobre o Impacto de Torções Repetitivas e Cargas Súbitas

João Vitor Landmann Pricoli
joao.pricoli@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- A Sobre o que vamos falar?
- A O que é um eixo de transmissão.
- A Fatores que podem causar ou facilitar o acontecimento de falhas nos eixos de transmissão.
- A Métodos de investigação de falhas.
- A Métodos de prevenção de falhas.



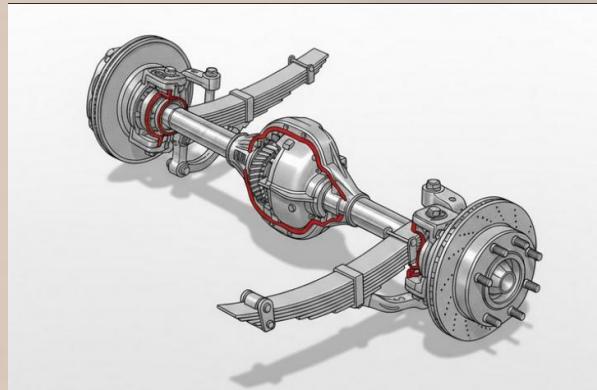
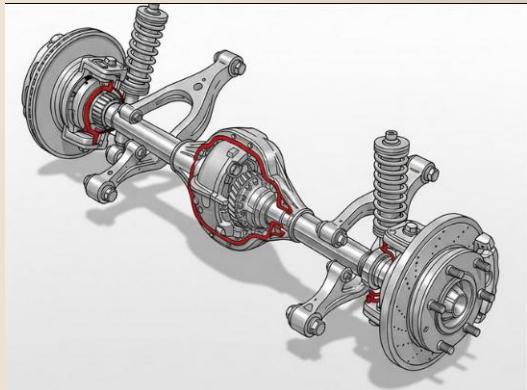
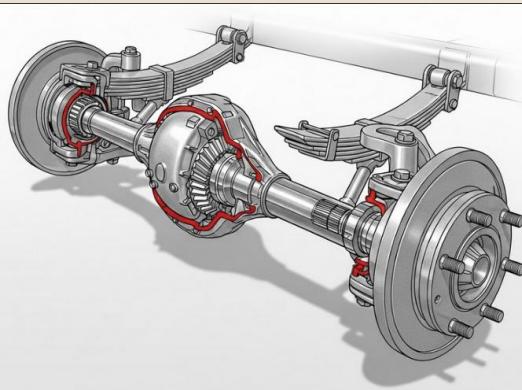
O que é um Eixo de Transmissão?

- 💡 O eixo de transmissão é um componente automotivo essencial que transfere o torque da caixa de câmbio para o diferencial e as rodas, convertendo a força do motor em movimento.
- 💡 Abordaremos 3 tipos de eixos de transmissão, eixo inteiriço, eixo bipartido e eixo deslizante.



Tipos de Eixos

- 💡 Eixo inteiriço: Tubo sólido simples, usado em entre-eixos curtos. Menos pontos de falha.
- 💡 Eixo bipartido: Dividido para evitar ressonância ("chicoteamento") em veículos longos.
- 💡 Eixo deslizante: Construção telescópica para segurança passiva em colisões.





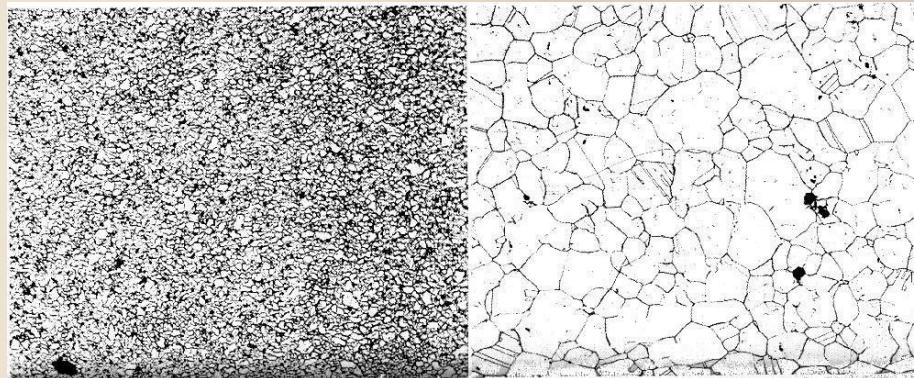
Metalurgia: Seleção dos Aços

Grau (SAE)	Composição Chave	Características
SAE 4140	Cr, Mo	Alta resistência ao desgaste e boa temperabilidade.
SAE 4340	Cr, Ni, Mo	Alta resistência à fadiga e excelente tenacidade.
SAE 8620	Cr, Ni, Mo	Superfície dura (cementada) com núcleo tenaz.



Tratamento Térmico

- O tratamento térmico de metais consiste em alguns processos principais envolvendo aquecimento e resfriamento de metais para que eles atinjam as propriedades desejadas.
- Esse processo deve ser extremamente preciso e é muito importante para a vida útil da peça.



