

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SÃO PAULO

Ensaio Mecânicos de Materiais

Aula 11 – Ensaio de Fadiga

Prof. MSc. Luiz Eduardo Miranda J. Rodrigues

Tópicos Abordados Nesta Aula

- Ensaio de Fadiga.
- Propriedades Avaliadas do Ensaio.
- Tipos de Corpos de Prova.

Introdução

- Quando são aplicados **esforços repetidos** a um material, este pode romper-se com uma carga bem menor à carga máxima atingida na tração ou na compressão. Neste caso, tem-se a **ruptura por fadiga** do material.

- Um metal rompe-se por fadiga, quando a tensão cíclica aplicada, tem grande flutuação e é **maior que o valor característico de cada metal**. Este é o **limite de fadiga** e que pode ser determinado através de um **ensaio de fadiga**.

Introdução

- Com uma máquina adequada, o **ensaio pode ser realizado na própria peça**, aplicando os esforços submetidos na prática.
- O ensaio também pode ser realizado em **corpos de prova**, testando **apenas o material**.
- Ensaaios em **corpos de prova não verificam os efeitos na própria peça**. Os resultados não devem ser diretamente aplicados na prática.
- O estudo da fadiga é muito importante no projeto de peças submetidas a tensões cíclicas.

Definições

- Em condições normais de uso, os produtos devem sofrer esforços abaixo do limite de proporcionalidade, ou limite elástico, que corresponde à tensão máxima que o material pode suportar.
- Em geral, os fabricantes especificam o produto para suportar esforços acima desse limite, ensaiam os materiais, controlam o processo de produção e tomam todos os cuidados para que o produto não apresente qualquer problema.
- Apesar de todas essas precauções, é possível que, após algum tempo de uso normal, de repente, sem aviso prévio e sem motivo aparente, o produto simplesmente venha a falhar. Essa falha é típica de um fenômeno chamado fadiga.

Definições

- **Fadiga** é a ruptura de componentes, sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações **cíclicas repetidas**. Ou também...
- Dano numa peça estrutural por **propagação gradual de fissuras** provocadas por **variações repetitivas de tensões**;
- Fenômeno de **diminuição da resistência** em consequência da **repetição muito frequente** de ações.

Definições

- **Limite de fadiga** corresponde a uma tensão (flutuação-variação) abaixo do qual o material suporta um número de ciclos infinito, sem romper.
- **Um ciclo** de tensão é a menor parte da função tensão-tempo que é periódica e identicamente repetida.
- **As normas** definições e a simbologia utilizadas no estudo e no ensaio de fadiga seguem os padrões do Manual de Ensaio de Fadiga da ASTM (Manual on Fatigue Testing).

Definições

- **Tensões Cíclicas** – Esforços (cargas) que se repetem com regularidade.
- A tensão cíclica é **definida por uma função senoidal**, onde os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas.
- Tensões de tração são representadas como positivas e de compressão como negativas.

Definições

- O **ensaio de fadiga** é um método utilizado para especificar os limites de tensão e de tempo de uso de um produto, peça ou elemento de máquina. **É utilizado também para definir aplicações de materiais.**
- Determina o comportamento de materiais submetidos a cargas flutuantes (cíclicas);
- Aplicação de cargas alternadas e o número de ciclos necessários para produzir a ruptura (numa peça ou corpo de prova).

Ensaio de Fadiga

- Toda máquina é constituída por um conjunto de componentes.
- No uso normal, nunca ocorre de todos os componentes falharem ao mesmo tempo. Isso porque cada um tem características próprias, uma das quais é o tempo de vida útil esperado.
- O ensaio de resistência à fadiga é um meio de especificar limites de tensão e de tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina. É utilizado também para definir aplicações de materiais.

Ensaio no Produto Acabado

- É sempre preferível ensaiar a própria peça, feita em condições normais de produção. Molas, barras de torção, rodas de automóveis, pontas de eixo etc. são exemplos de produtos normalmente submetidos a ensaio de fadiga.
- Quando não é possível o ensaio no próprio produto, ou se deseja comparar materiais, o ensaio é feito em corpos de prova padronizados.

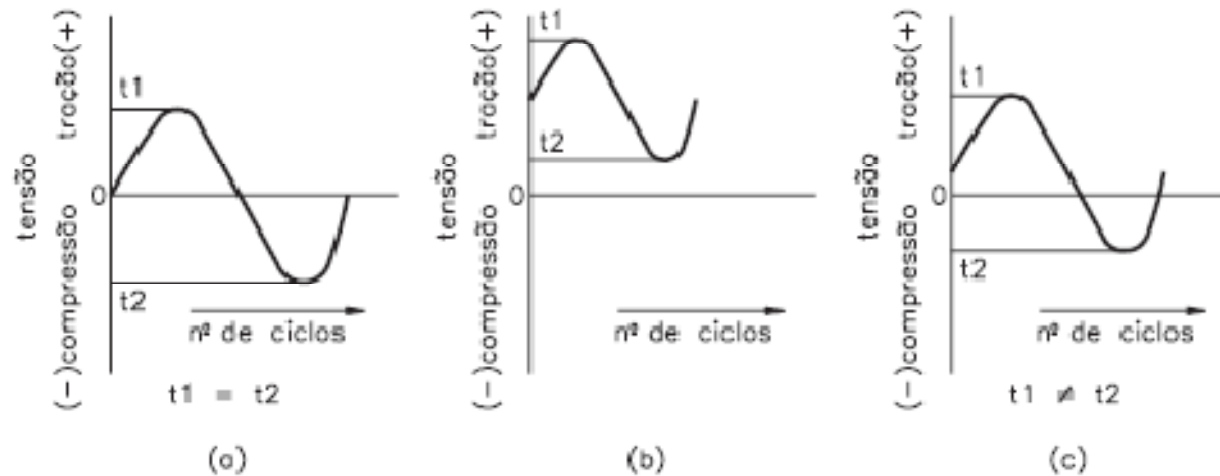
Importância do Estudo da Fadiga

- O estudo da fadiga é importante porque a grande maioria das falhas de componentes de máquinas, em serviço, se deve à fadiga.
- A ruptura por fadiga ocorre sem nenhum aviso prévio, ou seja, num dado momento a máquina está funcionando perfeitamente e, no instante seguinte, ela falha.

Tensões Cíclicas

- Na definição de fadiga, destacou-se que ela se deve a esforços cíclicos repetidos. De maneira geral, peças sujeitas a fadiga estão submetidas a esforços que se repetem com regularidade. Trata-se das tensões cíclicas.
- A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma função senoidal, onde os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas.

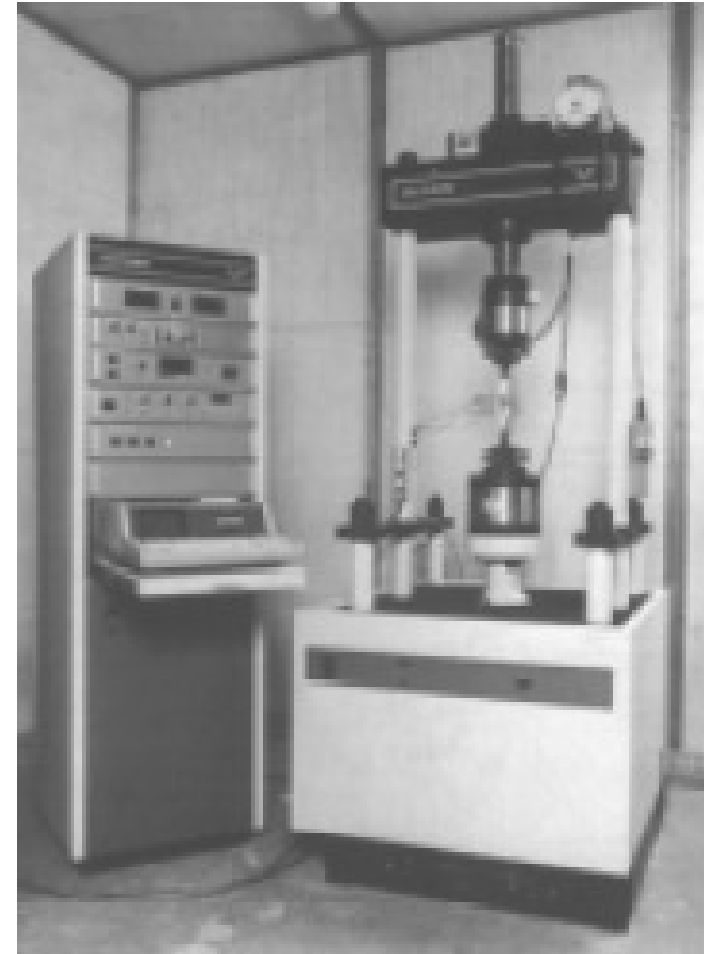
Ciclos de Tensão



- A figura **a** mostra um gráfico de tensão reversa, assim chamado porque as tensões de tração têm valor igual às tensões de compressão.
- No gráfico **b** todas as tensões são positivas, ou seja, o corpo de prova está sempre submetido a uma tensão de tração, que oscila entre um valor máximo e um mínimo.
- O gráfico **c** representa tensões positivas e negativas, como no primeiro caso, só que as tensões de compressão têm valores diferentes das tensões de tração.

Tipos de Ensaios de Fadiga

- Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de aplicação de cargas, que permite alterar a intensidade e o sentido do esforço, e por um contador de número de ciclos.
- O teste é interrompido assim que o corpo de prova se rompe.
- O ensaio é realizado de diversas maneiras, de acordo com o tipo de sollicitação que se deseja aplicar:
 - torção;
 - tração-compressão;
 - flexão;
 - flexão rotativa.



Método de Ensaio

- Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de **aplicação de cargas, que permite simular esforços das condições reais de trabalho, e por um contador de número de ciclos.**

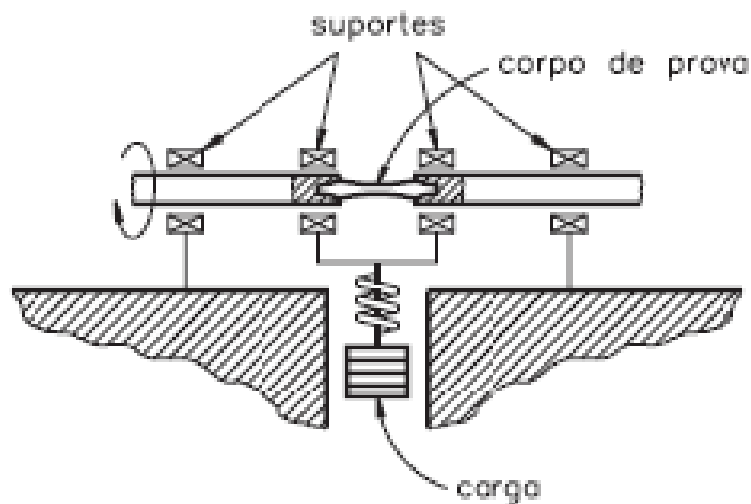
- **O ensaio é realizado de acordo com o tipo de sollicitação:**
 - torção;
 - tração-compressão;
 - flexão;
 - flexão rotativa.



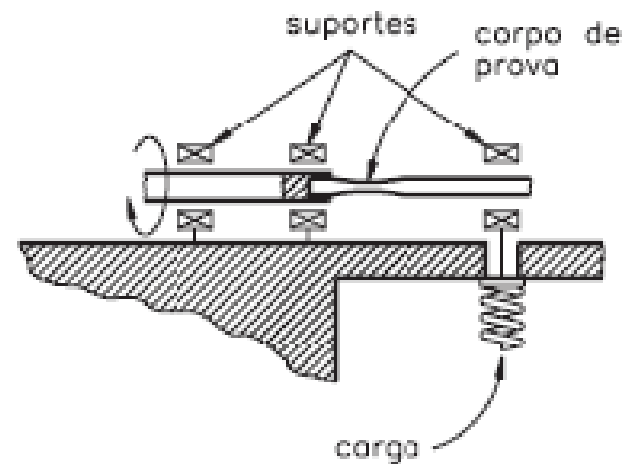
A EMT1kNV é uma máquina eletromagnética para ensaios de fadiga tração-compressão, com frequência até 200Hz em onda senoidal com variação de velocidade.

Flexão Rotativa

- O ensaio mais usual, realizado em corpos de prova extraídos de barras ou perfis metálicos, é o de flexão rotativa.
- Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto o mesmo é girado em torno de um eixo, por um sistema motriz com contagiros, numa rotação determinada e constante.



solicitação de flexão central



solicitação de flexão no extremo

Método de Ensaio

- **Flexão Rotativa** - Um motor gira um corpo de prova **C**. Os rolamentos externos são fixos em apoios e os internos recebem uma carga **P**, produzindo um esforço de flexão alternado devido à rotação do corpo de prova.

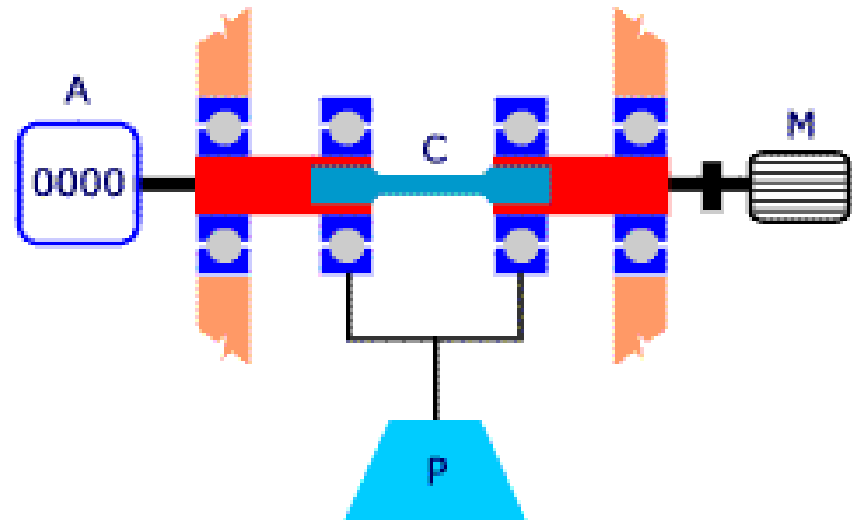


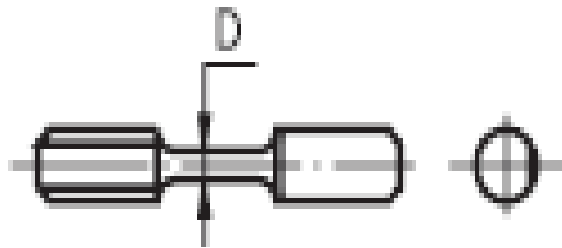
Figura – Exemplo de ensaio de fadiga com torção e flexão

- Um ciclo completo de flexão alternada é aplicado a cada volta do eixo e o número de voltas é registrado pelo contador **A**.
- Quando o corpo se parte por fadiga, o contador deixa de ser acionado e sua indicação é o número de ciclos que o corpo suportou com a carga **P**.

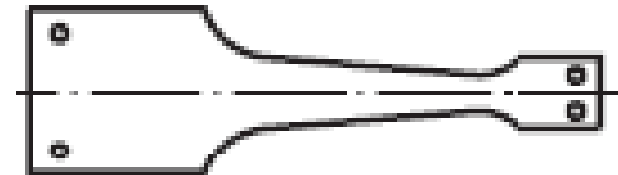
Corpos de Prova para Fadiga

- O corpo de prova deve ser usinado e ter bom acabamento superficial, para não prejudicar os resultados do ensaio. A forma e as dimensões do corpo de prova variam, e constituem especificações do fabricante do equipamento utilizado. O ambiente onde é feito o ensaio também é padronizado.
- Para uma mesma tensão, pode-se obter resultados de ensaio dispersos e que devem ser tratados estatisticamente. Mas, em geral, o ensaio é realizado em cerca de 10 corpos de prova, para cada um dos diversos níveis de tensão.

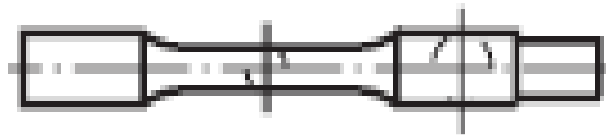
Modelos de Corpos de Prova



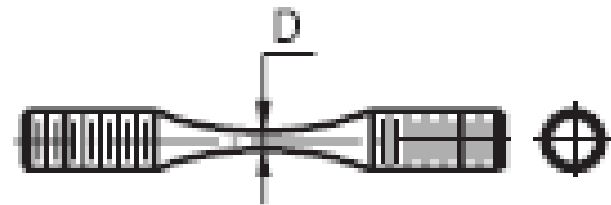
a) torção



c) flexão em chapa



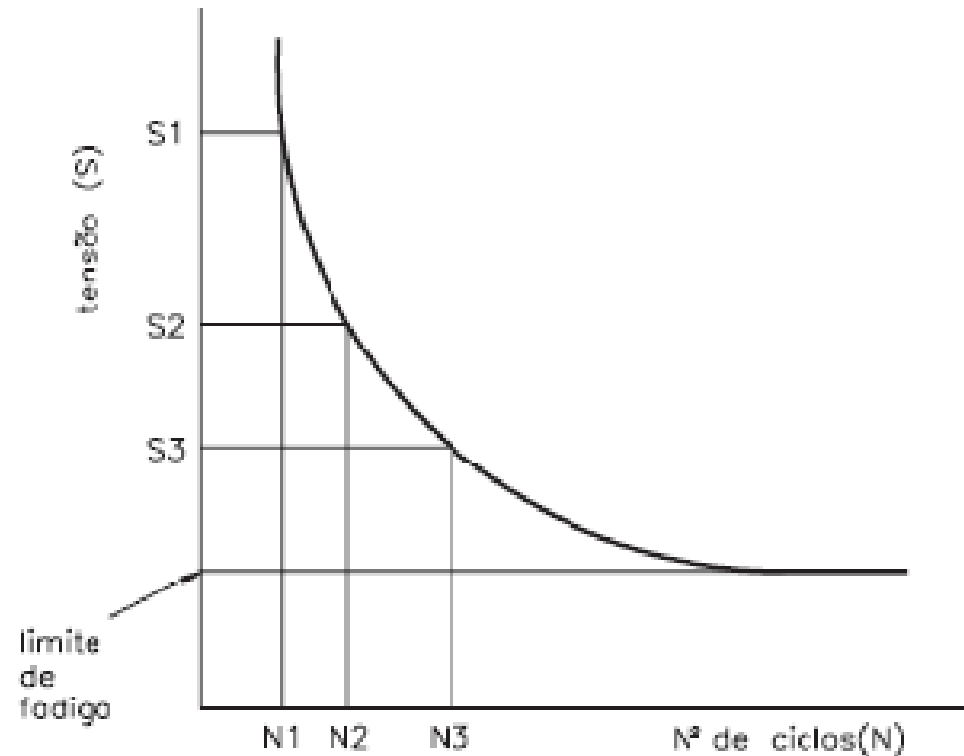
b) flexão rotativa



c) tração compressão

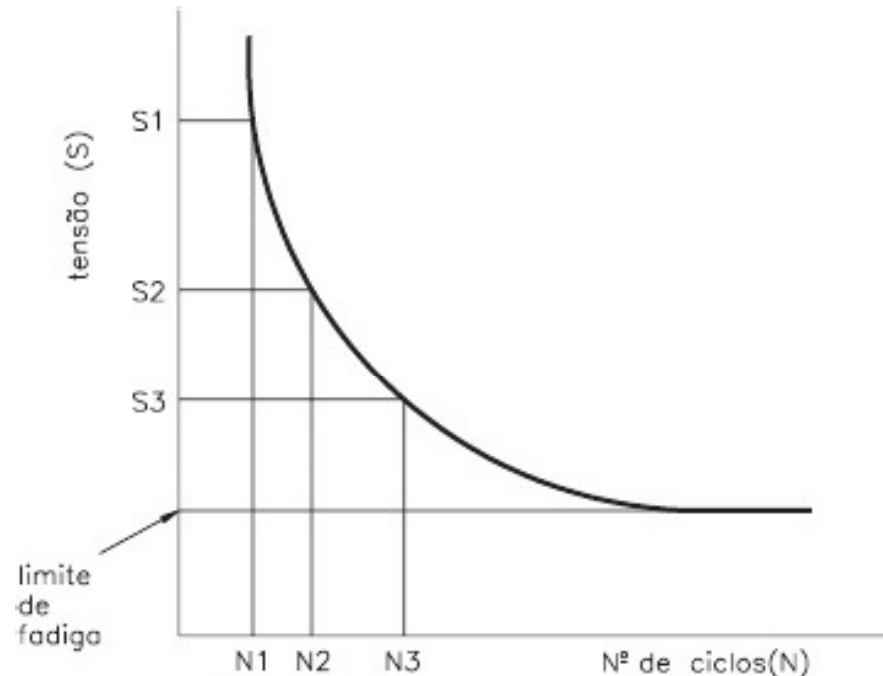
Resultados do Ensaio

- Os resultados do ensaio de fadiga geralmente são apresentados numa curva tensão-número de ciclos, ou simplesmente curva **S-N**.
- O **S** vem de stress, que quer dizer. tensão, e **N** representa o número de ciclos.



Método de Ensaio – Curva S-N

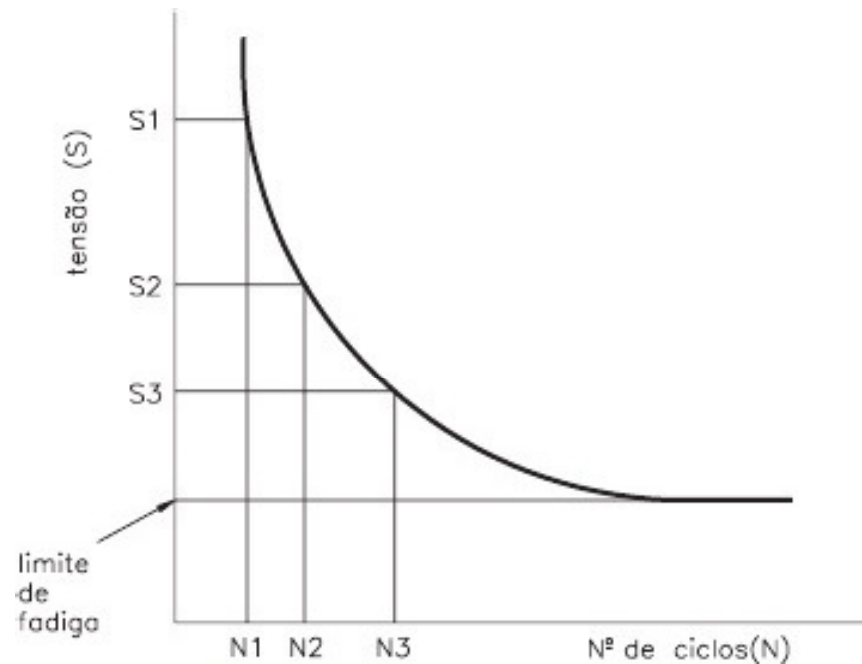
- Os resultados dos ensaios de fadiga geralmente são apresentados em um gráfico de **tensão por número de ciclos**, ou simplesmente **curva S-N**.
- O **S** vem da palavra Inglesa **stress**, que significa “tensão”, e o **N** representa o número de ciclos.



Curva S-N

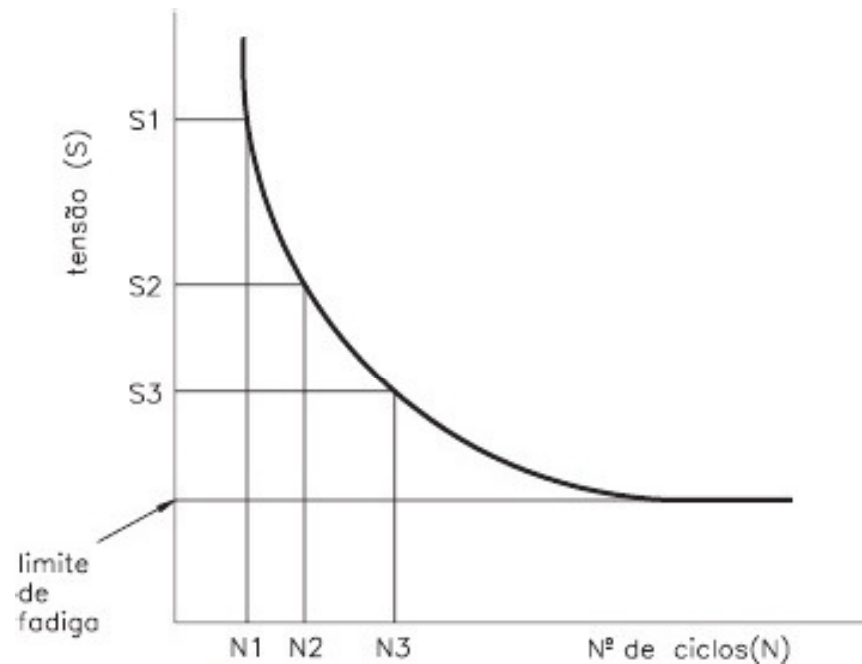
Método de Ensaio – Curva S-N

- Supondo que, para uma solicitação de tensão **S1** o corpo de prova se rompa em um certo número de ciclos **N1**, e para uma solicitação **S2** se rompa em **N2**, e assim por diante, pode-se construir o diagrama **S-N**.
- A medida que se **diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos.**



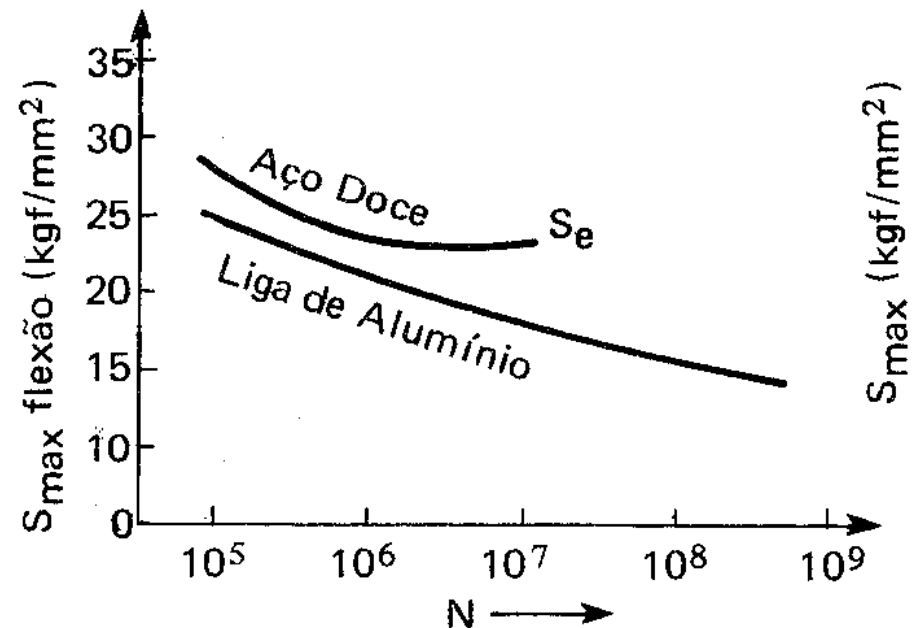
Método de Ensaio – Curva S-N

- Diminuindo a tensão a partir de um certo nível – em que a curva se torna horizontal – o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito.
- Esta tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se **limite de fadiga** ou **resistência à fadiga**.



Método de Ensaio – Curva S-N

- Para a maioria dos materiais, especialmente os metais não ferrosos como o alumínio, a curva obtida no diagrama S-N é decrescente. Portanto, é necessário definir um número de ciclos para obter a correspondente resistência à fadiga.
- Para alumínio, cobre, magnésio e suas ligas, deve-se levar o ensaio a até 50 milhões de ciclos e, em alguns casos, a até 500 milhões de ciclos, para neste número definir a resistência à fadiga.



Números do Ensaio

- Para a maioria dos materiais, especialmente os metais não ferrosos como o alumínio, a curva obtida no diagrama S-N é decrescente. Portanto, é necessário definir um número de ciclos para obter a correspondente tensão, que será chamada de resistência à fadiga.
- Para o alumínio, cobre, magnésio e suas ligas, deve-se levar o ensaio a até 50 milhões de ciclos e, em alguns casos, a até 500 milhões de ciclos, para neste número definir a resistência à fadiga.

Fatores que Influenciam a Resistência a Fadiga

- Uma superfície mal acabada contém irregularidades que, como se fossem um entalhe, aumentam a concentração de tensões, resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga.
- Defeitos superficiais causados por polimento (queima superficial de carbono nos aços, recozimento superficial, trincas etc.) também diminuem a resistência à fadiga.
- Tratamentos superficiais (cromação, niquelação etc.) diminuem a resistência à fadiga, por introduzirem grandes mudanças nas tensões residuais, além de conferirem porosidade ao metal.

Fatores que Melhoram a Resistência

- Tratamentos superficiais endurecedores podem aumentar a resistência à fadiga.
- O limite de fadiga depende da composição, da estrutura granular, das condições de conformação mecânica, do tratamento térmico etc.
- O tratamento térmico adequado aumenta não somente a resistência estática, como também o limite de fadiga.
- O encruamento dos aços dúcteis aumenta o limite de fadiga.

Efeito da Concentração de Tensão

- A **forma é um fator crítico**, porque a resistência à fadiga é muito afetada por descontinuidades nas peças, como cantos vivos, encontros de paredes e mudanças bruscas de seções.
- Sempre que possível, deve-se **evitar a concentração de tensões**. Ex.: Rasgo de chaveta é um elemento que concentra tensão e, conseqüentemente, diminui a resistência à fadiga.

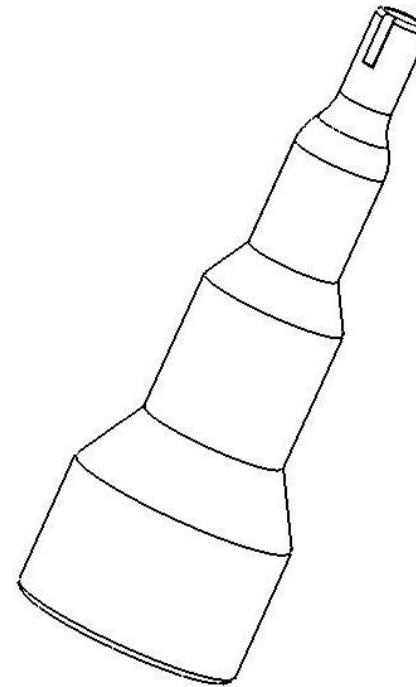


Figura 1- **minimiza** a concentração de tensões.

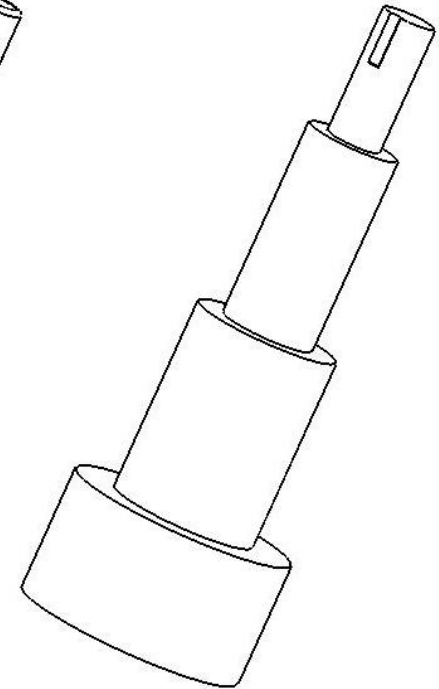


Figura 2- **maximiza** a concentração de tensões.

Efeito da Superfície do Corpo de Prova

- Superfície mal acabada contém irregularidades, que aumentam a concentração de tensões, resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga.
- Defeitos superficiais causados por polimento (queima superficial, jateamento, corrosão, recozimento, trincas etc.) também diminuem a resistência à fadiga.



Figura – exemplo de irregularidade superficial.

Efeito da Superfície do Corpo de Prova

- Tratamentos superficiais endurecedores **umentam** a resistência estática e **também o limite de fadiga.**
- Muitos **elementos de maquinas** como eixos e engrenagens, recebem tratamentos superficiais endurecedores para **umentar sua resistência a fadiga.**



Figura – exemplo de ótimo acabamento superficial.

Condições de Ensaio

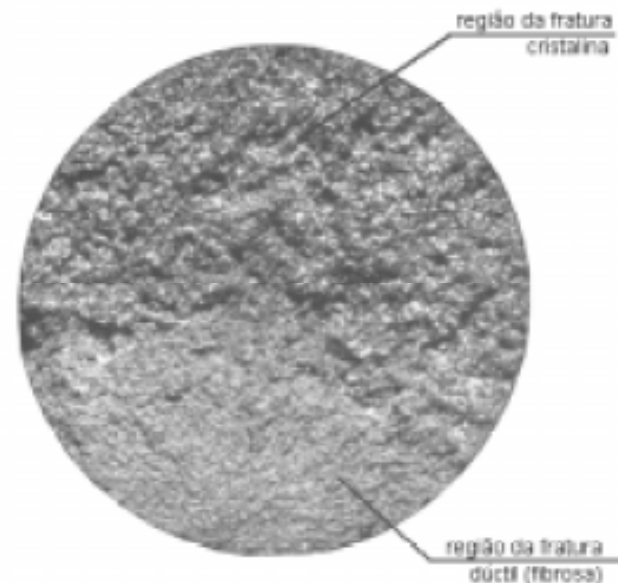
- **O resultado** do ensaio **depende também** de variáveis , como:
 - Tensões;
 - Velocidade de variação das tensões;
 - Variação de temperatura;
 - Ambiente.



Figura – ação corrosiva de um meio químico acelera a velocidade de propagação da trinca

Ruptura por Fadiga

- A ruptura por fadiga começa a partir de uma trinca (nucleação) ou pequena falha superficial, que se propaga ampliando seu tamanho, devido às solicitações cíclicas.
- Quando a trinca aumenta de tamanho, o suficiente para que o restante do material não suporte mais o esforço que está sendo aplicado, a peça se rompe repentinamente.
- A fratura por fadiga é típica: geralmente apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina.

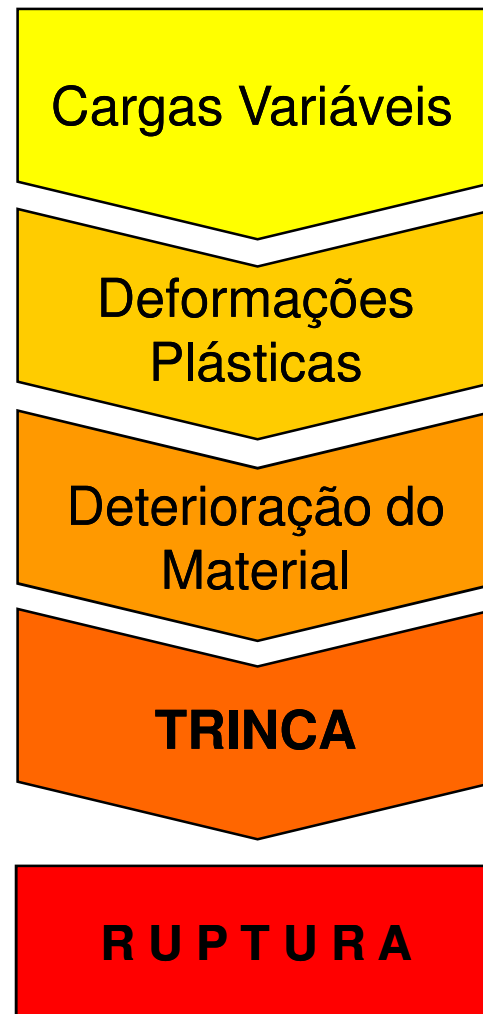


Fratura por Fadiga

- A ruptura tem **início numa pequena trinca** ou falha superficial que devido aos esforços cíclicos é propagada e ampliada.
- A fratura geralmente apresenta-se **fibrosa na região da trinca** e **cristalina na região da ruptura**.



Fratura por Fadiga



Aplicações

Boeing começa o teste de fadiga na estrutura do 787 Dreamliner

Qua, 15/09/2010 20:30 Central de jornalismo



www.boeing.com

Fonte: Fator Brasil

A Boeing iniciou o teste de fadiga na carcaça estrutural do 787 Dreamliner na fábrica, em Everett, no estado de Washington. **O teste de fadiga envolve a colocação da estrutura do 787 em uma célula de ensaio que simula vários ciclos de vida da peça para testar a forma como o avião responde ao longo do tempo.**

“Ao contrário dos ensaios estáticos, onde as cargas são aplicadas à estrutura do avião para simular tanto a operação normal quanto condições extremas de vôo, **o teste de fadiga é um processo muito mais longo que simula até três vezes mais o número de ciclos de vôos que um avião provavelmente experimentará durante toda sua vida de serviço**”, disse Jim Ogonowski, vice-presidente de estruturas da Boeing Commercial Airplanes.

Enquanto o programa de testes estruturais já validou a força da estrutura, **o teste de fadiga avalia em longo prazo, o uso contínuo.** Este é um processo natural na fase de testes de um novo avião e parte do processo para garantir a certificação da Administração Federal da Aviação Civil dos EUA (U.S. Federal Aviation Administration – FAA)

Aplicações

Embraer completa 5000 ciclos de vôo em teste de fadiga do Embraer 190

A Embraer anunciou hoje que o EMBRAER 190, de 100 assentos, completou **5.000 ciclos de vôo em sua campanha de teste de fadiga**, um passo importante para a certificação do avião. O cumprimento de 5.000 ciclos de vôo é o **mínimo requerido** para apoiar o início da operação comercial da aeronave.

Os últimos objetivos da campanha estrutural de certificação, incluindo as metas relativas aos testes de fadiga e estática, foram atingidos no prazo e garantem conformidade total com todos os requisitos de certificação aplicáveis. **Testes completos de fadiga e de estática servem para mostrar como a estrutura do EMBRAER 190 suporta condições de carga normal e limite.** Em particular, o teste de estática demonstrou que o avião pode suportar cargas máximas.

O cumprimento do mínimo requerido de 5.000 ciclos de vôo na campanha de testes de fadiga é um marco no programa de certificação do EMBRAER 190. A certificação, cuja conclusão está prevista para o terceiro trimestre de 2015, abre o caminho para as entregas ao cliente-lançador JetBlue, dos Estados Unidos. A JetBlue encomendou 100 aeronaves EMBRAER 190 e detém opção para mais 100 aeronaves do mesmo modelo.

Na próxima fase da campanha de testes de fadiga, a Embraer vai simular duas vidas econômicas do avião, ou 160.000 ciclos de vôo. Em condições operacionais normais, a vida econômica do EMBRAER 190 atinge cerca de 80.000 ciclos. Numa fase subsequente, uma terceira vida econômica do EMBRAER 190 será simulada pela Embraer.

FONTE: Aviação Brasil / Embraer – Assessoria de Imprensa – São José dos Campos/SP (27-09-2010)

Aplicações

Embraer completa 5000 ciclos de voo em teste de fadiga do Embraer 190.



Próxima Aula

- Ensaio de Impacto.