

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DO CONCENTRADOR DE TENSÃO NA VIDA EM FADIGA DE PARAFUSOS INDUSTRIAIS

André Arruda Faria Souza¹

Aristeu Correia Manso¹

Matheus Fernandes de Andrade²

matheus.andrade.univertix@gmail.com

ÁREA DO CONHECIMENTO: Engenharias

RESUMO

A falha prematura de componentes submetidos a esforços cíclicos é um dos maiores desafios na indústria, comprometendo a confiabilidade de máquinas e aumentando custos de manutenção. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso voltado à análise estrutural e à melhoria de um parafuso utilizado no alinhamento de matrizes de máquinas de estiramento de latas de alumínio. O componente em questão possui um canal destinado à instalação de anel de vedação (*O-ring*), região que se mostrou crítica por atuar como concentrador de tensões, favorecendo a nucleação e propagação de trincas por fadiga. A investigação foi conduzida a partir de uma análise fractográfica inicial, na qual foi possível identificar falhas recorrentes na área do entalhe. Em seguida, realizou-se o dimensionamento do componente e a modelagem tridimensional no software *SolidWorks*, possibilitando a aplicação de simulações por Método dos Elementos Finitos (MEF), tanto em regime estático quanto dinâmico (fadiga). Sendo assim, foram comparados dois cenários: o parafuso com canal para o *O-ring* e outro sem a presença dessa descontinuidade geométrica. Os resultados demonstraram que o entalhe reduziu em aproximadamente 47% a vida útil do componente, confirmando sua influência como ponto de fragilidade estrutural. Já a simulação com a geometria otimizada (sem o canal) apresentou maior resistência à fadiga, sem comprometer a funcionalidade do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Fadiga; FEM (método de elementos finitos); Concentrador de tensão; Desempenho estrutural.

1 INTRODUÇÃO

A resistência mecânica e a durabilidade dos componentes utilizados em máquinas industriais são essenciais para garantir a eficiência operacional e reduzir custos com manutenção. Os parafusos, por sua vez, desempenham papel fundamental na fixação e no funcionamento dessas máquinas, sendo submetidos a exercícios repetitivos que podem levar à fadiga do material ao longo do tempo (Shigley, 2005; Mischke, 2005).

¹ Acadêmicos do curso de engenharia mecânica da Faculdade Vértix Trirriense - Univértix.

² Engenheiro Mecânico. Mestre em Engenharia Química, de Materiais e Processos Ambientais. Professor do curso de Engenharia mecânica da Faculdade Vértix Trirriense - Univértix.

No setor de embalagens metálicas, máquinas que realizam o estiramento de latas de alumínio devem ter componentes confiáveis para garantir a qualidade do produto. Uma das principais dificuldades enfrentadas é a falha prematura dos parafusos usados na fixação ou ajuste das peças móveis. Essas falhas geralmente estão relacionadas às concentrações de tensão geradas em regiões específicas do componente, especialmente onde há alterações geométricas ou redução no diâmetro (Callister, 2016).

Este trabalho foca na análise estrutural de um parafuso que apresenta uma região com um canal destinado à instalação de um anel de vedação. Esse canal é uma área vulnerável durante o funcionamento da máquina. Através da aplicação do método de elementos finitos (MEF), busca-se compreender como essa geometria influencia na distribuição das tensões e avaliar possíveis melhorias no projeto.

A utilização de simulações permite prever comportamentos sob diferentes condições operacionais antes mesmo da implementação física das mudanças, facilitando decisões embasadas em dados concretos (Martin, 2025). Assim, este estudo visa contribuir para o aprimoramento do projeto desses componentes, promovendo maior resistência à fadiga e maior vida útil dos parafusos utilizados em ambientes industriais exigentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Parafusos e Modos de Falha

Parafusos são elementos de fixação, que consiste em um corpo cilíndrico, composto pela rosca e o fuste, além da cabeça do parafuso que pode variar sua geometria a depender do projeto, são muito utilizados em sistemas estruturais e mecânicos. Pela à sua função, eles serão frequentemente expostos a tensões cíclicas, vibrações e cargas variáveis. Uma das regiões mais críticas é a da rosca e do fuste, pois concentram tensões e podem ser o estopim de falhas por fadiga (Shigley, 2005; Mischke, 2005). Além disso, falhas podem ocorrer devido a aperto inadequado, materiais com baixa resistência à fadiga ou falhas de projeto. Alguns sinais característicos de falhas que são ocasionadas por fadiga são as chamadas “linhas de praia” (*beach marks*) e regiões de fratura frágil (Callister, 2016).