<https://www.youtube.com/watch?v=SirzBcShiQo>



Tipos de Falha

- ⚠ Falhas por fadiga são falhas que ocorrem por conta de tensão repetitiva, começam de forma pequena e vão aumentando.
- ⚠ Falhas por sobrecarga são o oposto, acontecem de forma abrupta por conta de eventos de alta energia como impactos.



Fadiga por Torção

-  A fadiga costuma ocorrer em 3 estágios
 - (I) Nucleação
 - (II) Propagação
 - (III) Ruptura
-  O fator de concentração é um ponto extremamente importante de se levar em conta, se a peça tiver uma geometria não adequada, o K_t será alto, fazendo com que a tensão no ponto seja muito mais alta.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$



Metodologias de Análise

- Existem diversas maneiras de analisar como e porque uma falha ocorreu, mas abordaremos 3 delas nessa apresentação, a análise fractográfica, a análise metalúrgica e a FEA.
- Falhas podem ser causadas por diversos fatores, e cada um desses métodos tem em mente um aspecto que pode ter causado a falha, por isso é sempre essencial ter em mente que um único método jamais será suficiente para uma análise profunda e bem elaborada, com o intuito de identificar a real causa da falha.

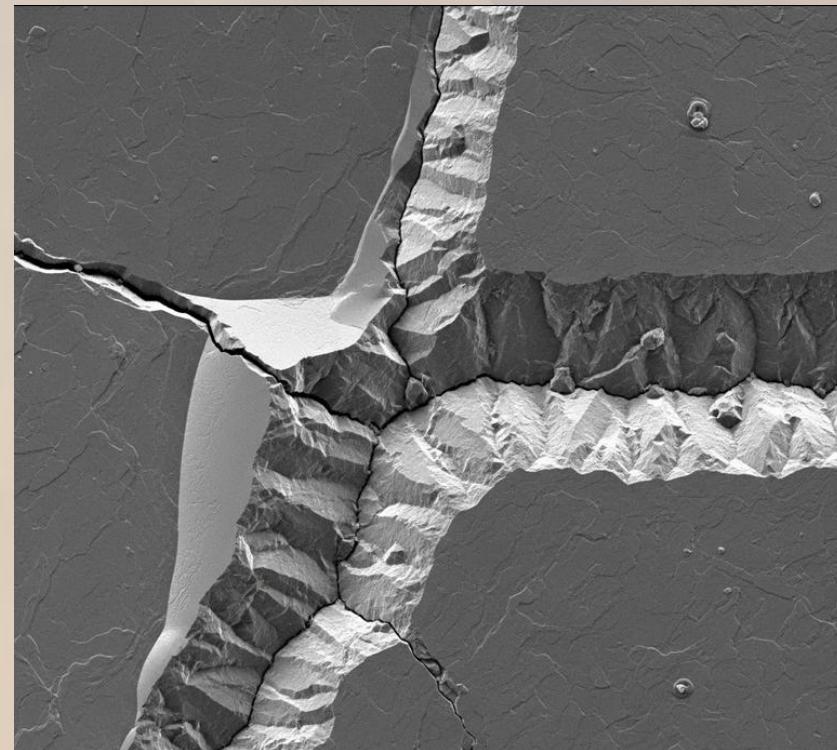


Análise Fractográfica

- A A análise fractográfica é um passo essencial para o estudo de uma falha, visto que ela “decodifica a história da falha”, ou seja, o modo e mecanismo de fratura, onde a fratura começou e sua propagação através do componente.
- A Podemos dividir ela em 2 partes principais: Fractografia macroscópica e microscópica.
- A Fractografia macroscópica: estuda partes da fratura visíveis a olho nú e pode revelar a origem geral da fratura e seu caminho principal.
- A Fractografia microscópica: estuda partes da fratura não visíveis, geralmente utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para identificar mecanismos finos, como estrias de fadiga, micro rupturas, entre outros.

