

TMEC034

Seleção de Materiais

Seleção por propriedades:
Fadiga

Prof. Rodrigo Perito Cardoso



Favor desligar o celular ou passá-lo para o modo silencioso

Em caso de ligação favor não atender durante a aula

Apresentação de estudo de caso

- Definir trio e tema para estudo de caso até dia 12/04 (hoje)-> **Muito aconselhável que o tema seja de seu interesse ou ligado ao trabalho/estágio de um dos membros.**
- Entregar a estrutura (esqueleto) da proposta de apresentação com os tópicos a serem abordados até dia 10/05
- A apresentação será feita por um dos integrantes (escolhido pelo professor no dia da apresentação) e deverá ter 20min.



Introdução

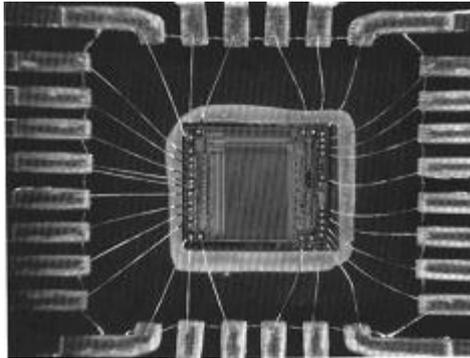
- Fadiga: fratura que ocorre em materiais submetidos a carregamentos cíclicos ou oscilantes.
- Ocorre por crescimento progressivo de trinca
- Características que a tornam grave(perigosa):
 - Ocorre a tensão bem abaixo da tensão de escoamento
 - Durante a propagação da trinca até a falha final não existem indicadores óbvios de que a falha está ocorrendo

Introdução

- Não é exclusividade dos metais, mas a maioria dos estudos realizados para entender o fenômeno foi realizada em metais (Primeiros relatos técnicos ocorreram no século 19 – eixo de vagão)
- É necessário o entendimento dos micromecanismos e quantificação o fenômeno, utilização quantitativa em projeto é recente

Introdução

As cargas cíclicas podem ter origens distintas:



**Processador de computador
carga térmica cíclica.**

Adapted from Fig. 22.30(b), *Callister 7e*.
(Fig. 22.30(b) is courtesy of National
Semiconductor Corporation.)



**Implante de fêmur
carga cíclica devido ao caminhar**

Adapted from Fig. 22.26(b),
Callister 7e.



**Cabide de avião
carga cíclica devido á
pressurização e despressurização**

Introdução

- Idealmente deseja-se evitar a fadiga, mas:
 - O fenômeno é extremamente dependente de detalhes do projeto
 - Existe dificuldade em evitar fatores prejudiciais à fadiga na operação
 - Mesmo se problemas de concentradores de tensão são bem dominados -> junções ainda são um problema (rebites, solda, parafusos) -> dificuldade de previsão de vida

Introdução

Onde atuar:

- Em muitos casos a resistência à fadiga de um componente é mais sensível ao projeto que ao material -> auxiliar projeto
- Para peças “simples” o melhoramento do material pode facilmente ser sentido (ex. pistas de rolamentos, laminas de rotores de helicópteros)
- Atuar sempre com base no conhecimento básico sobre fadiga

Micromecanismos de fadiga

- Como ocorre:



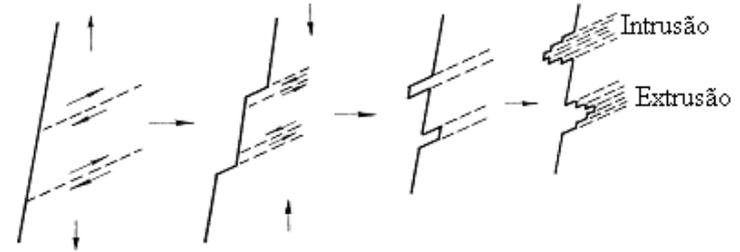
Redução da secção até
fratura “Estática”
Tamanho limite de trinca

- Início -> Normalmente na superfície da peça (ex: maior liberdade para deformação -> grão sem vizinhos -> deformação abaixo do limite de escoamento de grãos do núcleo ou ainda maior carga ou maior possibilidades de concentradores de tensão)

Micromecanismos de fadiga

Início de trinca

- Duas causas principais:



- Bandas de escorregamento na superfície-> gerando fendas que evoluem para trinca

- Importante para materiais dúcteis e com concentradores de tensão

- Incompatibilidade de deformações entre fases e/ou inclusões

- Importante em materiais endurecidos onde a matriz é resistente à formação de bandas de escorregamento