2.2 Concentrador de tensões

Em um componente mecânico, como um parafuso, podem atuar diversos tipos de tensões (axial, cortante, flexão e torção). Tal componente, na maioria dos casos, apresenta descontinuidades geométricas como entalhes, furos, roscas e diferenças de seção, resultando em concentradores de tensão (Shigley, 2005; Mischke, 2005). Os chamados concentradores de tensão são regiões em elementos de máquinas e componentes mecânicos nas quais as tensões locais nessa região são amplificadas, ou seja, alteram a distribuição uniforme da tensão, provocando um acúmulo de esforço que pode levar ao começo de falhas por fadiga ou até à ruptura frágil em condições críticas. (Norton, 2013).

O fator de concentração de tensões (K_t) é um valor adimensional que representa o quanto a tensão real numa descontinuidade excede a tensão nominal. Segundo Shigley (2014), a fórmula utilizada para cálculo de concentrador de tensão em entalhes semicirculares está representada na Equação 1.

$$K_t = 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1)$$

Sendo a , a profundidade do entalhe, e ρ , o raio da raiz do entalhe.

2.3 Fadiga

Quando uma estrutura, um elemento de máquina, ou até um componente está exposto a tensões dinâmicas e variáveis, mesmo que a intensidade de tais tensões sejam consideravelmente inferiores ao limite de escoamento do material ou ao limite de resistência a tração relativo a cargas estáticas, o material pode sofrer uma fratura chamada de falha de fadiga, sua imprevisibilidade torna-a um grande empecilho no plano de manutenções (Callister, 2016).

A falha por fadiga ocorre geralmente em três etapas principais: Nucleação, a trinca se inicia, normalmente em superfícies que têm defeitos ou descontinuidades. Em seguida, ocorre a etapa de crescimento estável e, por fim, crescimento instável da trinca, resultando na fratura final do componente (Andrade, 2022). Para dimensionamento da vida em fadiga, são utilizadas diferentes metodologias, a mais comum é a metodologia S-N, que correlaciona a amplitude de tensão (no eixo vertical, em MPa) com o número de ciclos até a falha (no eixo horizontal) (Dieter, 2001).

2.5 Simulação por Métodos dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (FEM) é uma técnica numérica que vem sendo cada vez mais usada na engenharia mecânica para analisar como diferentes estruturas se comportam sob cargas variadas. Basicamente, ele divide a peça em pequenos elementos conectados, e calcula como cada parte reage, visando entender onde ocorrem as maiores tensões e deformações (Moaveni, 2015).

Além de analisar a distribuição de tensões, o método dos elementos finitos também é essencial para estudar o comportamento do componente sob esforços cíclicos, como a fadiga (Alshoaibi, 2024; Fageehi, 2024).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse estudo de caso, seguiu a seguinte sequência: Inicialmente, foi feita uma análise de contorno para entender as condições em que o parafuso trabalha. Em seguida, foi realizada uma análise de falha e, por fim, partiu-se para as etapas de dimensionamento do componente e simulações estáticas e dinâmicas (fadiga) para avaliar as tensões atuantes no componente, influência do concentrador de tensão e vida útil do parafuso. Estas etapas estão descritas a seguir.

3.1 Análise de contorno

A investigação se concentra em um parafuso utilizado em uma máquina que realiza o estiramento de latas de alumínio. No total são seis parafusos (Figura 1a), responsáveis pelo alinhamento da matriz da máquina. Na ponta de cada parafuso, uma cunha se encaixa, oferecendo o apoio direto à matriz. No entanto, a forma como esses parafusos se integra à estrutura da máquina é parte crucial do problema: eles são rosqueados por baixo em outros parafusos com rosca interna, que por sua vez se fixam em um bloco, e esse bloco, finalmente, é montado na própria estrutura da máquina. Como os parafusos ficam em um meio lubrificado, a sua geometria comporta um rasgo destinado a um anel *O-ring* (Figura 1b), que será detalhada no tópico 3.3.

Além disso, observou-se que a máquina opera a 350 ciclos por minuto, gerando uma vibração intensa em toda cadeia de fixação.

Figura 1 - Posicionamento do parafuso na máquina. a) Conjunto dos seis parafusos; b) Detalhamento do parafuso com *O-ring*.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Análise de falha

Durante a análise fractográfica, observou-se que a falha ocorreu na região do canal do *O-ring* (concentrador de tensão existente devido a geometria do componente), conforme (Figura 2). Alguns indícios presentes na superfície de fratura indicam falha por fadiga, justificando a vibração constante da máquina como principal precursor.

Figura 2 - Parafuso fraturado.



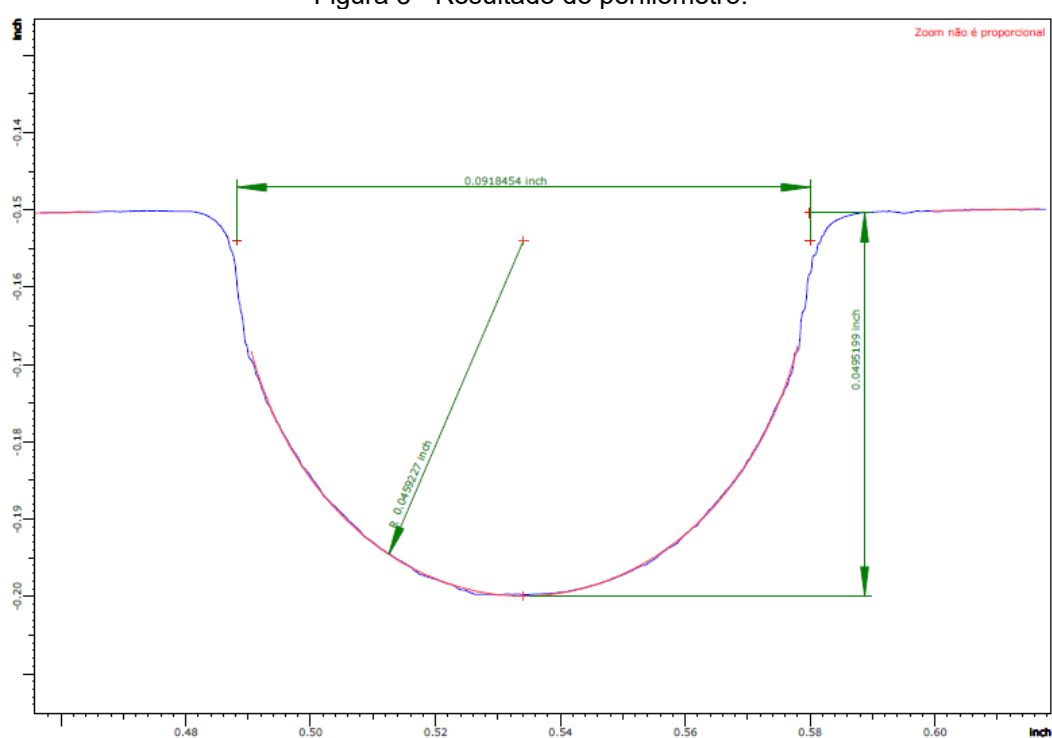
Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme a análise de contorno e execução da análise de falha, observou-se que o parafuso foi submetido a tensões cíclicas e falhou por fadiga. Tendo como base estes requisitos, partiu-se para as etapas de dimensionamento e simulação.

3.3 Conferência do parafuso e cálculo do concentrador de tensão

As medidas reais do parafuso foram inspecionadas, e a região do rasgo do anel O-ring foi aferida utilizando perfilômetro, conforme Figura 3.

Figura 3 - Resultado do perfilômetro.



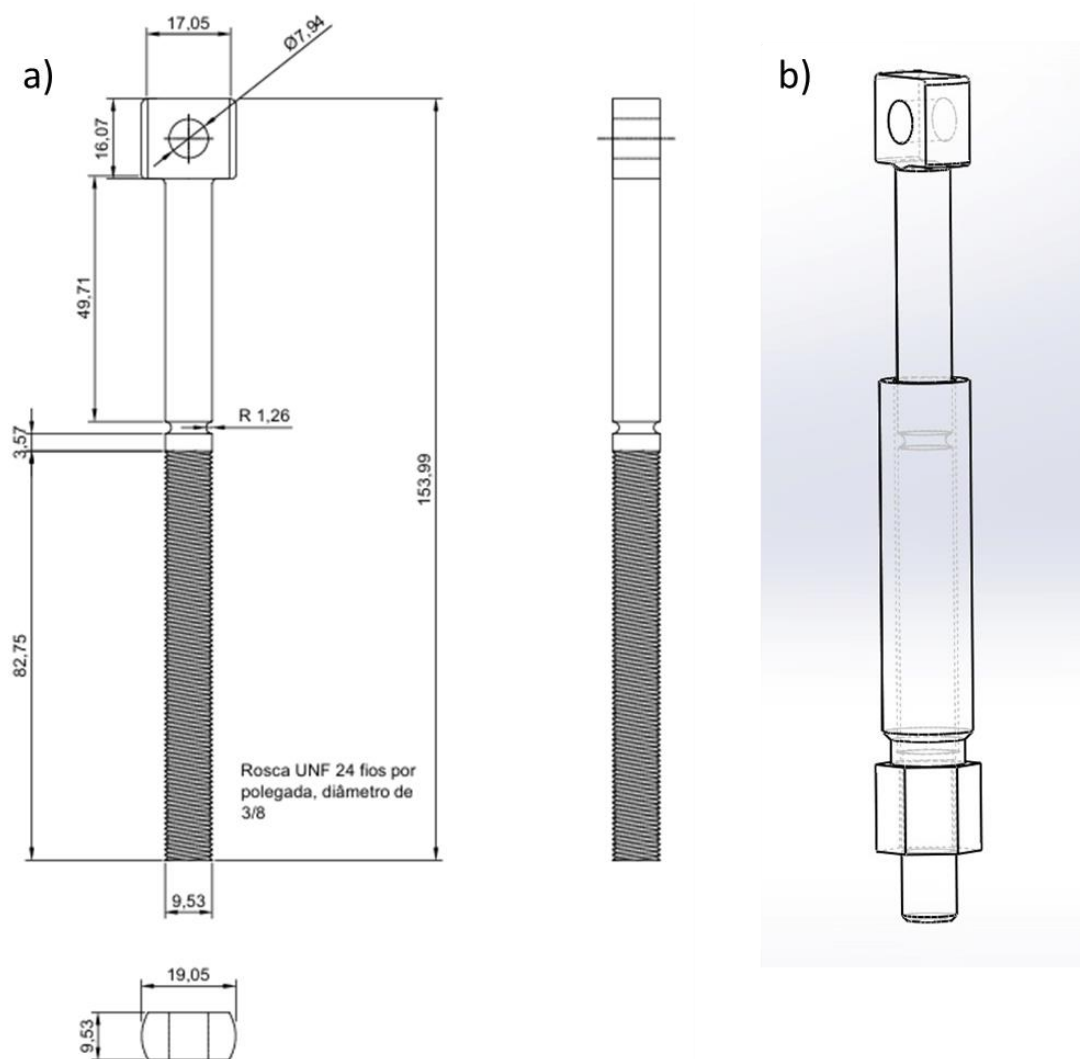
Fonte: Elaborado pelos autores

Com base nas dimensões apresentadas na Figura 3, o concentrador de tensão foi calculado sendo equivalente a 2,07.

3.4 Dimensionamento do componente

O desenho em 2D do parafuso foi realizado utilizando o *software* AutoCad. Em seguida, o desenho 3D foi elaborado utilizando o *software* SolidWorks, detalhando a união do parafuso de alinhamento com o parafuso de fixação do bloco com rosca interna. A Figura 4 apresenta as representações do componente com suas respectivas medidas.

Figura 4 - Desenho do parafuso. a) Representação 2D; b) Representação 3D



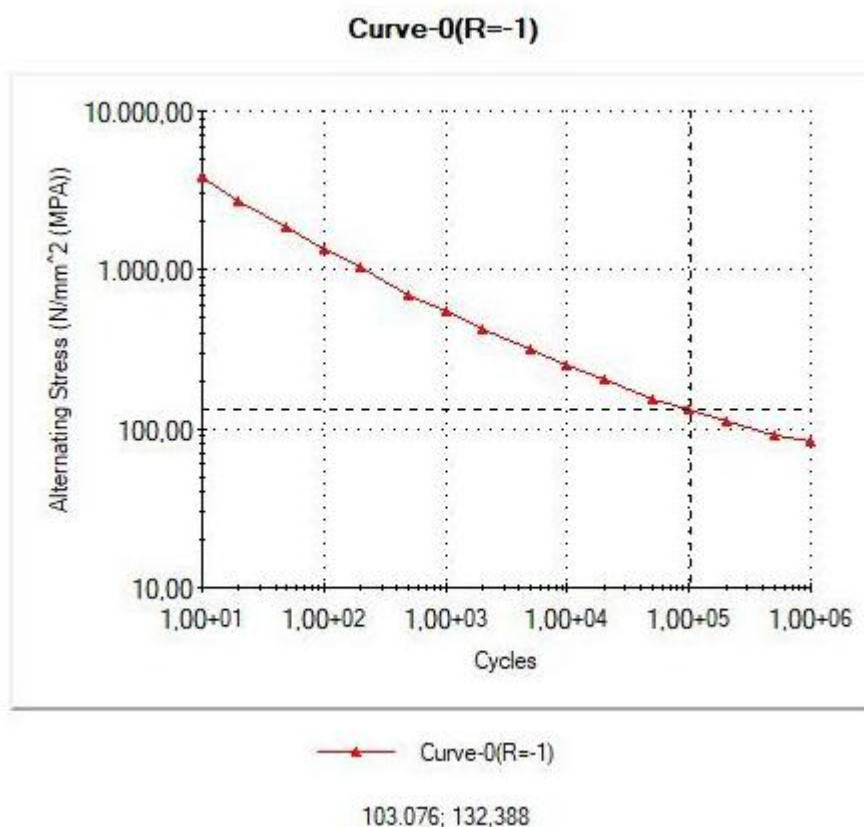
Fonte: Elaborado pelos autores

3.5 Simulação via MEF

No caso do parafuso estudado aqui, o FEM foi fundamental para simular seu desempenho estrutural, seguindo também as especificações da norma ABNT NBR 12108. Foram realizadas simulações estáticas e dinâmicas (fadiga), utilizando o módulo *simulation* do *software* SolidWorks. Para a simulação por fadiga foram consideradas duas condições, primeiro simulando o parafuso com o concentrador de tensão (rasgo do *O-ring*) e em seguida sem o concentrador de tensão, com o número alvo de ciclos equivalente a 10^6 e razão de carregamento igual a -1 ($R = -1$).

Como não era conhecido o material de fabricação do parafuso, foi selecionado o aço inoxidável 316L como proposto deste estudo. A curva SN, de acordo com base de dados do *software*, está apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Curva S-N do aço inoxidável 316L.

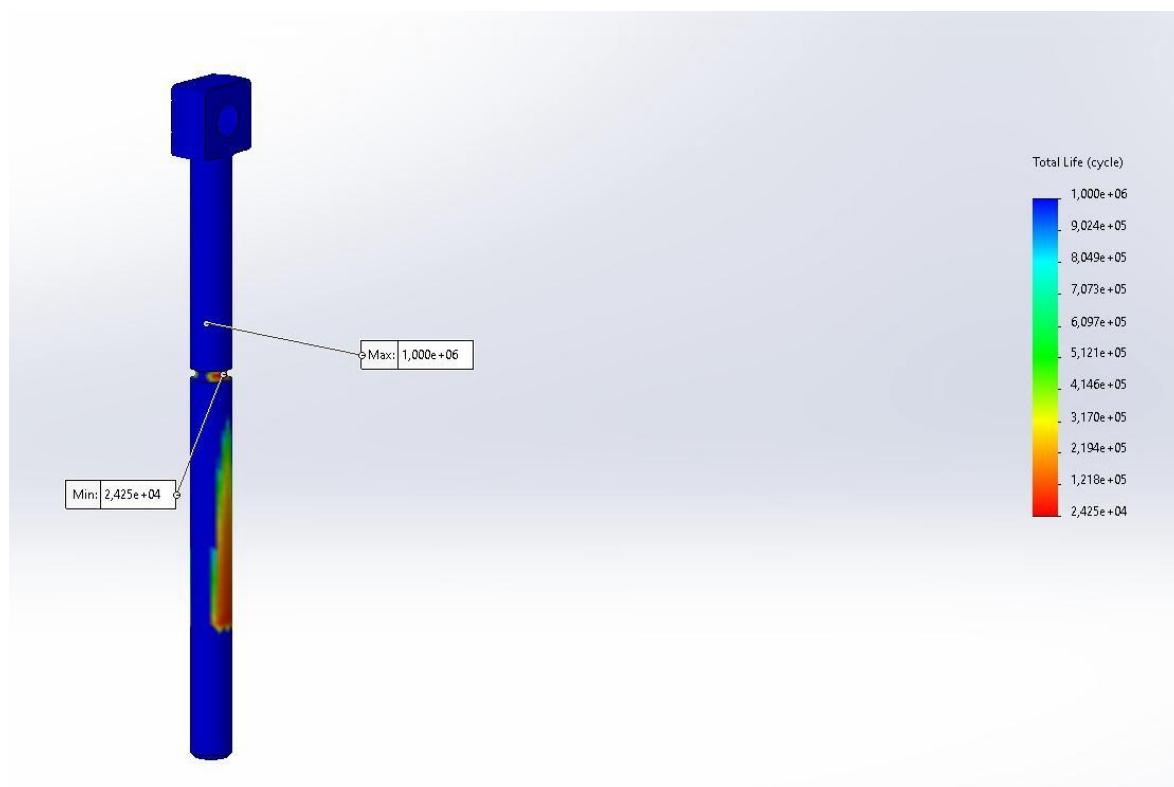


Fonte: Elaborado pelos autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados da simulação do parafuso com e sem o concentrador de tensão. A escala em cores representa o número de ciclos para falha, onde regiões em vermelho representa pontos críticos do componente (menor vida útil).

Figura 6 - Resultado no parafuso com o canal do O-ring.



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7 - Resultados do parafuso sem concentrador de tensão.



Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados das simulações indicaram pontos críticos que atuam como concentrador de tensão na geometria do componente. O parafuso com o rasgo do anel *O-ring* (Figura 6) apresenta um número de ciclos para falha equivalente a $2,42 \times 10^4$ ciclos, sendo sua região crítica o centro do entalhe, justificando a influência do concentrador de tensão gerado devido a geometria. Já o componente sem o entalhe, apresentou um número de ciclos para a falha de aproximadamente $5,17 \times 10^4$ ciclos, sendo seu ponto crítico a região de união entre o parafuso e o parafuso com rosca interna citado na etapa de dimensionamento do parafuso. Sendo assim, nota-se que a presença do entalhe atuando como concentrador de tensão, reduziu em aproximadamente 47% da vida útil do componente.

Além disso, observou-se que a alteração na geometria não comprometeu a funcionalidade do componente, mantendo sua integridade estrutural sob as condições simuladas. Esses resultados reforçam a importância do dimensionamento adequado e da otimização periódica na prevenção de falhas por fadiga.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que pequenas modificações na geometria dos componentes podem ter um impacto significativo na resistência à fadiga. Uma análise por elementos finitos revelou que o canal destinado ao anel de vedação atua como um concentrador de tensão, aumentando o risco de falhas prematuras no parafuso.

A remoção desse canal mostrou-se uma estratégia eficaz para potencializar a durabilidade do componente. Essas sugestões sugerem que melhorias no projeto podem contribuir para maior confiabilidade e menor custo operacional em máquinas industriais que operam sob esforços cíclicos intensos.

Por fim, ressalta-se a importância da utilização contínua de ferramentas como simulações por Método dos Elementos Finitos no processo de desenvolvimento e otimização de componentes mecânicos, garantindo maior segurança e eficiência nas aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

ALSHOAIBI, Abdulnaser M.; FAGEEHI, Yahya Ali. **Advances in finite element modeling of fatigue crack propagation**. *Applied Sciences*, v. 14, n. 20, p. 9297, 12 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app14209297>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ANDRADE, Matheus Fernandes de. **Avaliação da super longa vida em fadiga do aço inoxidável AISI 316L processado por manufatura aditiva L-DED**. 2022. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.pucrio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=61128&idi=1>. Acesso em: 20 ago. 2025.

CALLISTER, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MARTIN, Dave. **Simulation: The process of analyzing CAD models to validate design performance without physical prototypes**. PTC Blog, s.l., 2025. Disponível em: <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/simulation-101-what-is-it-and-how-can-it-benefit-you>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MOAVENI, Saeed. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. 4. ed. Boston: Pearson, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.