A

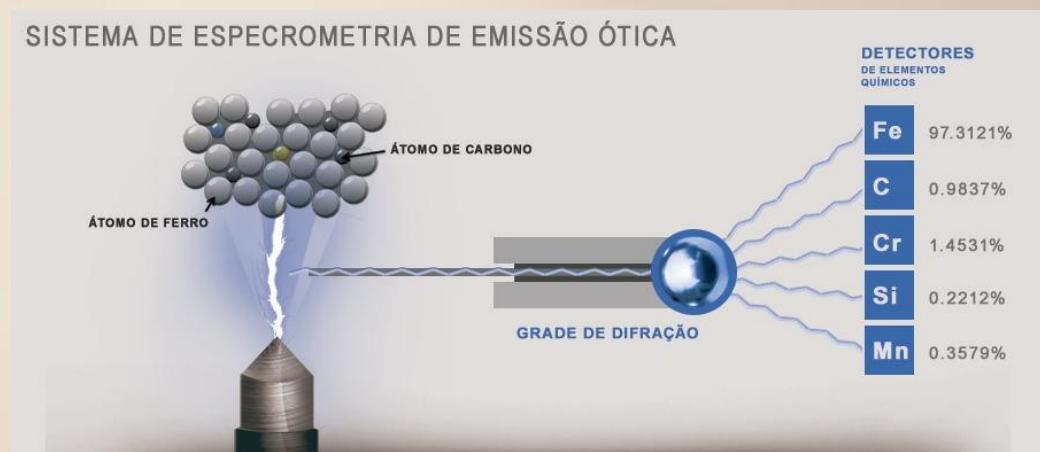
Análise Fractográfica



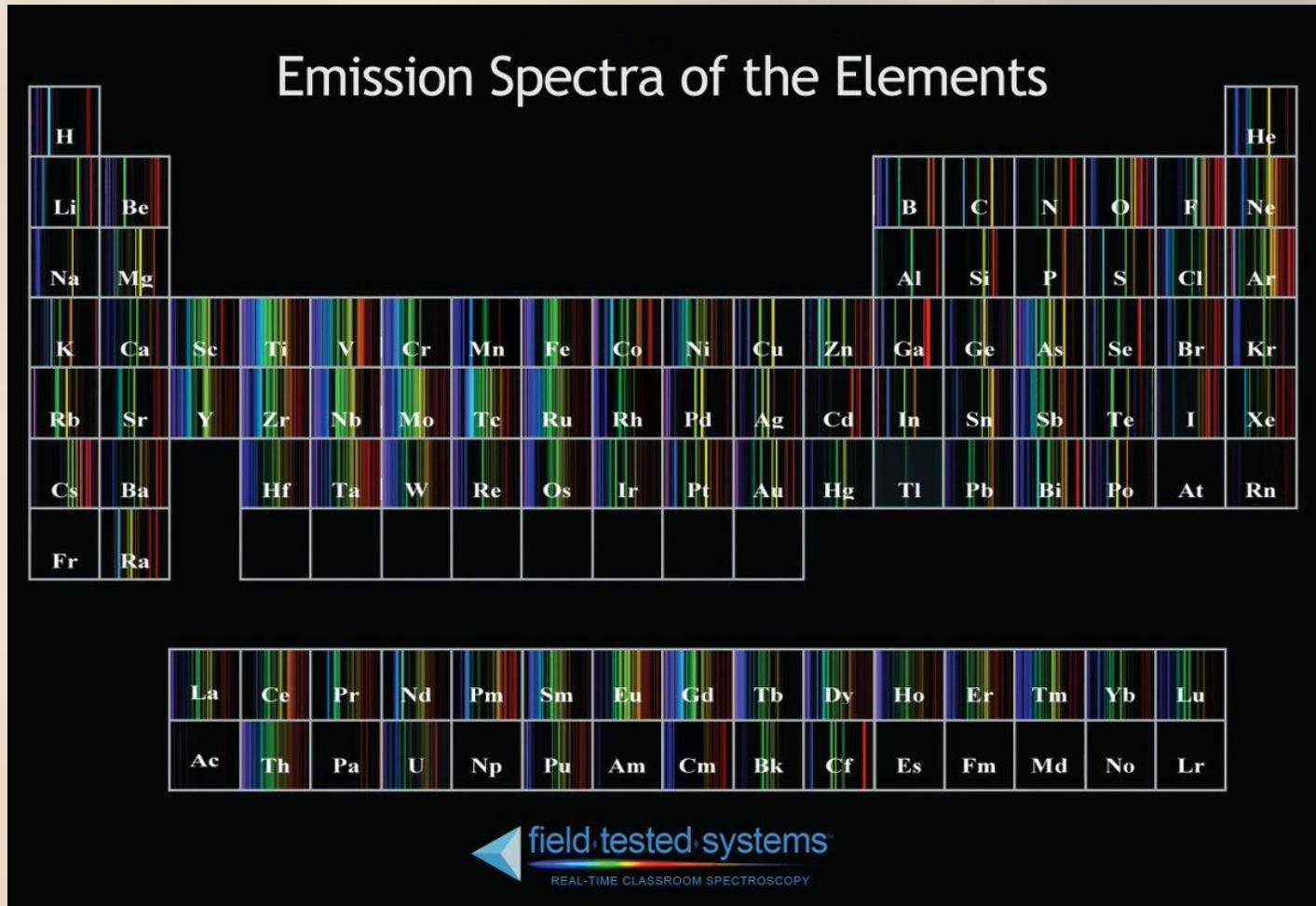


Análise Metalúrgica

- Assim como a análise fractográfica, a análise metalúrgica é essencial para compreender uma falha, pois somente com ela podemos entender quais materiais foram utilizados e como correu o tratamento térmico, dois aspectos essenciais para determinar a razão da fratura.
- Métodos principais de análise metalúrgica: espectrometria, ensaios de microdureza e análise de microestrutura.



Emissão de Espectro dos Elementos





Análise por Elementos Finitos (FEA)

- A FEA apesar de ser extremamente útil para avaliar falhas, é principalmente importante enquanto o produto é projetado pois pode ajudar a prever as falhas.
- Durante a fase de projeto, ela é extremamente importante para localizar pontos quentes, onde a tensão é maior por conta do formato e pode aumentar a chance de ter uma falha.
- Na avaliação de falhas a FEA é muito importante também por ajudar a encontrar falhas mínimas na peça que podem colaborar na causa das falhas.