- Na prática ambos competem

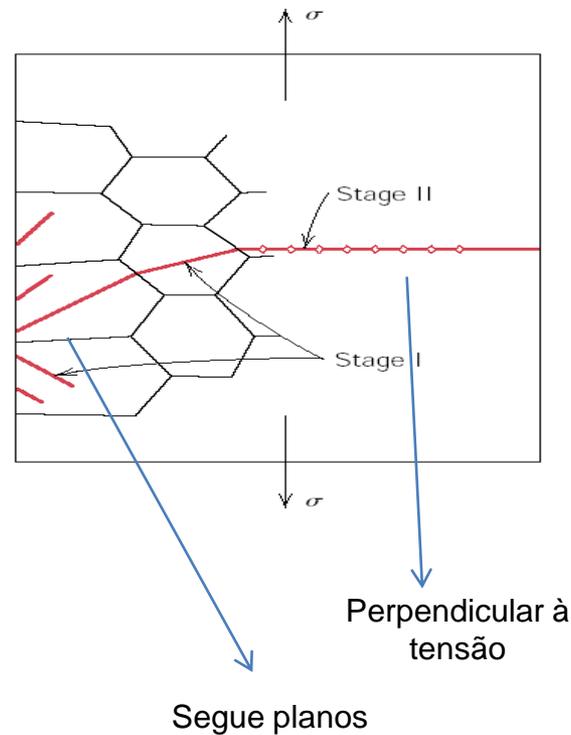
Micromecanismos de fadiga

Crescimento de trinca em materiais lisos dúcteis

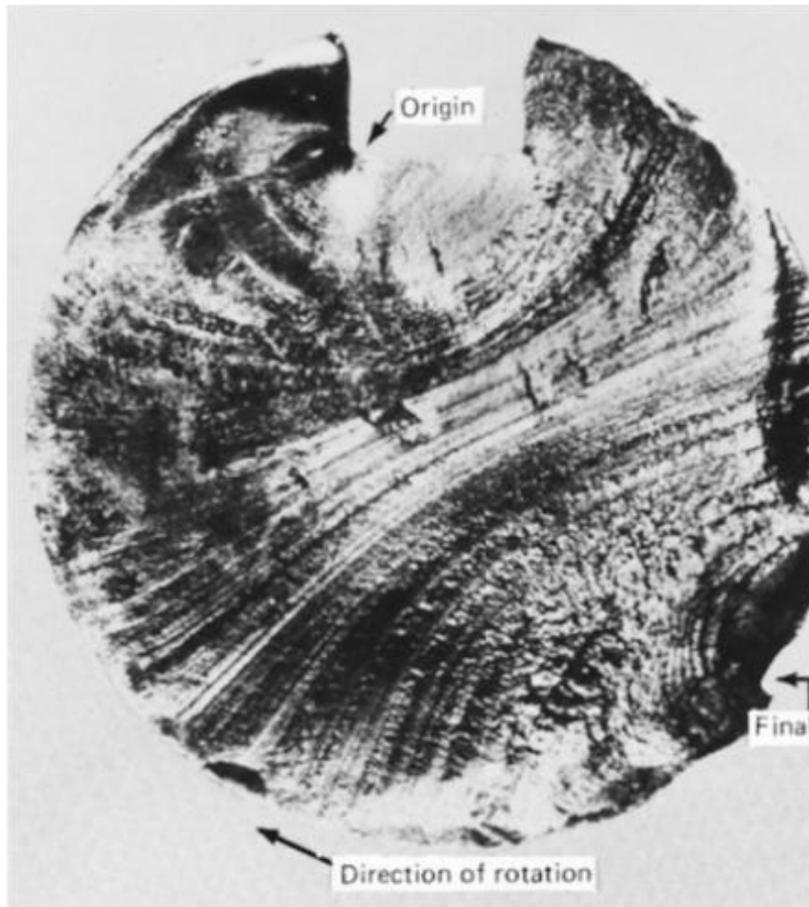
- Após a formação da fenda existem dois estágios:
 - Estágio I (microtrinca)-> trinca confinada no plano de escorregamento que a iniciou -> corresponde a até 90% da vida em fadiga
 - Estágio II (macrotrinca)-> Trinca grande o suficiente para crescimento como se o material fosse contínuo -> direção de crescimento muda para a de máxima abertura de trinca (normal á máxima tração) -> crescimento mais rápido que no estágio I (corresponde a maior área da fratura por fadiga -> produz “marcas de praia e estrias”)
 - Se o estágio I é importante a vida em fadiga aumenta com endurecimento do material por métodos convencionais
 - Se o estágio II é importante e o material é tenaz, melhorar a vida em fadiga não é simples

Micromecanismos de fadiga

Crescimento de trinca em materiais lisos dúcteis



Nucleação e propagação de trincas



Marcas de praia



Estrias (MEV)

Nucleação e propagação de trincas

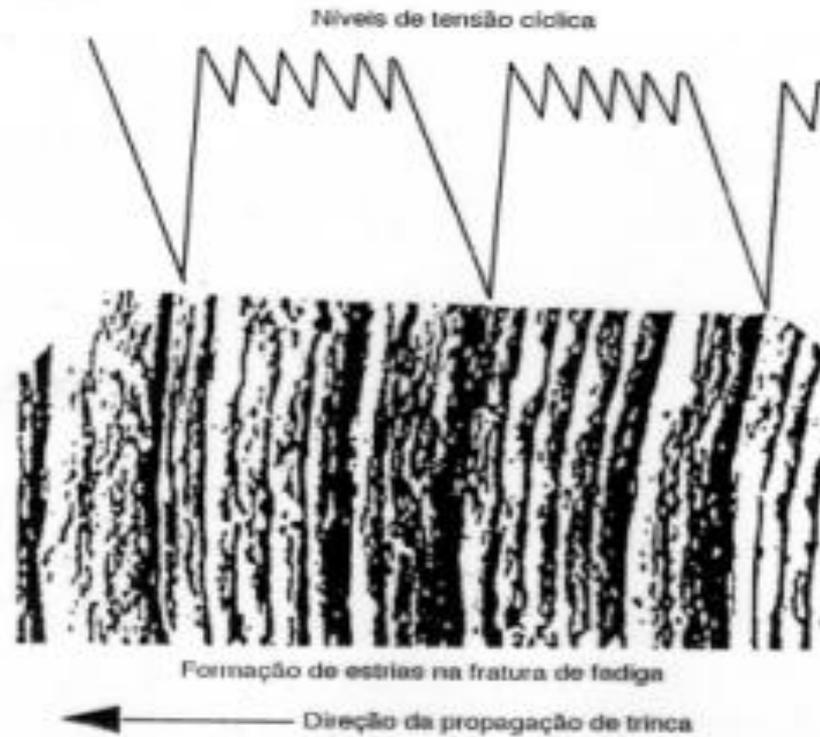
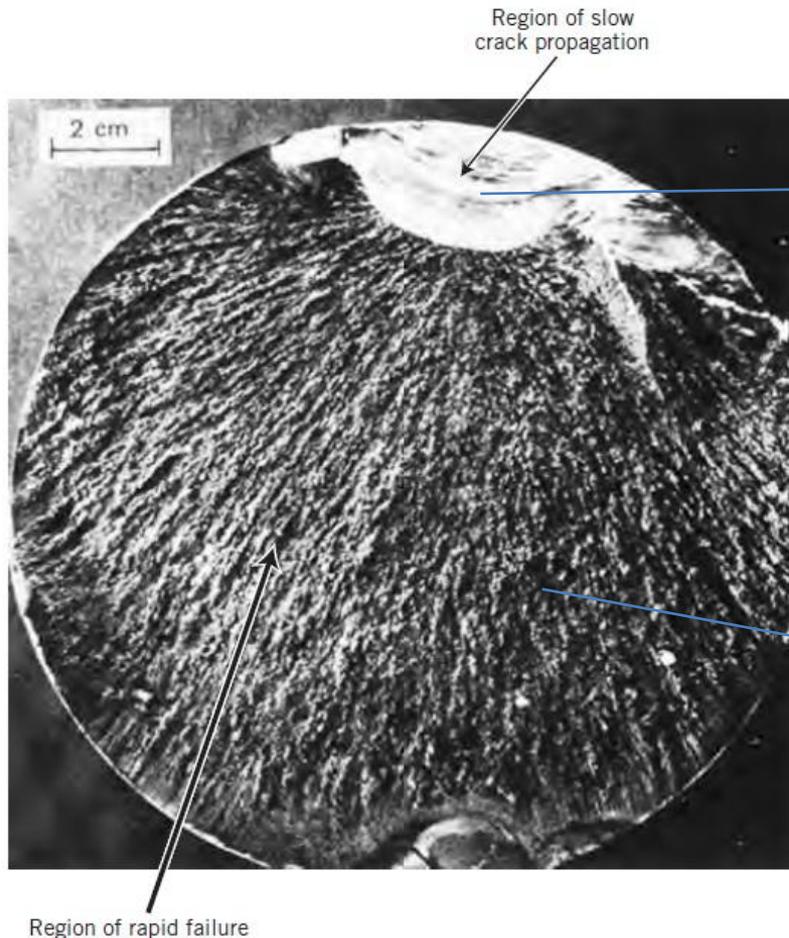


Fig. 8.19 Esboço da formação de estrias na propagação de trinca em fadiga.

Nucleação e propagação de trincas



Nucleação e propagação

Fratura final (limite de trinca para fratura frágil atingido)
Rápida

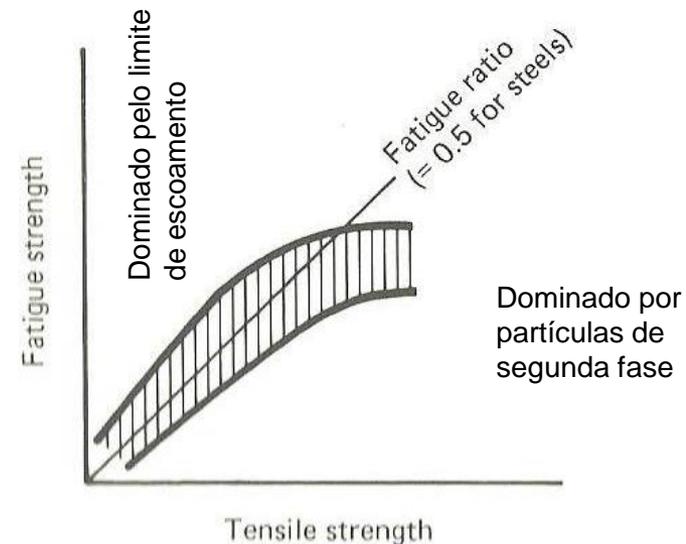
Micromecanismos de fadiga

Crescimento de trinca em materiais lisos duros

- Se o material é de elevada resistência o início de trinca (estágio I) é dificultado (não deforma)
- Normalmente início ocorre por concentração de tensão em partículas de segunda fase
- A vida em fadiga agora depende da quantidade, tamanho, forma e distribuição de inclusões não metálicas ou de segunda fase.
- Para melhora sua performance em fadiga -> tornar o aço “mais limpo” (modificações no refino)

Micromecanismos de fadiga

- Relação de fadiga e falha para materiais de elevada resistência



Para aços fundido ao ar isso ocorre a partir de 1000MPa (transição), para Al em torno de 300MPa -> possível solução melhorar o processo de refino

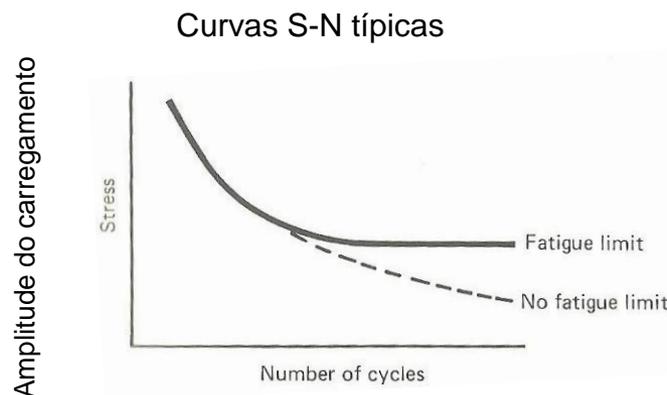
Micromecanismos de fadiga

Crescimento de trinca em materiais com entalhe

- Para superfícies lisa 90% do tempo de crescimento no estágio I e 10% estágio II
- Com entalhe é fácil inverter esta distribuição de tempo (como o estágio II é mais rápido o tempo em fadiga é reduzido)
- Buscar deduzir os concentradores de tensão ao mínimo possível

Medidas de resistência a fadiga

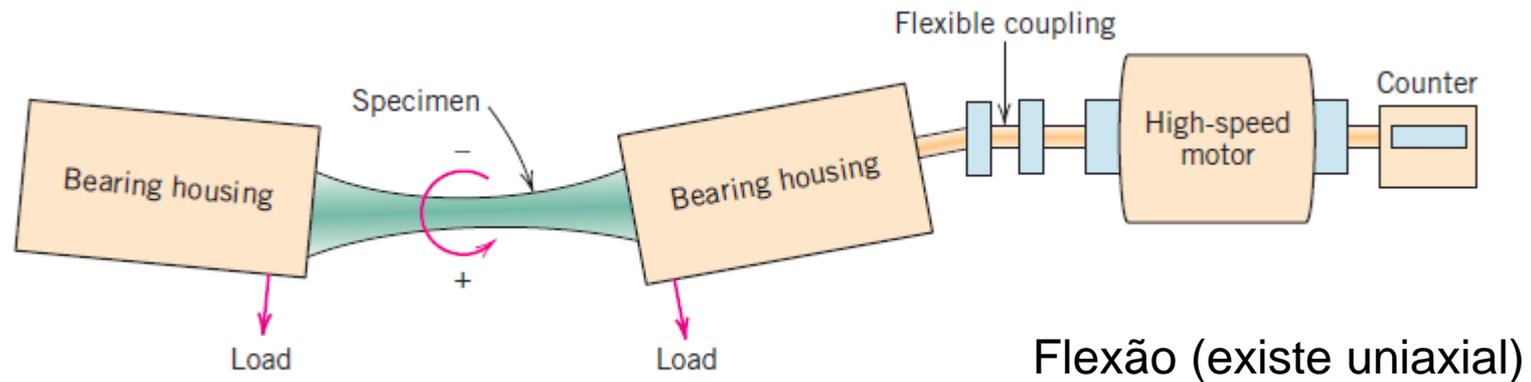
- Duas abordagens:
 - Medidas das curvas S-N (mais antigo e mais usado)
 - Utilizar a mecânica da fratura para prever a propagação da trinca



Limitações das curvas S-N:

- Configuração de tensões
- Tensão média
- Concentradores de tensão

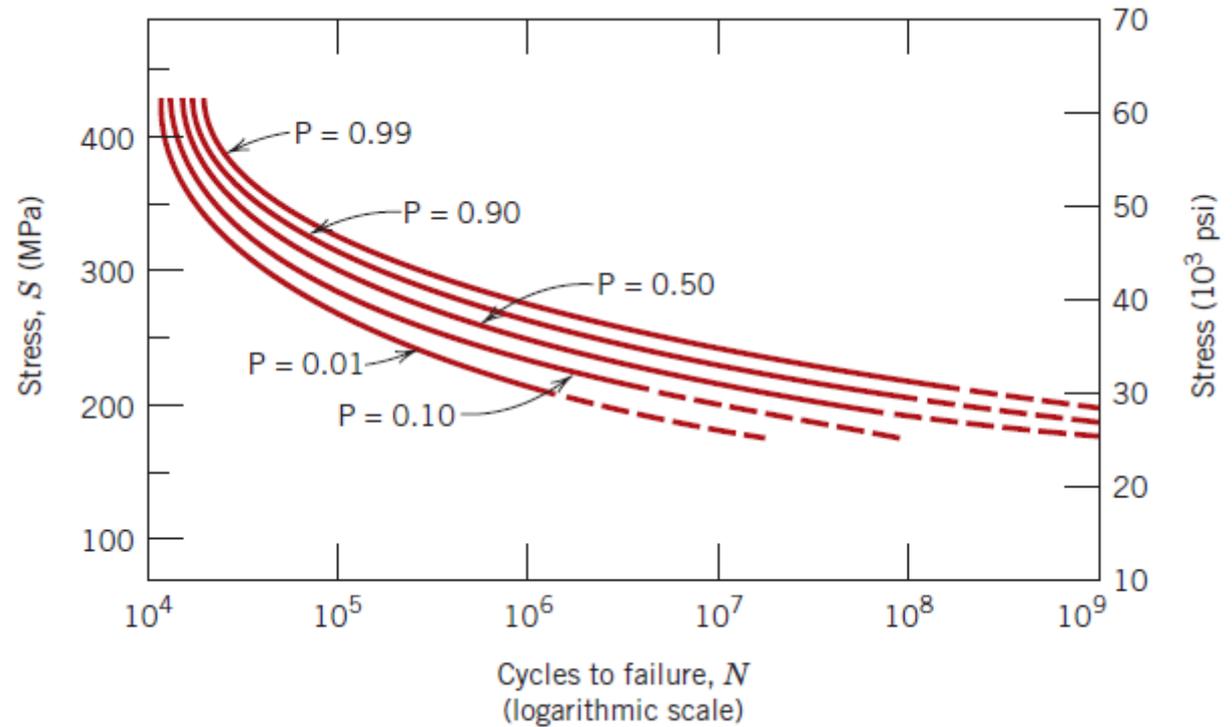
Curvas σ -N



- Curva determinada por ensaios em laboratório (esforço, freqüência, padrão)
- Inicia por $\frac{2}{3}$ de σ_e e diminui a carga
- Plota-se $\sigma \times N$ (log)
- Também pode ser realizada em ensaio similar ao de tração

Curvas σ - N

- Vida real
- Dispersão
- O que fazer?
 - Estatística



Medidas de resistência a fadiga

Configuração de tensões:

- Curvas N-S normalmente obtidas de carregamento axial
- Experimentos com carregamentos complexos são complicados de ser realizados (utilizados para validar teorias que relacionam carregamento uniaxial e complexo) -> ainda insuficiente para aplicação em projeto

Medidas de resistência a fadiga

Tensão média

Ensaio típico

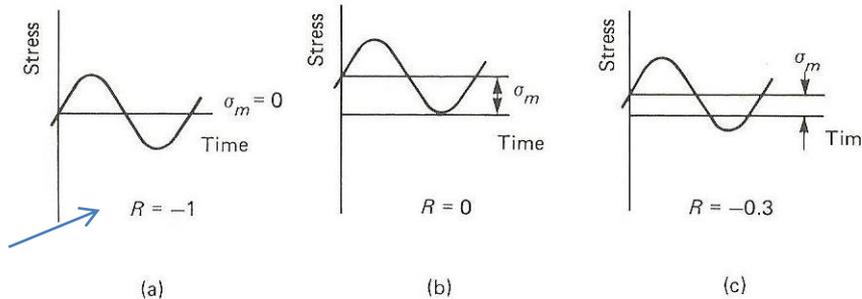


Figure 9.3 Mean stress, σ_m , for different stress cycles (NB Stress ratio, $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$).

Tração reduz a vida em fadiga -> deve-se reduzir a amplitude (diagramas de vida cte.)

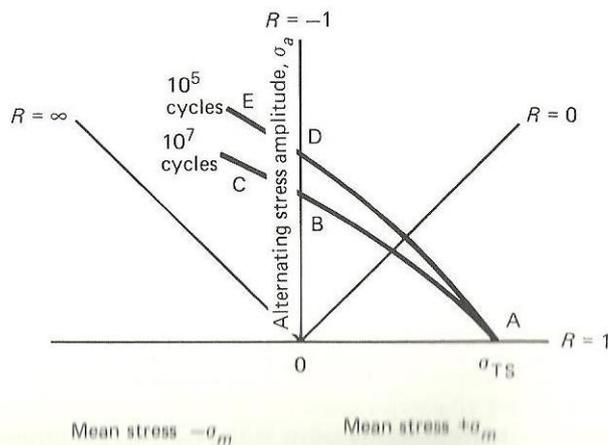


Figure 9.4 Constant-life diagram in terms of stress amplitude, σ_a , and mean stress, σ_m .

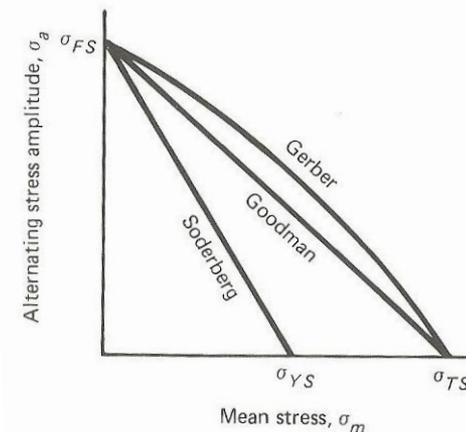


Figure 9.5 Constant-life diagram showing predictions of Goodman, Gerber, and Soderberg.

Medidas de resistência a fadiga

Concentradores de tensão (presentes em toda máquina)

Usar o fator de concentração de tensão (elástico) e as curvas S-N :

-> normalmente conservativo (deformação plástica “descarrega” o concentrador)

-> menos conservador para materiais de alta resistência

Em alguns casos é necessário teste em escala real, se o projeto é novo e os critérios de segurança são apertados (asas e fuselagem de avião - [Vídeo](#))

Medidas de resistência a fadiga

- Dano cumulativo (regra de Palmgren-Miner)
 - O acúmulo de dano é maior para maior amplitude de tensão que para baixa -> dificuldade de previsão para ciclos variáveis
 - Regra de Palmgren-Miner
 - Tomando (S_1, S_2, S_3, \dots teríamos $N_{f1}, N_{f2}, N_{f3}, \dots$) o dano se acumularia seguindo:

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = 1$$

Resultados são limitados e com grandes erros (5-10x no tempo de vida)-> não há outra alternativa

Medidas de resistência a fadiga

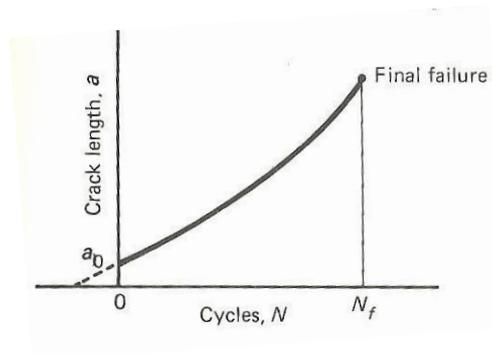
- Mecânica da fratura e fadiga
 - Em muitos casos prático podemos desconsidera o estágio I da fadiga (por exemplo quando temos concentradores de tensão importantes)
 - No estágio II o avanço é pouco dependente da microestrutura -> estimar taxa de crescimento
 - Lei de Paris-Erdogan $\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$, A e m -> ctes. exp.
 - Possibilidade de calcular o tempo para uma trinca atingir um novo tamanho $\Delta K = \Delta\sigma\alpha^{1/2}$
 - Se conhecer K_{IC} pode-se calcular o tamanho de trinca para crescimento rápido . Logo da Lei de Paris-Erdogan podemos prever o tempo de vida

Medidas de resistência a fadiga

- Mecânica da fratura e fadiga
 - Para $m=3$ por exemplo (integrando de a_0 a a_f e de 0 a N_f)

$$N_f = \frac{2}{A\alpha^3(\Delta\sigma)^3} \left(\frac{1}{\sqrt{a_0}} - \frac{1}{\sqrt{a_f}} \right)$$

- Se traçar em um gráfico temos:

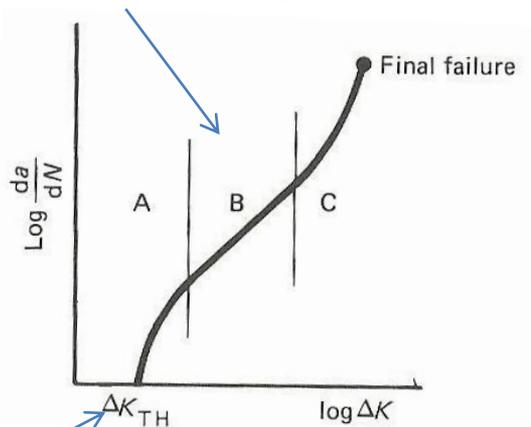


O processo é acelerada no final

Medidas de resistência a fadiga

- Mecânica da fratura e fadiga (Limites de aplicação)
 - Na realidade é ainda mais complicado

Lei de Paris-Erdogan



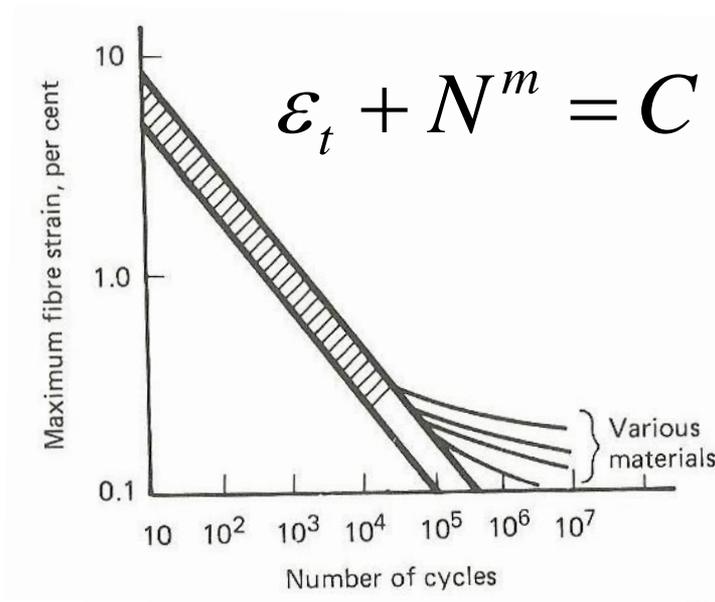
Região A ainda é pouco compreendida, nela a trinca é mais lenta. Como vai a favor da segurança, normalmente considera-se que nesse regime o crescimento é igual em B

Na Região C aproxima-se dos limite de tenacidade à fratura, se consideramos a lei de Paris-Erdogan, estamos subestimando a velocidade da trinca (utiliza-se regras empíricas ou limita o crescimento a 0,7 de K_{IC} (segurança para não entra no regime C))

Limite para crescimento de trinca (trinca abre e fecha sem crescer)

Medidas de resistência a fadiga

- Fadiga de baixo ciclo (10^4 - 10^5 ciclos)
 - Componente pode operar em condições mais severas que para vida infinita
 - Tratadas em termos de deformação



A maioria dos materiais tem comportamento similar, as diferenças aparecem para alto ciclo

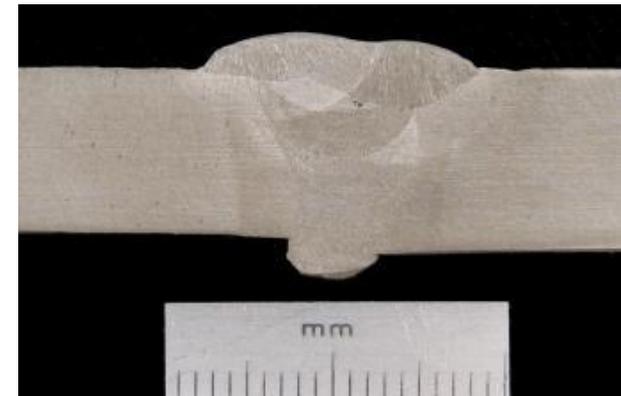
Não serve de base para seleção de materiais.

Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Fadiga em componentes unidos
 - União mecânica (pinos rebites e parafusos)
 - Resistência a fadiga reduzida a uma fração da das partes
 - Concentradores de tensão introduzidos pela junção
 - Movimento relativo das superfícies gera defeitos (partes ou junção)
 - Melhorias obtidas por montagem com interferência, carregamento para evitar deslizamento entre as partes e introdução de compostos anti fricção -> resultado bom para até 10^6 ciclos, imperceptível para vidas maiores

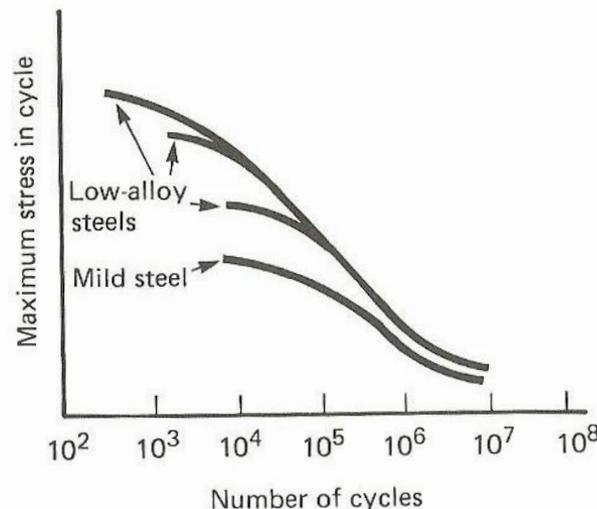
Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Fadiga em componentes unidos
 - União por Solda
 - Sempre reduz a resistência a fadiga se comparado ao material antes da solda
 - Resistência a fadiga da solda depende:
 - Tamanho e distribuição de defeitos
 - Magnitude do concentrados de tensão
 - Descarbonetação e zona termicamente afetada



Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Fadiga em componentes unidos
 - União por Solda



Influência do aço para baixo ciclo

- Resistência a fadiga de alto ciclo de juntas soldadas é pouco dependente do material e do processo de soldagem

Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Fadiga em componentes unidos
 - União por Solda
 - Trinca normalmente se inicia na margem da solda
 - Medida para reduzir este problema:
 - Lixamento ou refusão por TIG -> reduzir concentradores de tensão
 - Martelamento ou Jateamento (*shoot peening*)
 - Sabe-se que solda tem tensões residuais -> alívio de tensões é importante para reduzir tensões trativas

Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Processamento de superfície

Aumentar a resistência da superfície de um material aumenta sua vida em fadiga (o inverso também é verdade)

- Trabalho a frio

- *Shoot peening* -> encruamento e tensões compressivas
- Aumento de até 30% na tensão limite de fadiga
- Laminação a frio -> aumenta a vida de parafusos

Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Processamento de superfície
 - Tratamento de endurecimento superficial
 - Tempera superficial (chama , indução)
 - Tratamentos termoquímicos (nitretação, cementação)
 - Interessante para peças com concentradores de tensão
-> neste caso pode-se dobrar a resistência a fadiga
 - Entretanto, dificuldade em prever a vida em fadiga em superfícies tratadas-> dependente do tratamento e das características da camada tratada -> velocidade de crescimento da trinca varia entre a camada e o núcleo

Fatores que influenciam na fadiga de metais

- Processamento de superfície
 - Amolecimento de superfície
 - Descarbonetação (tratamento térmico ou solda)
 - Retirada da camada por usinagem ou realização de *shoot peening*
 - Revestimento (ex. controle de resistência a corrosão em ligas de alumínio)
 - Deposição de filmes
 - Proteção (níquel, cromo, cádmio, zinco) -> perigoso para a vida em fadiga, principalmente em aços de elevada resistência. Causas:
 - Defeitos na camada (iniciação de trinca)
 - Tensões residuais são normalmente trativas

Fadiga em não metálicos

- Estudos iniciaram em metais, mas alguns aspectos da fadiga de não metálicos são similares a metais (Curva S-N)
- Descontinuidades podem acelerar início de trinca (concreto, compósitos)
- Interface fibra polímero pode ser um local para crescimento preferencial de trinca em compósitos
- Apesar das similaridades, os mecanismos de fadiga em não metais não são bem conhecidos (estrutura diferente, variáveis diferentes, sensibilidade térmica...)

Seleção de materiais para resistência à fadiga

- Provavelmente fadiga é o critério mais difícil para seleção de materiais
- Primeiro passo é procurar saber se a vida em fadiga é dominada pelo estágio I ou II do crescimento de trincas
 - Para peças com união estágio I pode ser desconsiderado
 - Para peças onde o estágio I é importante verificar o mecanismo de início de trinca

Seleção de materiais para resistência à fadiga

- O primeiro passo, idealmente, é trabalhar no projeto reduzindo concentradores de tensão ao mínimo possível -> depois buscar melhorar a superfície (acabamento, tratamento)
- Buscar usar materiais de elevada resistência -> mas quanto maior a resistência maior a importância do refino da microestrutura (ex. ferrita-perlita x martensita) e das inclusões (refino)
 - Solução tecnológica existe mas é cara em muitos casos

Seleção de materiais para resistência à fadiga

- Filosofias de projeto:
 - Casos de “baixa tecnologia” -> se preocupar somente com o estágio II -> reduzir avanço reduzindo tensão
 - Caso de “alta tecnologia” -> Controles periódicos, métodos de detecção de trincas, teorias de avanço de trinca e redundância de peça vitais

É importante lembrar

- Quais os estágios da fadiga
- Qual o mecanismo de avanço de trinca no estágio II e qual sua consequência na superfície fraturada (marcas)
- Como se mede a resistência à fadiga e quais as limitações destas medidas em aplicações de projeto
- Quais as limitações para projeto em fadiga de peças unidas