

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.

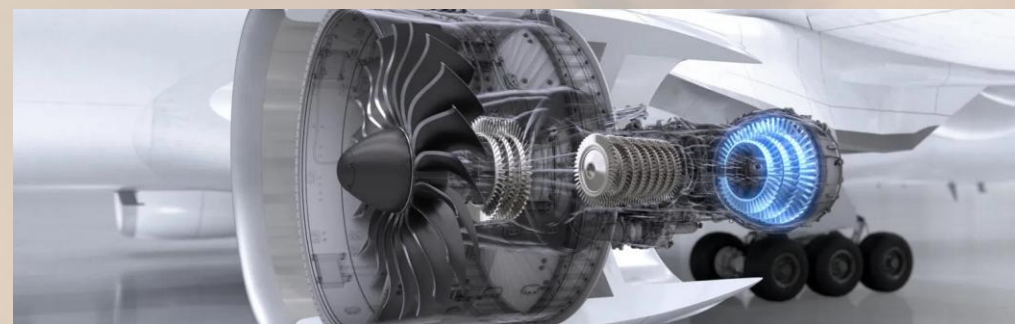


Condições Operacionais Extremas:

- ▶ 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

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.

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

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:

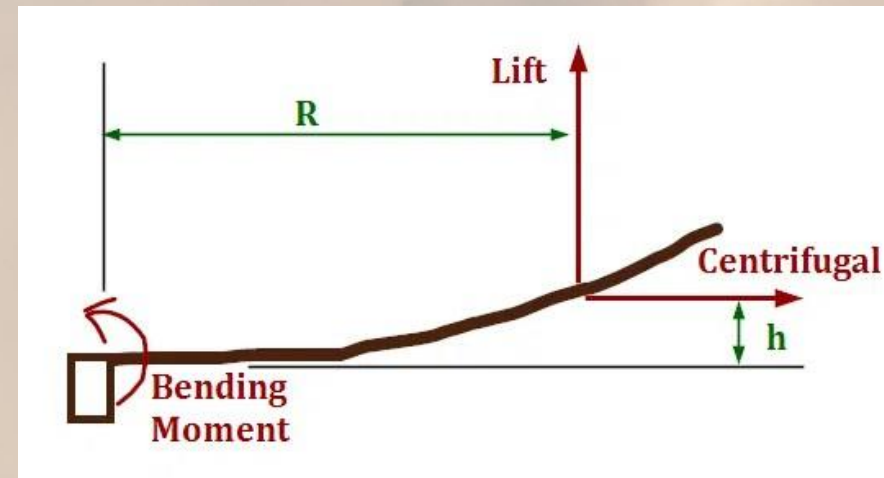
$$\sigma_{c, \max} = (\rho \omega^2 R^2) / 2$$



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

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

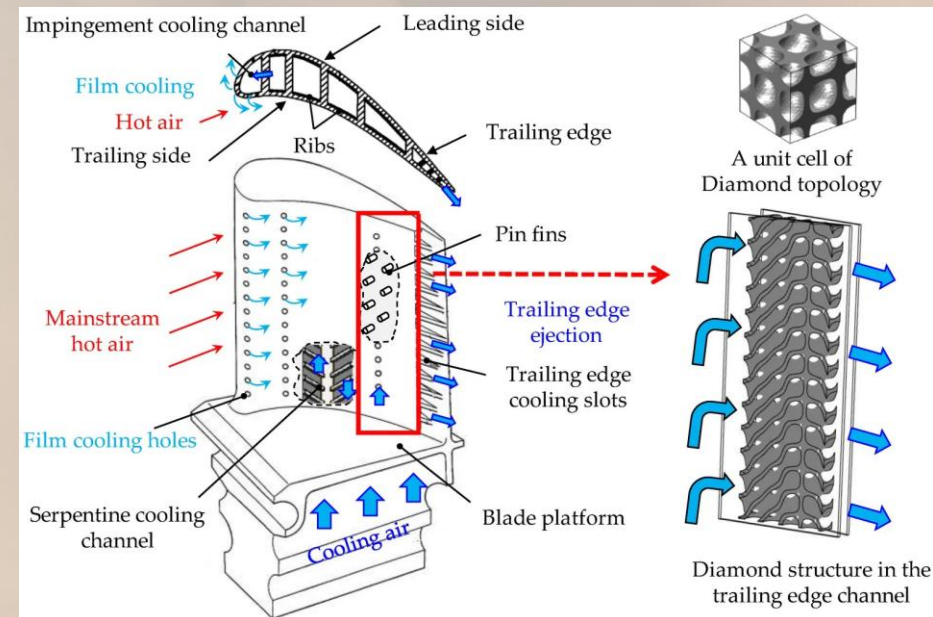
$$\sigma_{th,max} \approx E \alpha \Delta T / [2(1-\nu)]$$

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

1. Comportamento do Material

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

2. Geometria

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

3. Carregamentos

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

4. Simplificações

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

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.