Conclusões

- Com isso, é possível concluir que a análise de falhas é um processo muito mais complexo do que a aparência superficial sugere. Para se chegar a uma conclusão definitiva e confiável, é indispensável uma abordagem multidisciplinar, cruzando dados de diferentes áreas da engenharia para desvendar a verdadeira origem do problema.
- Para a prevenção de falhas os fatores essenciais são: o material, o tratamento térmico, o formato e o acabamento corretos.

Obrigado Pela Atenção



Estudo de Ruptura em Pontes de Treliça

Rafael César Oliveira Pazianoto
pazianoto.cesar@aluno.ifsp.edu.br

Raylson Rodrigues dos Santos
raylson.rodrigues@aluno.ifsp.edu.br



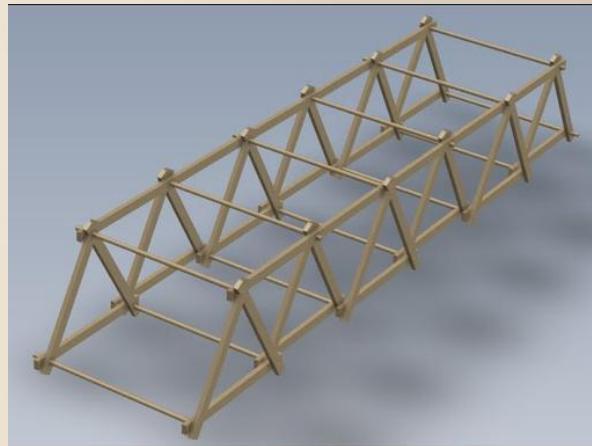
Introdução

- A O que são pontes de treliça, a física aplicada nelas, os tipos de ponte de treliça e seu funcionamento.
- A Estudo avançado do rompimento em pontes de treliça - comparação entre artigos Walbridge & Nussbaumer (2008) e Chen et al. Exemplos reais de rompimento de pontes.
- A Estudo de Esforços Cisalhantes nas Conexões de Pontes Treliçadas



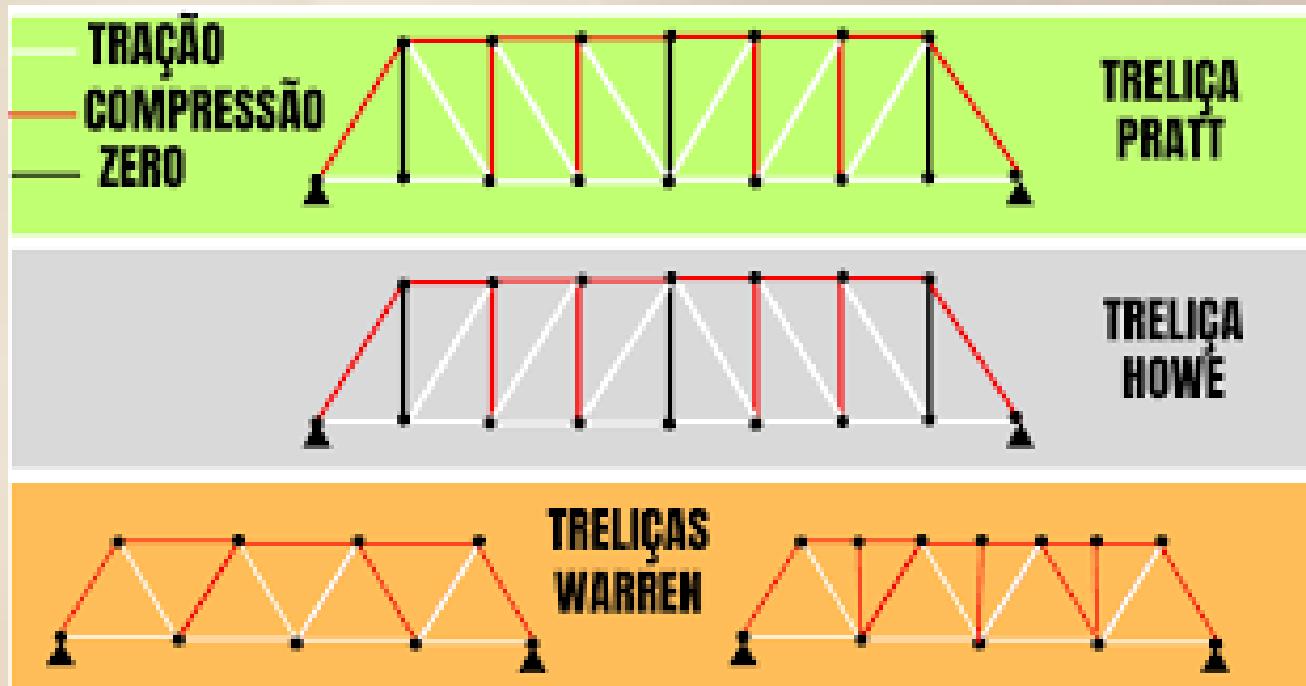
Treliças e Caminho de Cargas

- A Treliças são estruturas trianguladas em que as barras trabalham basicamente à tração ou compressão. Nas pontes treliçadas, as cargas vão do tabuleiro para nós, barras e apoios, definindo o caminho de cargas e o dimensionamento.



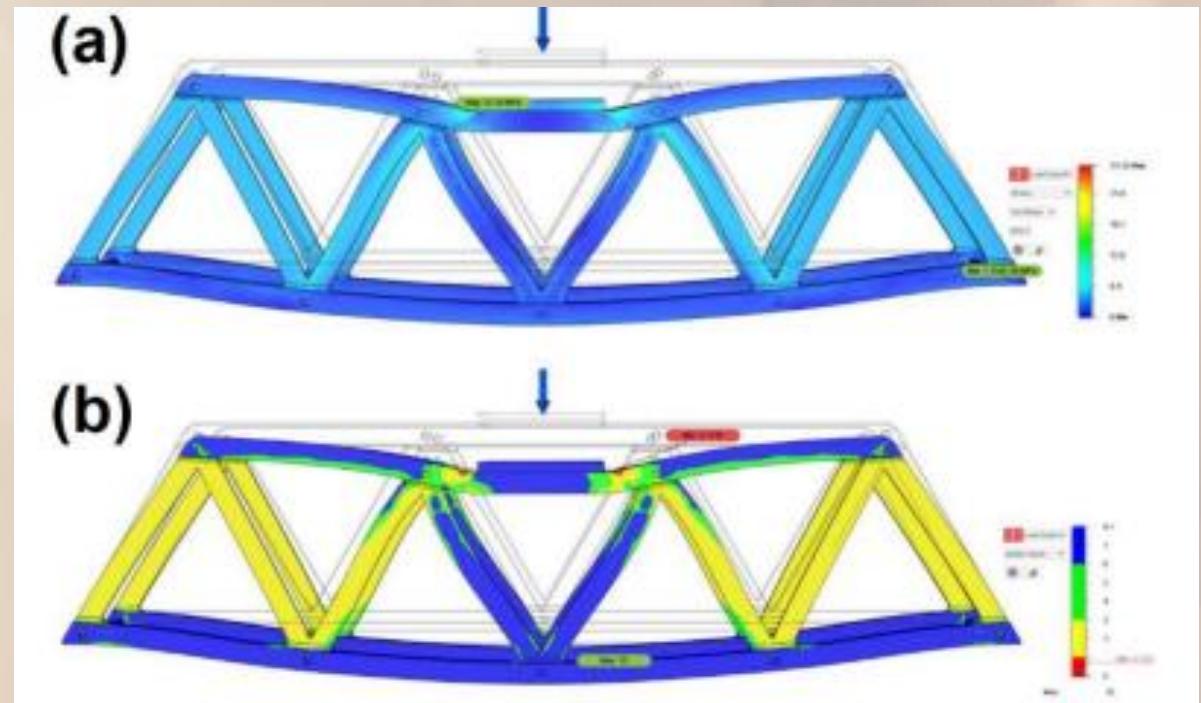
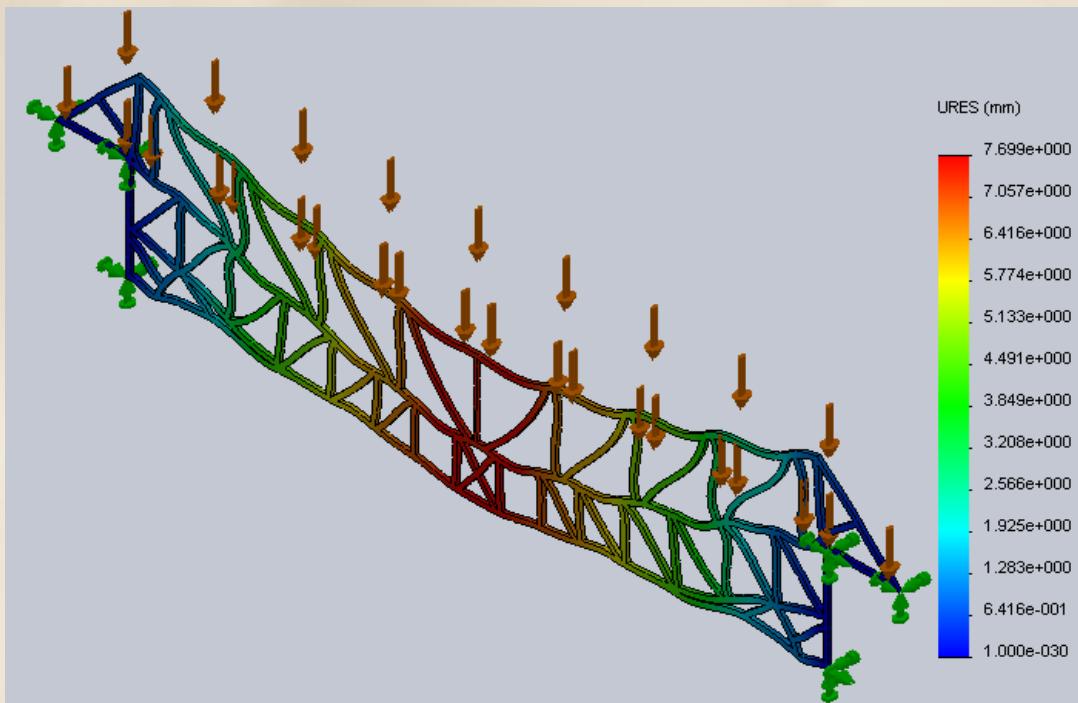
Tipos de Treliças e Mecânica Aplicada

A Treliças Pratt, Howe e Warren diferem pela disposição de diagonais e pelo tipo de esforço predominante (tração ou compressão). A análise usa conceitos de resistência dos materiais, com foco em esforços axiais nas barras e cisalhamento concentrado nas ligações.



Estabilidade e Cálculo de Esforços

A Barras comprimidas podem flambar, exigindo verificação de esbeltez e redução da carga resistente. Os esforços nas barras são obtidos por equilíbrio global e métodos como nós e seções, servindo de base para checar deformações e flechas.



Ligações e Cenários de Colapso

- Colapsos de treliças costumam começar nas ligações, por corrosão, perda de aperto ou chapas frágeis. Em estruturas pouco redundantes, a falha de uma conexão pode desencadear colapso progressivo de toda a ponte.

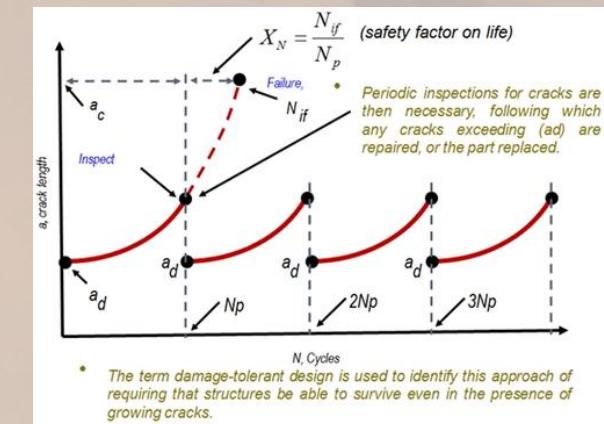
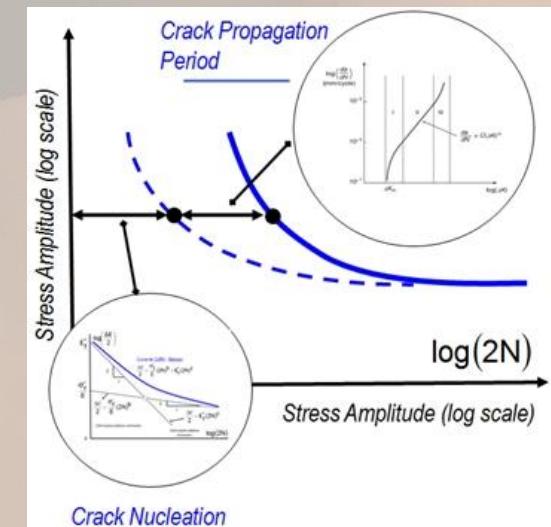




Estudo 1: Walbridge & Nussbaumer (2008)

A fadiga é o inimigo mais insidioso das estruturas metálicas, sendo responsável pela maioria das falhas em serviço. Em pontes treliçadas, o tráfego contínuo gera carregamentos cíclicos que, ao longo do tempo, causam a nucleação e a propagação de trincas em pontos de alta concentração de tensão.

A Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM) é a ferramenta essencial para analisar este risco. Ela quantifica a magnitude do campo de tensões na ponta da trinca através do Fator de Intensidade de Tensão.





Estudo 2: Chen et al. (2024)



A ruptura súbita de um membro estrutural pode desencadear o Colapso Progressivo, um efeito dominó onde a falha inicial leva à falha em cascata de toda a estrutura.



A Robustez estrutural, ligada à Redundância, é a chave para a tolerância a danos localizados, garantindo a existência de Caminhos de Carga Alternativos (ALPs).



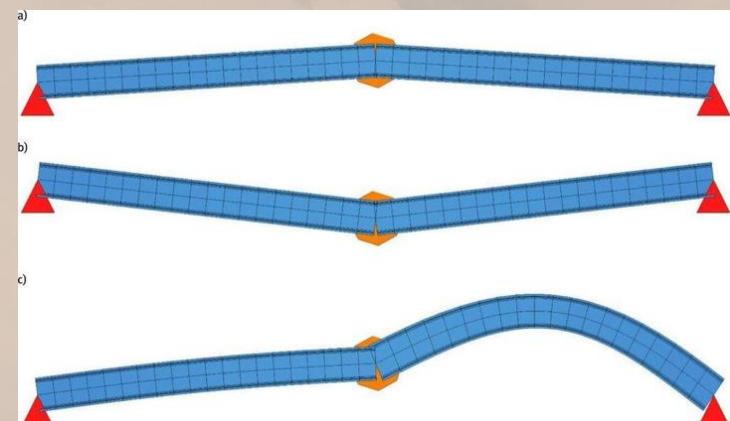
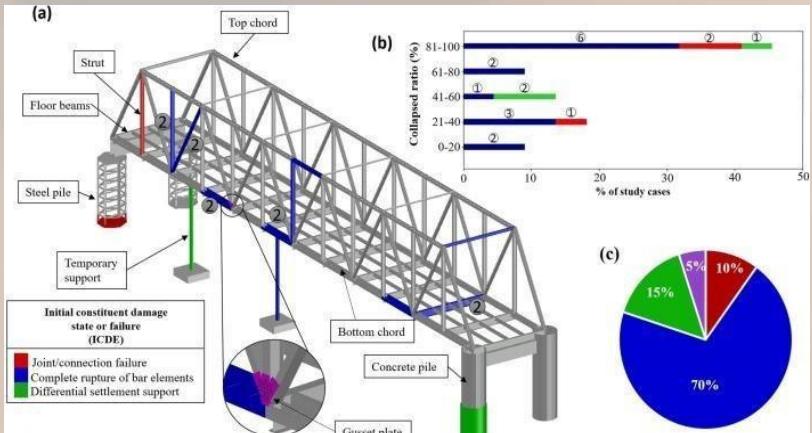
O Fator Crítico: A falha súbita é um evento dinâmico. O Fator de Amplificação Dinâmica (FAD) quantifica o impacto, podendo dobrar a tensão nos membros remanescentes (valor teórico de 2.0), exigindo que a análise vá além da estática.



Análise Avançada: A Análise Não-Linear por Método dos Elementos Finitos (MEF) é essencial para simular o comportamento real da estrutura, considerando:



1. Não-Linearidade Geométrica (ex: Flambagem).
2. Não-Linearidade do Material (regime plástico).





Exemplos

**Colapso da Ponte I-35W
(Minneapolis, 2007): A Falha na
Chapa de Ligação**



**O Desastre da Ponte de Quebec (1907):
A Flambagem do Membro de
Compressão**





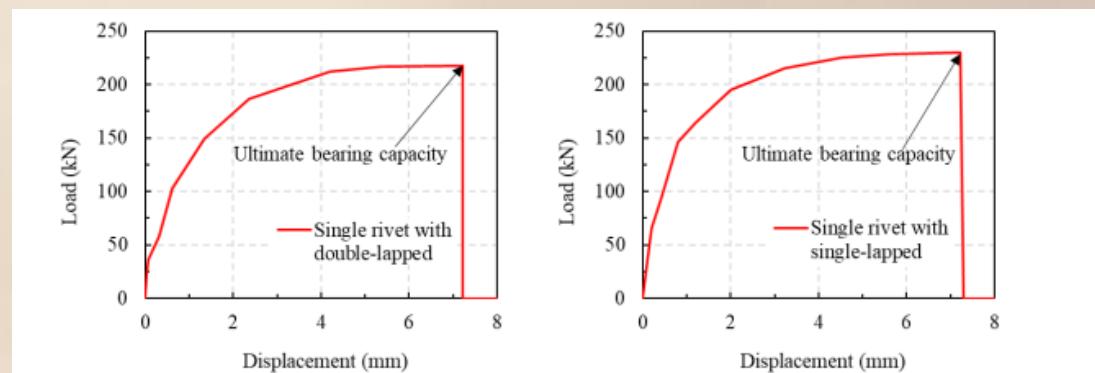
Mecanismos de Transferência de Esforços

- Conexões em pontes treliçadas são pontos críticos para segurança e durabilidade. Estudo foca no cisalhamento em ligações rebitadas e reforçadas e seu impacto na robustez global.
- Esforços passam primeiro por atrito entre chapas e depois pelo contato fuste-furo, com resposta não linear. Ensaios e MEF reproduzem rigidez e capacidade das conexões ao cisalhamento.
- Cisalhamento não se distribui de forma uniforme entre os rebites, concentrando-se nas extremidades. Deformações das chapas e baixa rigidez aumentam momentos e reduzem a capacidade da ligação.



Análise Comparativa de Metodologias

- Ensaios em escala real e modelos numéricos se complementam na compreensão do comportamento das juntas. Ambos apontam deslizamento, ovalização de furos e falhas progressivas em treliças.
- Reforços com chapas suplementares aumentam significativamente a capacidade e a ductilidade das ligações. Modos de falha migram dos rebites para os membros principais, com boa concordância numérico-experimental.
- Conexões curtas tendem a falhar por cisalhamento de rebites e esmagamento de furos; longas, por block shear. A simples adição de rebites pode transferir a falha para o rasgamento da chapa, exigindo verificação conjunta de modos.





Efeitos Dinâmicos e Colapso Progressivo

- ▶ Perda súbita de membros gera amplificação dinâmica dos esforços nas conexões. Estruturas redundantes com detalhes dúcteis conseguem suportar redistribuições e evitar colapso em cadeia.
- ▶ Projeto e reabilitação devem considerar cisalhamento, fadiga e modos frágeis com margens de segurança adequadas. Reforços e inspeções devem aumentar resistência local e redundância global, apoiados em análise numérica e monitoramento.



