FADIGA · CURVA S-N · LIMITE DE FADIGA · GOODMAN · CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES · DOCUMENTO DE REFERÊNCIA · PÚBLICO

Projeto contra fadiga

Projeto contra a falha por carregamento cíclico — a curva S-N e o limite de fadiga, os fatores de Marin que o reduzem, a correção da tensão média (Goodman) e os entalhes onde as trincas realmente começam.

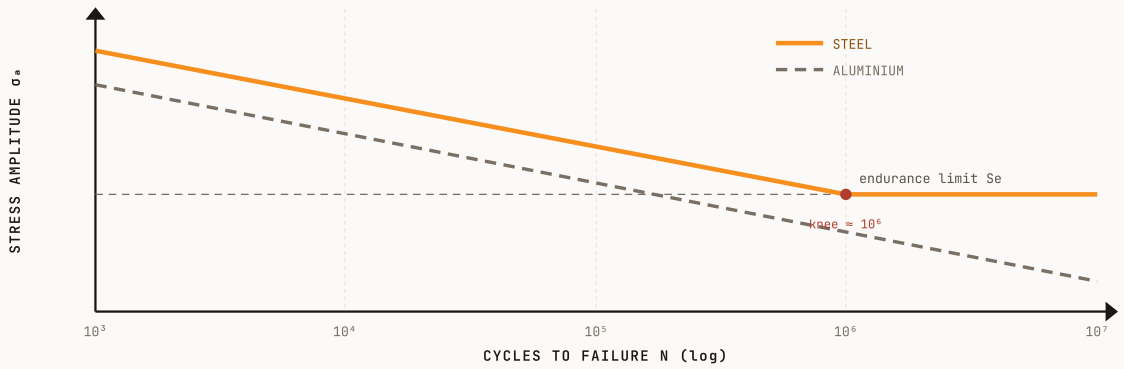
REVISÃO	PUBLICADO	RESPONSÁVEL	COMPLEMENTO
1.0	June 2026	Engenharia Ideambox	Referência em PDF

RESUMO

A maioria das peças mecânicas que quebram em serviço quebra por fadiga — trincas sob tensão cíclica bem abaixo da resistência estática. A fadiga é governada pela *amplitude* de tensão (e pela tensão média), nasce em concentradores de tensão e é extremamente sensível ao acabamento superficial. Este guia apresenta o fluxo de projeto para fadiga de alto ciclo.

A Seção 1 explica o que é fadiga. A Seção 2 trata da curva S-N e do limite de fadiga. A Seção 3 apresenta os fatores de Marin, que reduzem o limite de fadiga de laboratório a um valor real. A Seção 4 trata da correção da tensão média (Goodman / Gerber / Soderberg). A Seção 5 aborda concentração de tensões e sensibilidade ao entalhe. A Seção 6 traz regras de projeto e um checklist.

S-N (WÖHLER) CURVE — STRESS AMPLITUDE VS. LIFE



A CURVA S-N. OS AÇOS APRESENTAM UM LIMITE DE FADIGA — UMA TENSÃO ABAIXO DA QUAL OPERAM INDEFINIDAMENTE; O ALUMÍNIO E A MAIORIA DAS LIGAS NÃO FERROSAS CONTINUAM EM DECLIVE, POR ISSO SÃO ESPECIFICADOS PARA UM NÚMERO FINITO DE CICLOS. SUPERFÍCIE, TAMANHO E ENTALHES REDUZEM O LIMITE REAL.

SUMÁRIO

1. O que é fadiga
2. A curva S-N e o limite de fadiga
3. Fatores modificadores do limite de fadiga (fatores de Marin)
4. Correção da tensão média
5. Concentração de tensões e entalhes
6. Regras de projeto e checklist

1. O que é fadiga

Uma peça carregada repetidamente pode trincar e falhar com uma tensão muito abaixo do seu limite de escoamento. A trinca se inicia em um concentrador de tensão, cresce um pouco a cada ciclo e, por fim, a seção remanescente fratura de forma súbita. O fator determinante é a **tensão alternada**, modificada pela **tensão média**.

1.1 Termos

`Amplitude de tensão` σ_a	Metade da faixa de tensão — (σ_max − σ_min)/2 — o principal fator da fadiga
`Tensão média` σ_m	(σ_max + σ_min)/2 — uma tensão média de tração reduz a vida
`Razão de tensões R`	σ_min / σ_max (R = −1 totalmente alternada, R = 0 repetida)
`Limite de fadiga Se`	Amplitude de tensão que um aço suporta indefinidamente (>10^6–10^7 ciclos)
`Curva S-N`	Amplitude de tensão versus ciclos até a falha (log-log), obtida em ensaios de viga rotativa
`Kt / Kf`	Fator geométrico / fator de fadiga de concentração de tensões em um entalhe

A fadiga de alto ciclo (>10^3 ciclos, regime elástico) é tratada com o método S-N / limite de fadiga descrito abaixo. A fadiga plástica de baixíssimo ciclo exige métodos de deformação-vida (fora do escopo deste guia).