Resultados Numéricos

Tensão Centrífuga Máxima (na raiz)

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

Tensão Térmica Máxima (nos bordos)

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

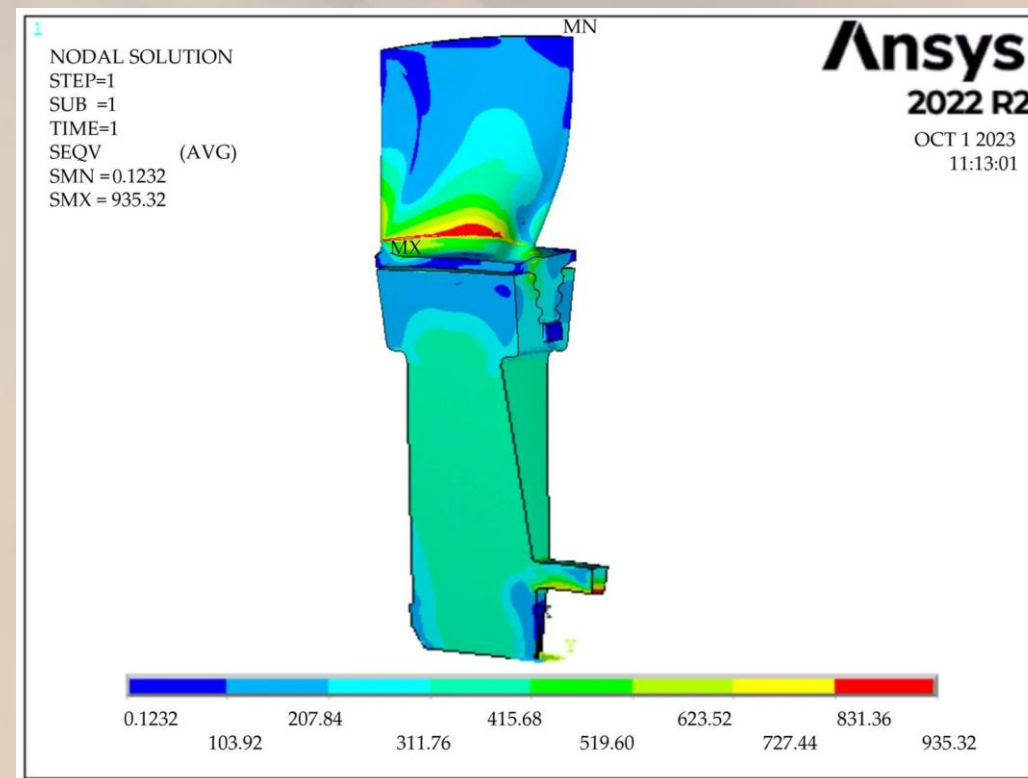
Tensão Total Máxima

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

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

Limite 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 $K_t = 2,0$:

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

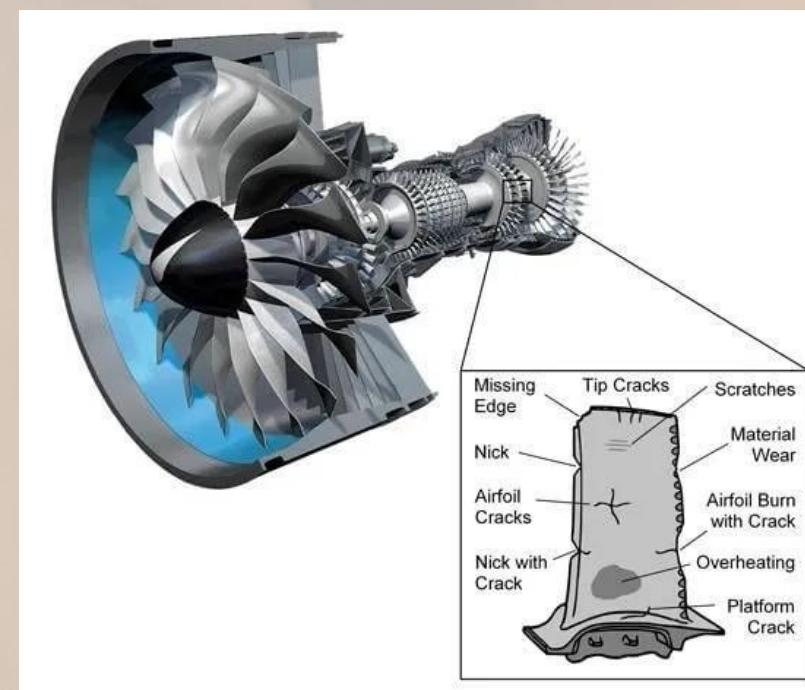
$$\sigma_{total,max,real} = 184,28 + 326,09 = 510,37 \text{ MPa}$$

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

Resultado: a fixação pá–disco é crítica.

Consideração da Fluência

A 800°C, o Inconel 718 apresenta fluência 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