Conclusões

- A A análise realizada ao longo deste estudo evidencia que a segurança e a durabilidade de pontes treliçadas dependem de uma abordagem integrada que combine fundamentos de engenharia estrutural, ciência dos materiais e análise numérica avançada. Os modos de ruptura observados — fadiga, flambagem, falha em ligações e colapso progressivo — mostram que a falha raramente é resultado de um único fator, mas sim da interação entre degradação material, deficiências construtivas e ausência de redundância estrutural.
- A Conclui-se, portanto, que o estudo de ruptura em pontes de treliça não se limita à compreensão dos mecanismos de falha, mas envolve a criação de sistemas estruturais resilientes, capazes de suportar danos localizados sem perda global de estabilidade. A combinação de conhecimento teórico, validação experimental e inovação tecnológica é o caminho para garantir pontes mais seguras, duráveis e eficientes.

Obrigado Pela Atenção



Avaliação da Integridade Estrutural de Parafusos e Juntas Automotivas Submetidos a Cargas Vibratórias

Matheus Guilherme Silva Passarelli
Matheus.oassarelli@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Fixações automotivas são essenciais para segurança.
- Falhas podem causar acidentes graves.
- Parafusos trabalham sob carregamento + vibração.
- Objetivo: analisar a falha por cisalhamento.



Importância das Fixações

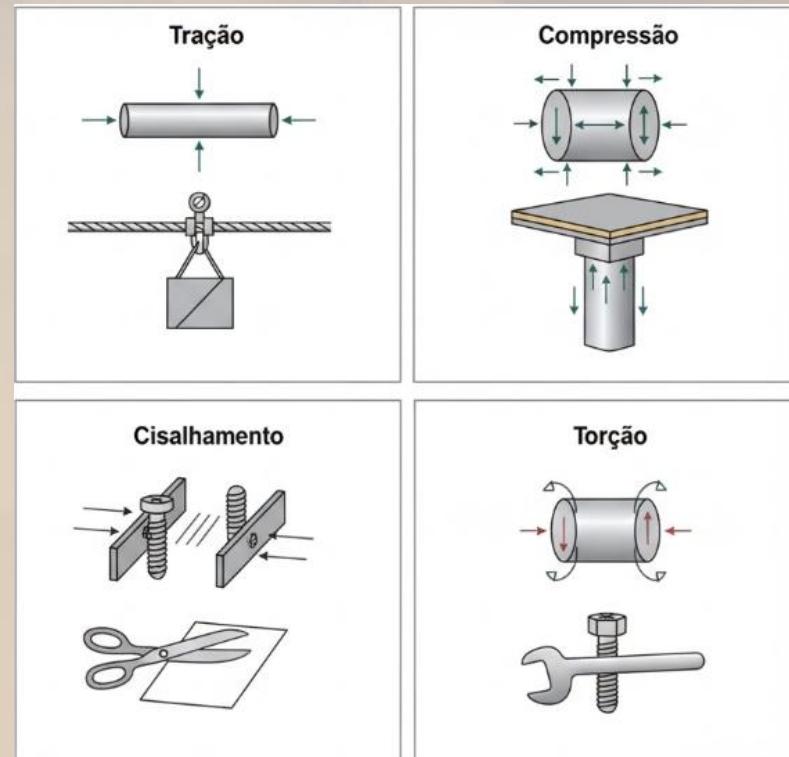
- Conectam e travam componentes estruturais.
- Estão presentes em motor, freios, suspensão, chassi.
- Um único parafuso pode evitar ou causar um acidente.





Tipos de esforços

- Tração;
- Compressão;
- Torção;
- Cisalhamento — foco do estudo.





Cisalhamento – Conceito

- Ação de força paralela ao plano da junta.
- O corte ocorre transversalmente no parafuso.
- Micro trincas evoluem até ruptura repentina.



Processo de Falha

- ▶ Microfissuras → propagação → ruptura.
- ▶ Fratura geralmente reta/perpendicular.



Aplicações Automotivas

- Suspensão;
- Freios;
- Chassi;
- Motor e transmissão;





Vibração no Veículo

- Origem: motor, pneus, pavimento.
- Tipos: livres, forçadas e ressonantes.



Efeitos nas Fixações

- Afrouxamento;
- Redistribuição de tensões;
- Fadiga acelerada;
- Risco de cisalhamento.



Normas Técnicas

-  ISO 898;
-  ISO 2320;
-  SAE J429;
-  ABNT NBR 5580;



Ensaios e Métodos

- Testes de cisalhamento;
- Mesa excitadora;
- Simulações FEA;
- Torque residual.



Estratégias de Prevenção

- Seleção de materiais;
- Tratamentos superficiais;
- Fixadores autotravantes;
- Controle de torque.



Discussão Crítica

- Redução de peso = maior sensibilidade.
- Simulação + teste real = ideal.



Conclusões

- Cisalhamento + vibração = risco.
- Normas + testes + manutenção = segurança.
-

Obrigado Pela Atenção