2. A curva S-N e o limite de fadiga

Plotar a amplitude de tensão contra os ciclos até a falha resulta na curva S-N (de Wöhler):

- Os **aços** têm um **limite de fadiga**
  um joelho perto de 10^6 ciclos abaixo do qual a vida é, na prática, infinita. A estimativa de laboratório é `Se' ≈ 0.5 · Sut` (limitada a ~700 MPa para Sut > ~1400 MPa).

- O **alumínio e a maioria das ligas não ferrosas não têm um limite de fadiga verdadeiro**
  a curva continua em declive, por isso são especificados para uma vida finita (por exemplo, resistência à fadiga a $5×10^8$ ciclos).

- A região de vida finita entre ~10^3 e 10^6 ciclos é aproximadamente log-linear; interpole nela para uma vida-alvo.

`Se'` corresponde a um corpo de prova polido de laboratório. A peça real é sempre mais fraca — é para isso que servem os fatores de Marin.

3. Fatores modificadores do limite de fadiga (fatores de Marin)

Reduza o limite de laboratório a um valor de projeto: `Se = ka · kb · kc · kd · ke · Se'`.

FATOR	CONSIDERA	VALOR TÍPICO
ka — superfície	acabamento (as trincas começam na superfície)	retificado ~0.9, usinado ~0.7–0.8, laminado a quente ~0.5–0.7, bruto de forjamento ~0.3–0.5
kb — tamanho	seções maiores falham antes (flexão/torção)	~1.0 (d ≤ 8 mm) até ~0.75 (grandes); axial = 1.0
kc — tipo de carga	flexão vs axial vs torção	flexão 1.0, axial 0.85, torção 0.59
kd — temperatura	variação da resistência com a temperatura	~1.0 perto da temperatura ambiente
ke — confiabilidade	dispersão para maior % de sobrevivência	`50% 1.00, 90% 0.90, 99% 0.81, 99.9% 0.75`

O acabamento superficial (ka) costuma ser a maior redução isolada — uma superfície forjada ou corroída pode reduzir o limite de fadiga à metade. Por isso as peças críticas à fadiga são retificadas, polidas ou jateadas com granalha (shot peening). O fator de superfície padrão é `ka = a · Sut^b` (a, b conforme o acabamento; Sut em MPa).

4. Correção da tensão média

Uma tensão média de tração reduz a amplitude admissível. Combine σ_a e σ_m com um dos critérios:

CRITÉRIO	EQUAÇÃO	USO
Goodman (modificado)	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sut = 1/n$	Padrão para materiais pouco dúcteis / projeto conservador
Gerber	$\sigma_a/Se + (\sigma_m/Sut)^2 = 1/n$	Aços dúcteis, menos conservador (ajusta-se aos dados)
Soderberg	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sy = 1/n$	O mais conservador; protege também contra o escoamento

Aqui **n** é o coeficiente de segurança à fadiga. Goodman é o critério padrão usual. Verifique sempre também o escoamento estático na tensão de pico ($\sigma_max \leq Sy/n$).

5. Concentração de tensões e entalhes

As trincas de fadiga começam em **concentradores de tensão** — raios de concordância, furos, rasgos de chaveta, roscas, ressaltos, marcas de ferramenta. O fator geométrico **Kt** multiplica a tensão nominal; o efeito *em fadiga* é `Kf = 1 + q(Kt - 1)`, onde **q** (sensibilidade ao entalhe, 0–1) aumenta com a resistência do material e com o raio do entalhe.

- Aplique Kf à tensão
  alternada
  (e frequentemente à média) na verificação de Goodman.

- Um **raio de concordância** generoso é a melhoria de fadiga mais barata
  cantos internos vivos são fábricas de trincas.

- **Roscas, rasgos de chaveta e bordas de ajustes prensados são locais clássicos de iniciação**
  mantenha-os fora das regiões de maior tensão ou detalhe-os com cuidado (roscas laminadas, raios de alívio).

6. Regras de projeto e checklist

- **Arredonde todo canto interno**
  maximize os raios de concordância em ressaltos e mudanças de seção.

- **Melhore a superfície** onde a tensão é alta
  acabamento fino e shot peening / roleteamento para induzir tensão residual de compressão (eleva sensivelmente a resistência à fadiga).

- **Evite sobrepor concentradores de tensão**
  não coloque um furo em um raio de concordância em zona de alta tensão.

- **Mantenha a tensão média baixa**
  pré-carga, compressão residual e carregamento simétrico ajudam.

- **Use o detalhe correto em soldas**
  os pés de solda são entalhes severos; esmerilhe/martele os pés e use detalhes de junta classificados para fadiga.

- **Checklist de projeto:** determine σ_a e σ_m na seção crítica → aplique Kf → estime Se = ka·kb·kc·kd·ke·Se′ → aplique Goodman para obter n à fadiga → verifique o escoamento estático em σ_max → se a margem for pequena, ataque primeiro o acabamento superficial, os raios de concordância e a tensão residual.

Use em conjunto com as ferramentas Ideambox de molas e de uniões parafusadas, cujos coeficientes de fadiga aplicam exatamente este método de Goodman.

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/pt/downloads/fatigue-design-primer/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact