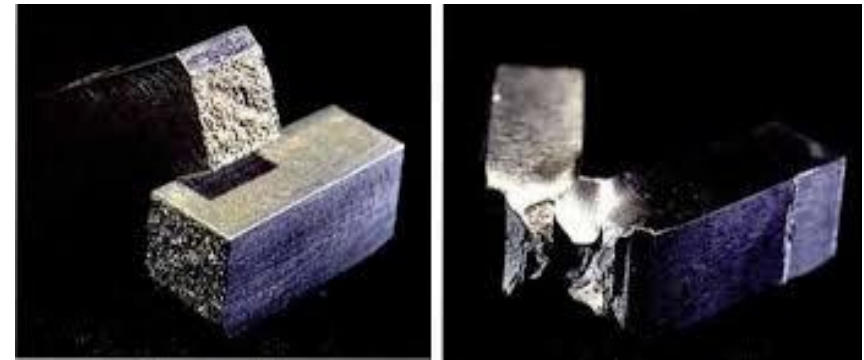
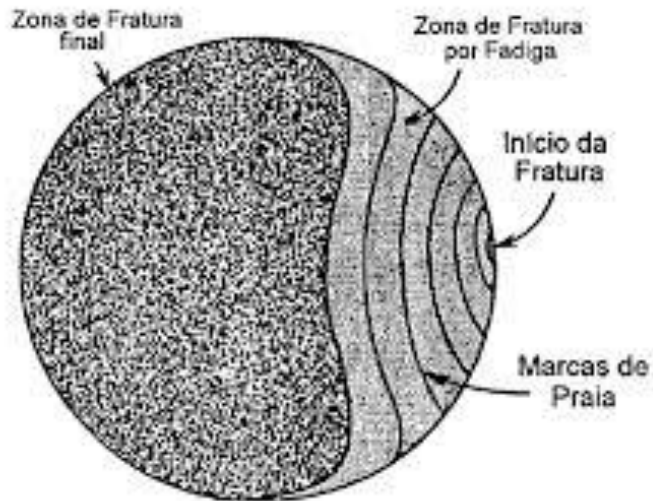




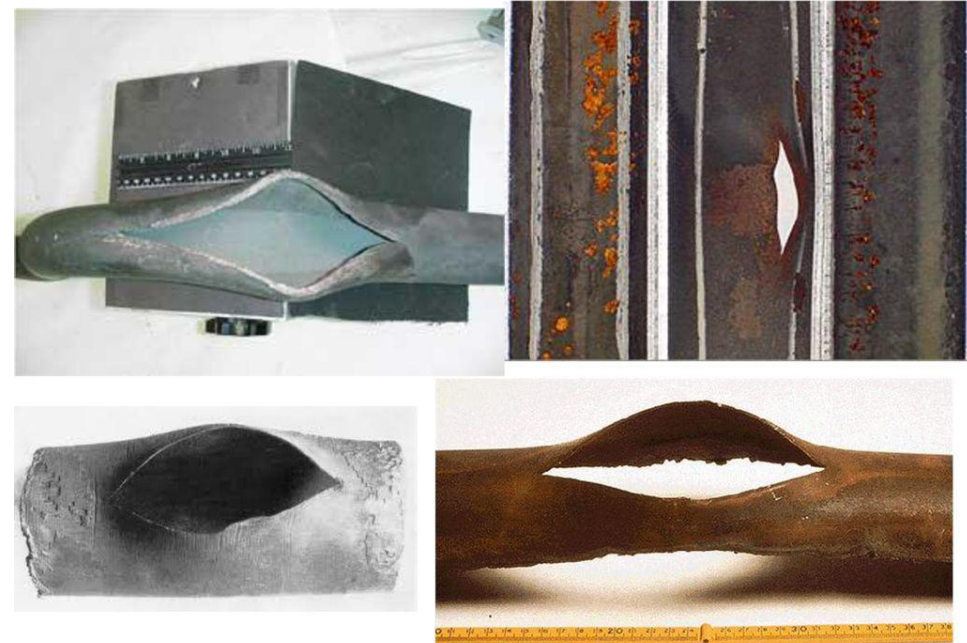
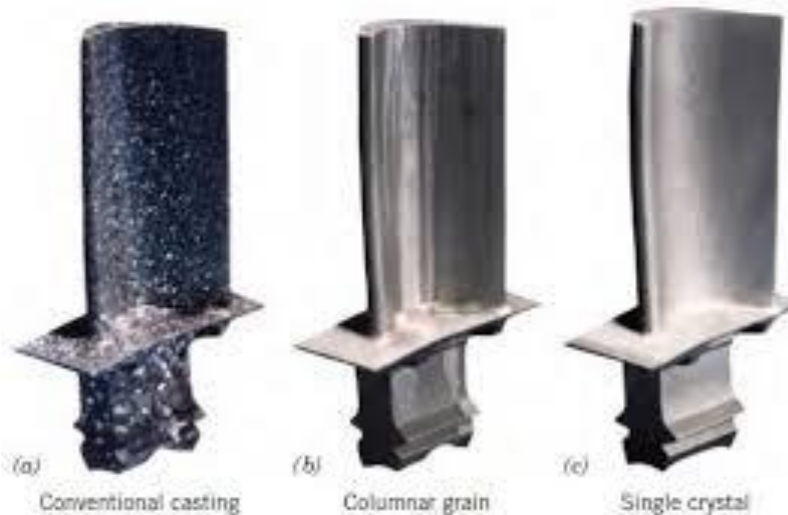
FALHAS EM MATERIAIS

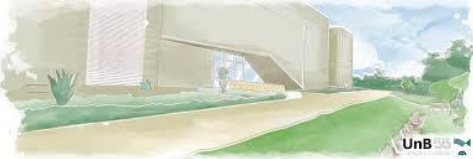
TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

FRATURA – FLUÊNCIA – FADIGA



Aspecto da ruptura por fluência





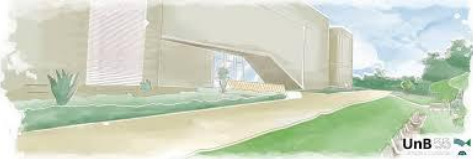
FALHAS EM MATERIAIS

TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

- A engenharia e ciência dos materiais tem papel importante na prevenção e análise de falhas em peças ou componentes mecânicos.

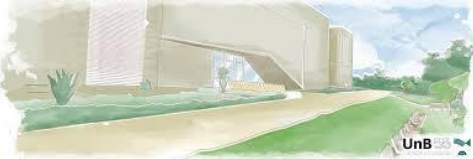


Fig. 9.2 Navio com fratura abrupta devida à fragilização do material. [Callister, 1994.]



FRATURA

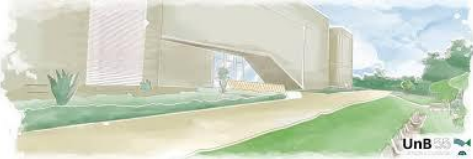
- Consiste na separação do material em duas ou mais partes devido à aplicação de uma carga estática à temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material



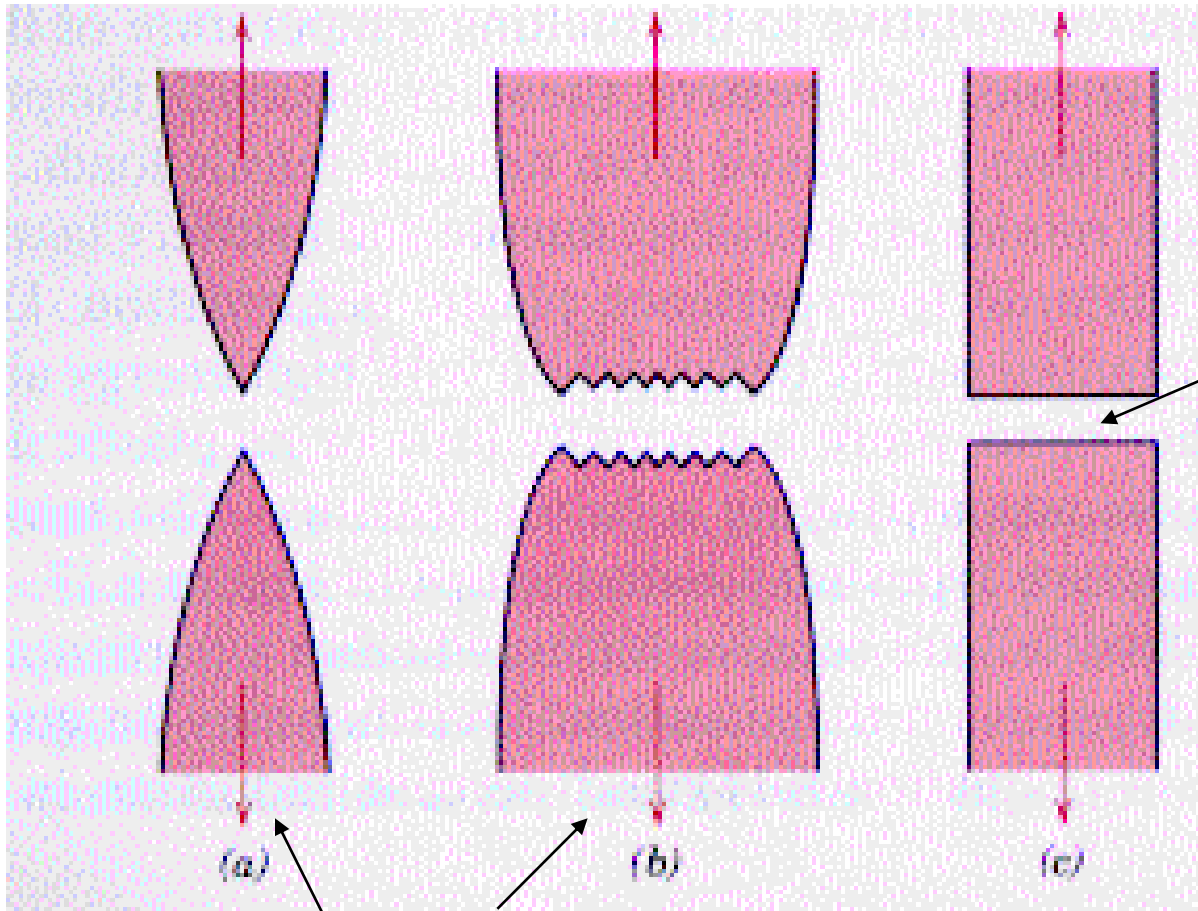
FRATURA

- **Dúctil** ➡ a deformação plástica continua até uma redução na área para posterior ruptura (É OBSERVADA EM MATERIAIS CFC)
- **Frágil** ➡ não ocorre deformação plástica, requerendo menos energia que a fratura dúctil que consome energia para o movimento de discordâncias e imperfeições no material (É OBSERVADA EM MATERIAIS CCC E HC)

O tipo de fratura que ocorre em um dado material depende da temperatura



FRATURA

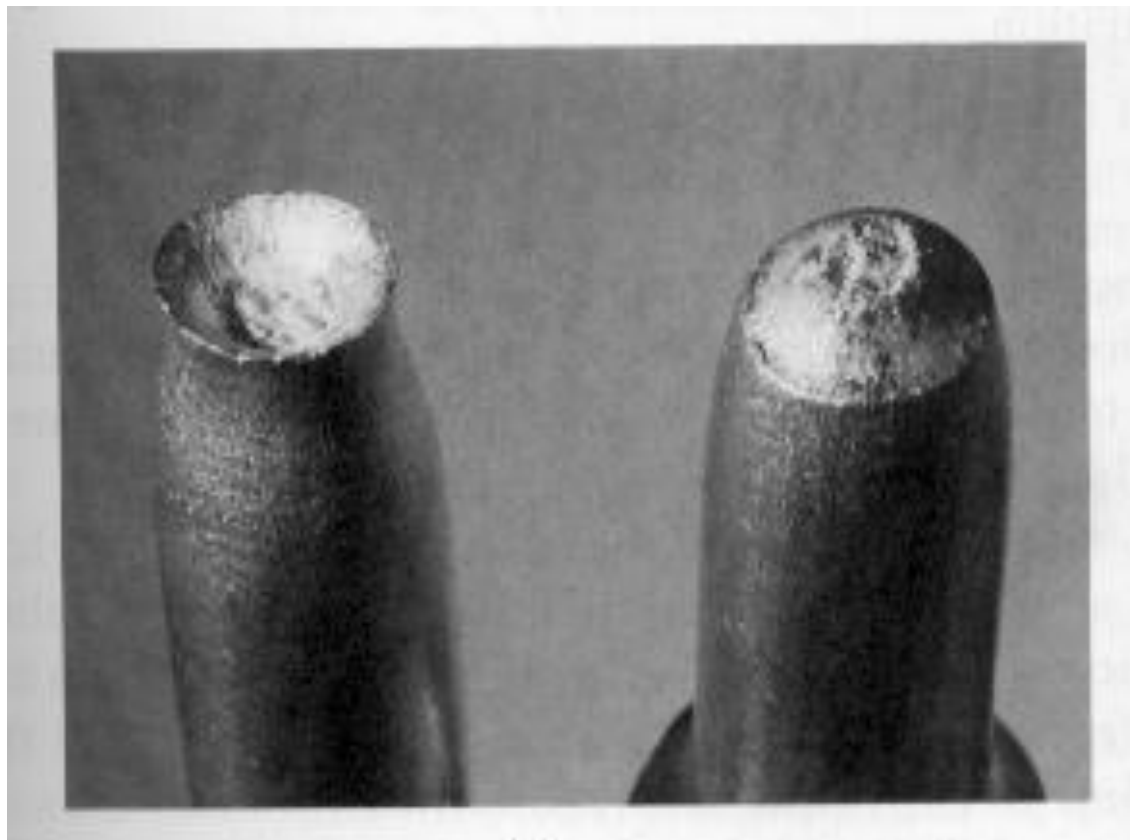


Fratura frágil

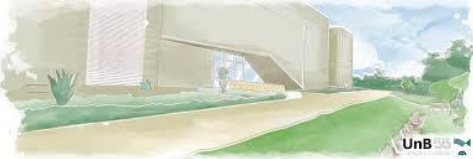
Fraturas dúcteis



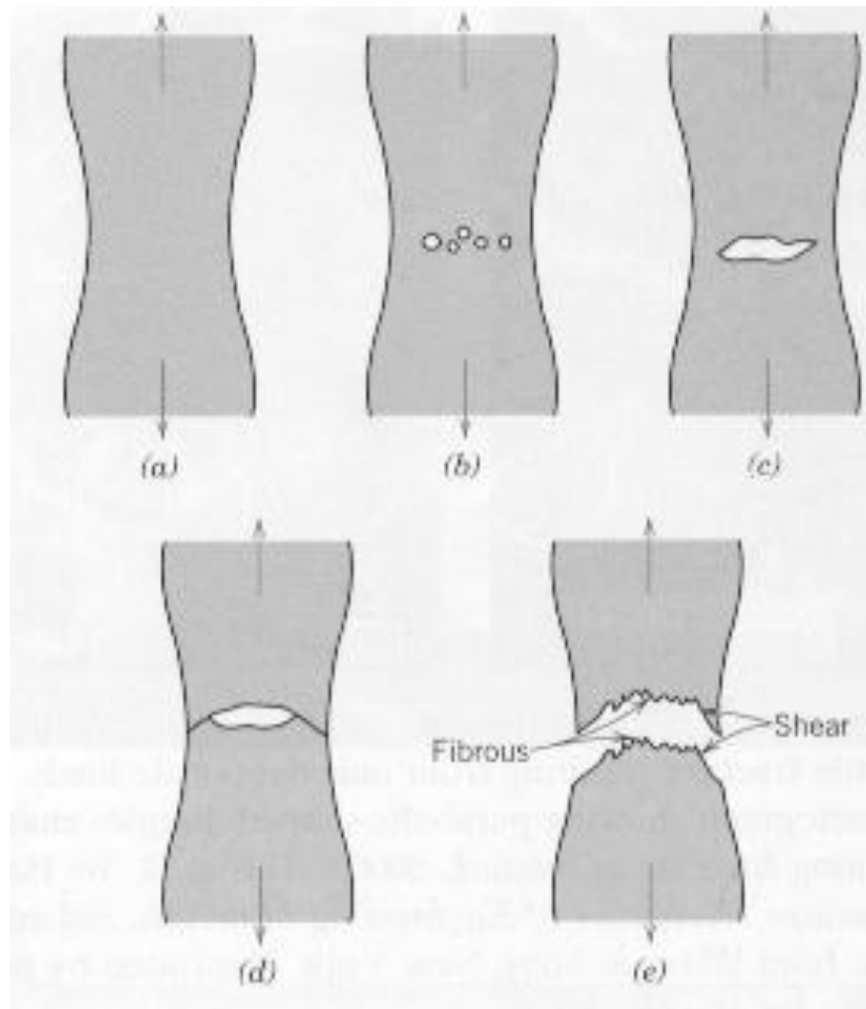
FRATURA DÚCTIL E ASPECTO MACROSCÓPICO



Fratura após ensaio de tração

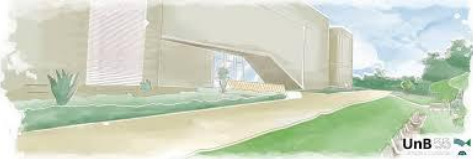


MECANISMO DA FRATURA DÚCTIL

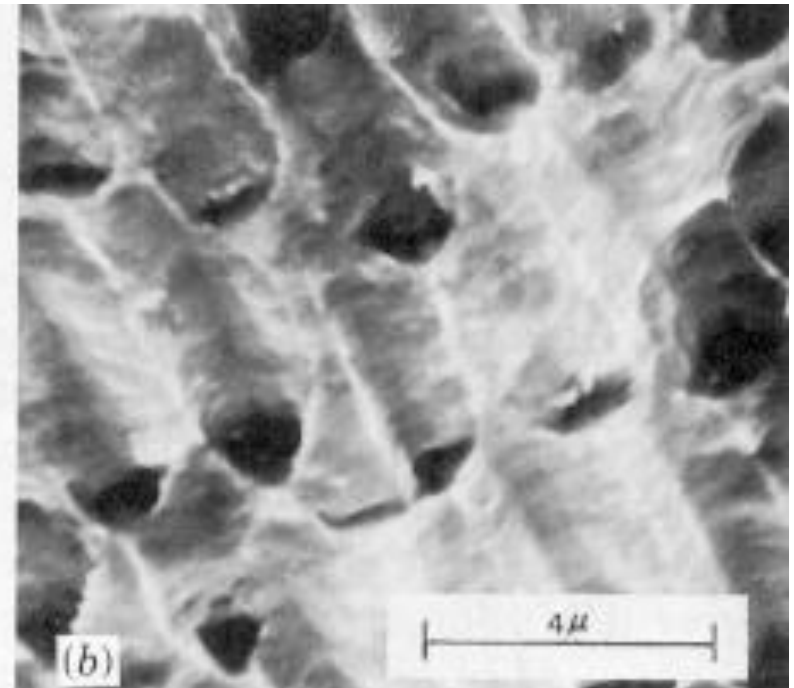
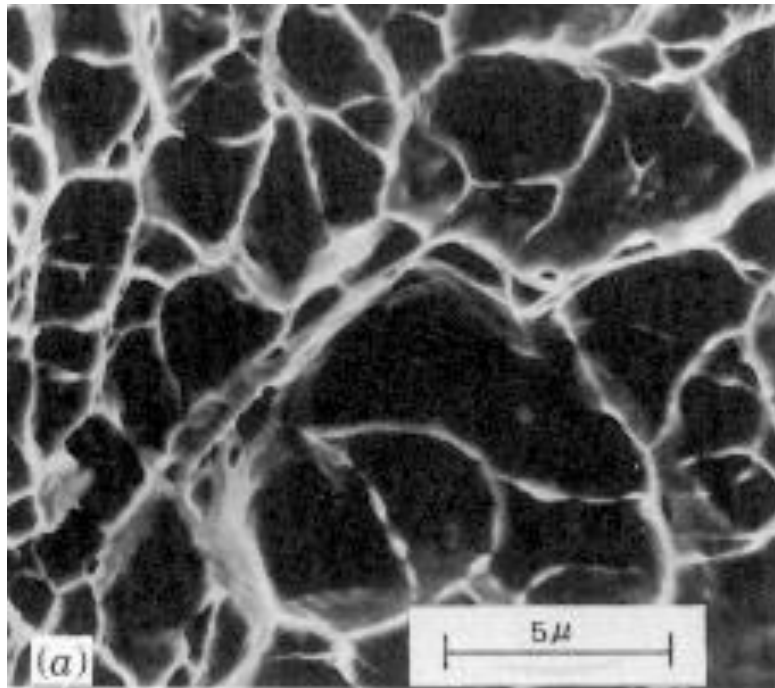


- a- formação do pescoço
- b- formação de cavidades
- c- coalescimento das cavidades para promover uma trinca ou fissura
- d- formação e propagação da trinca em um ângulo de **45 graus em relação à tensão aplicada**
- e- rompimento do material por propagação da trinca

Material dúctil submetido ao ensaio de tração



FRATURA DÚCTIL E ASPECTO MICROSCÓPICO

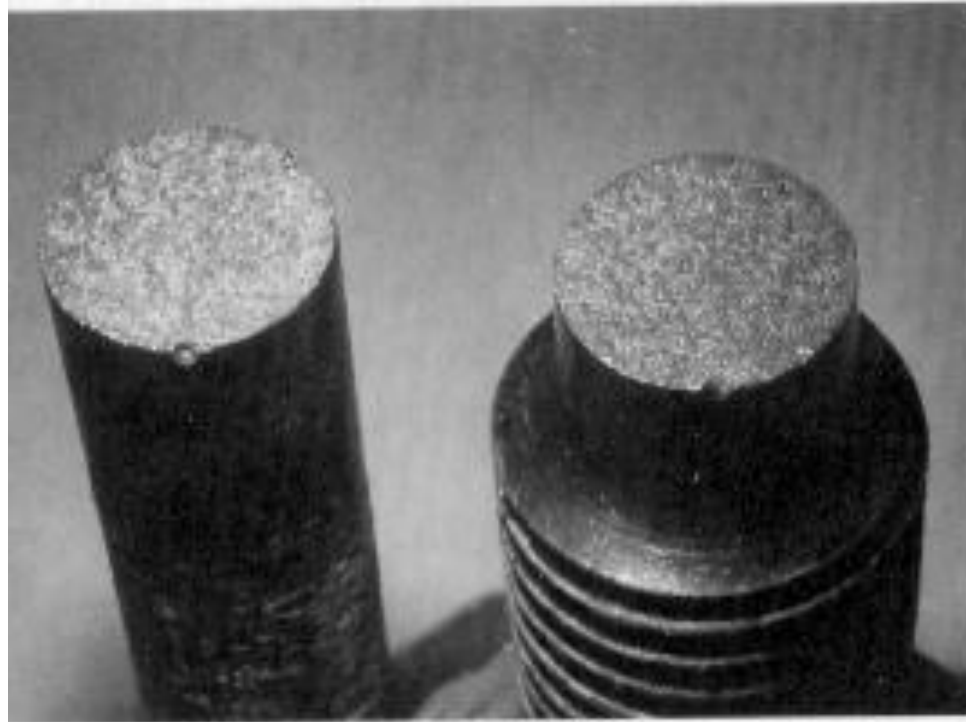




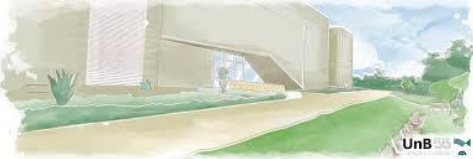
FRATURA FRÁGIL

ASPECTO MACROSCÓPICO

Material frágil submetido ao ensaio de tração



A fratura frágil ocorre com a formação e propagação de uma trinca que ocorre a uma direção perpendicular à aplicação da tensão

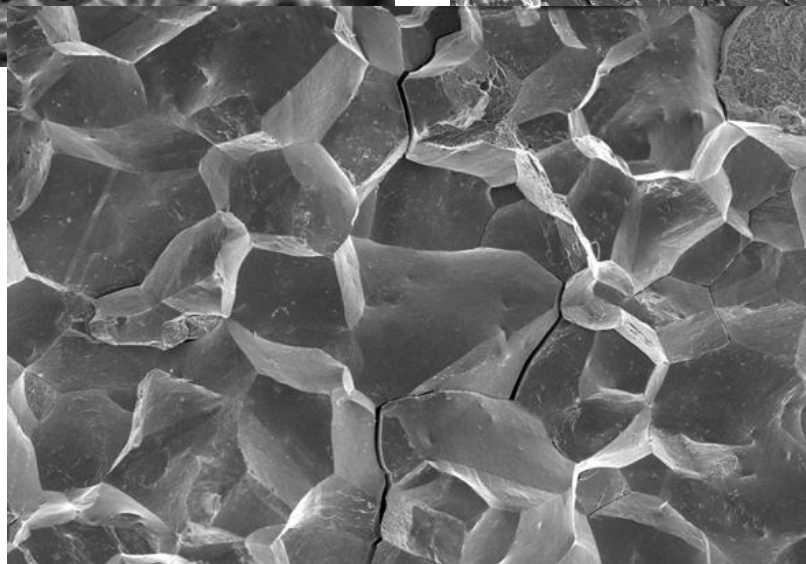
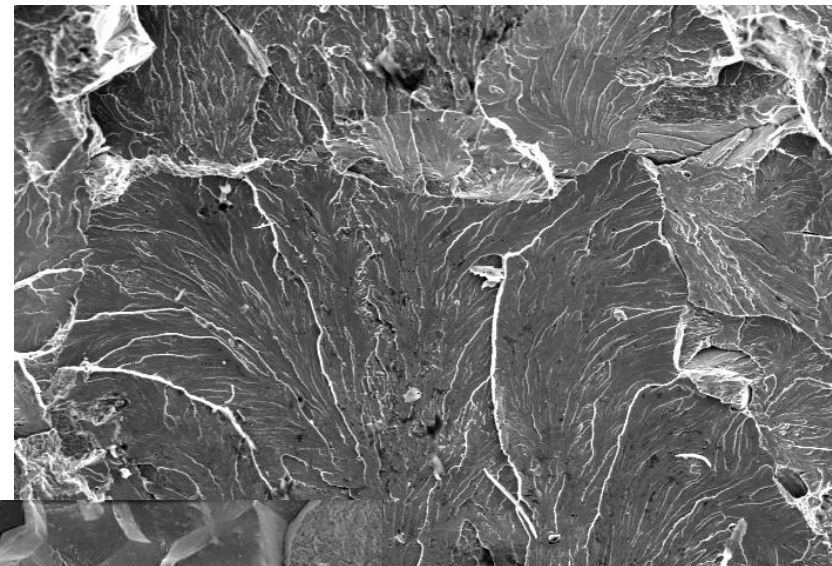
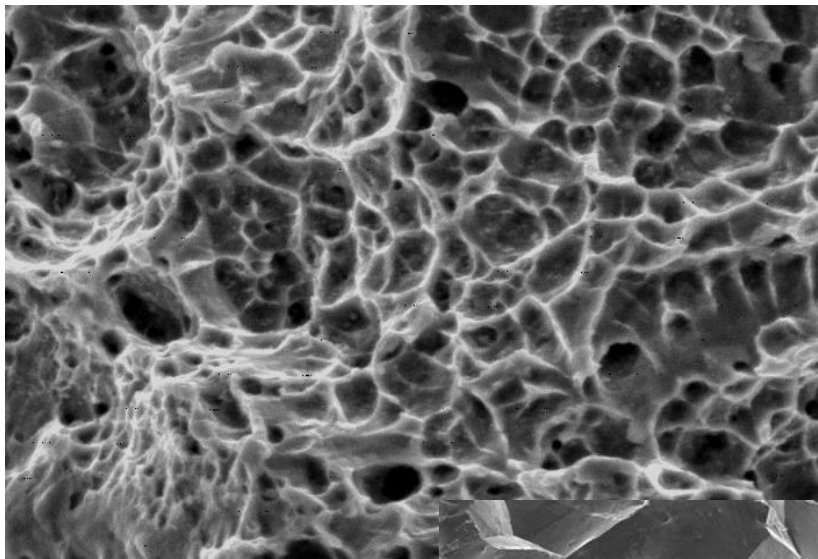


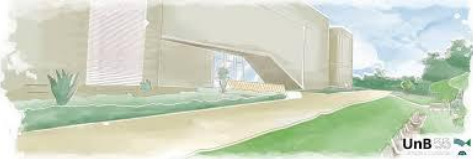
FALHAS EM MATERIAIS

TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



SUPERFÍCIES DE FRATURA





FRATURA FRÁGIL

ASPECTO MACROSCÓPICO

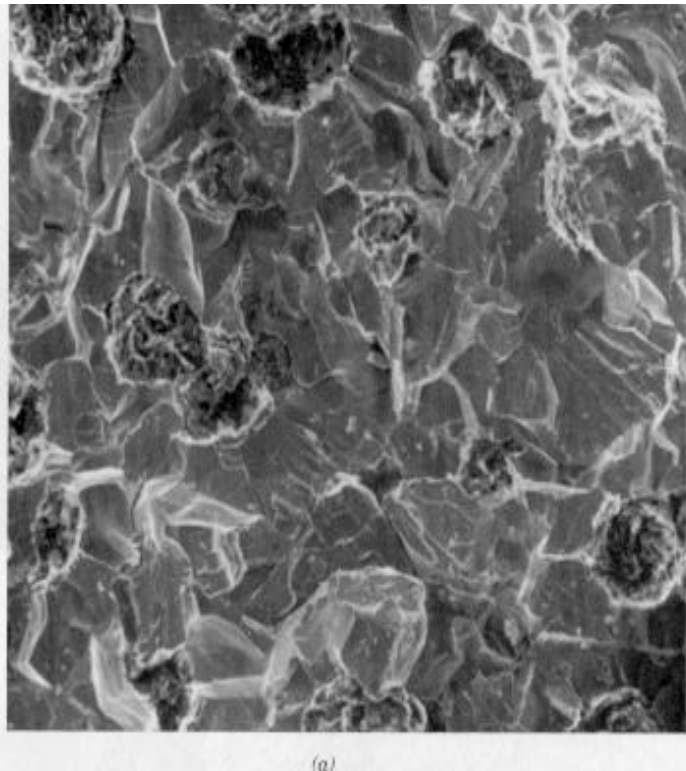
Início da fratura por formação de trinca





FRATURA TRANSGRANULAR E INTERGRANULAR

TRANSGRANULAR

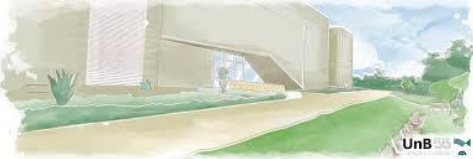


A fratura passa através do grão

INTERGRANULAR



A fratura se dá no contorno de grão



FALHAS EM MATERIAIS

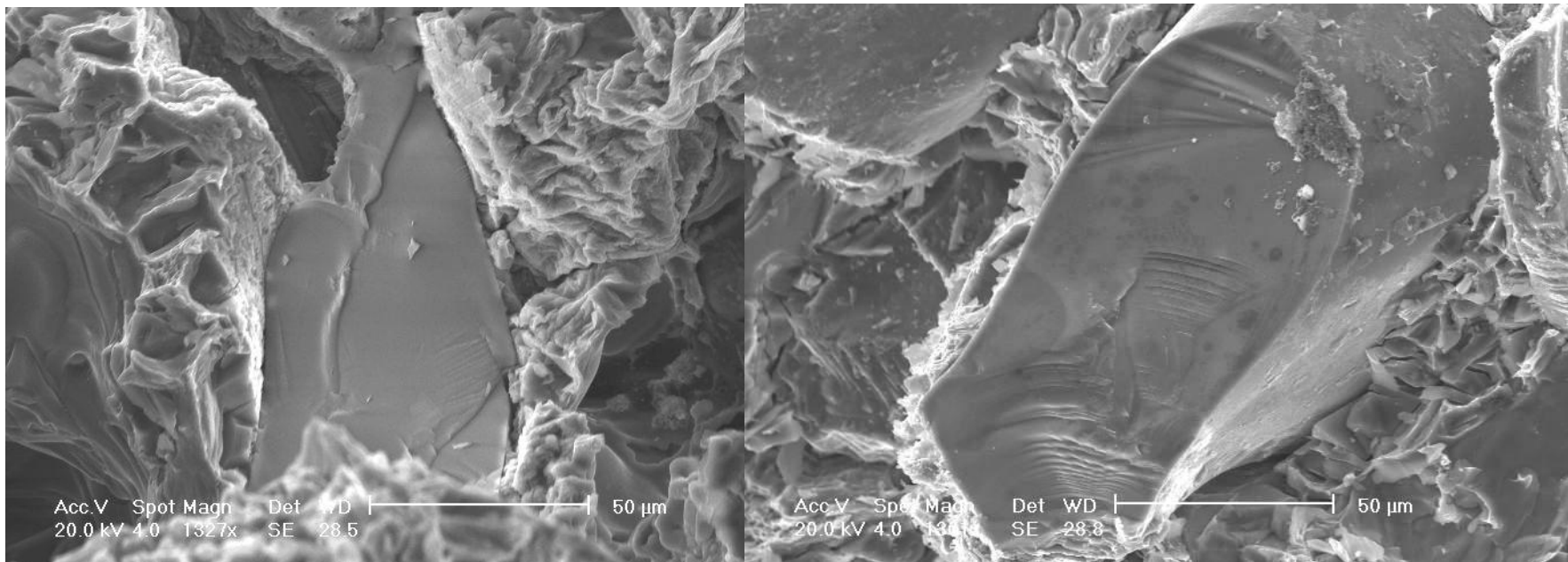
TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



EXEMPLO DE FRATURA SOB TRAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Ex: Liga de alumínio reforçada com partículas de SiC e Al₂O₃

Fratura: dúctil+frágil



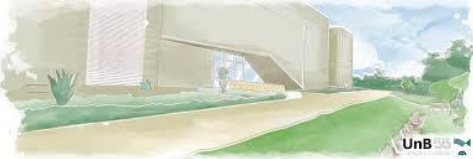
A fratura da partícula se dá por **clivagem**, ou seja, ocorre ao longo de planos cristalográficos específicos



CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

- A resistência a fratura depende da coesão entre os átomos
- Segundo a teoria a **resistência coesiva** para um material frágil **= $E/10$**
- Na prática é entre 10-1000 X menor
- A.A. Griffith (1920) explicou essa diferença: a presença de microdefeitos ou microtrincas presentes no material faz com que as tensões sejam amplificadas.

A magnitude da amplificação depende da orientação e da geometria da trinca.



FALHAS EM MATERIAIS

TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

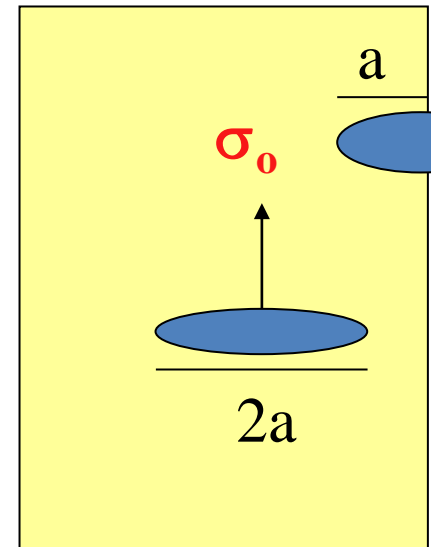
MICROTRINCA COM FORMATO ELIPTICO, ORIENTADA PERPENDICULARMENTE À TENSÃO APLICADA, A TENSÃO MÁXIMA (σ_m) NA EXTREMIDADE DA TRINCA É DADA POR:

$$\sigma_m = \sigma_o (1 + 2 (a/\rho_e)^{1/2})$$

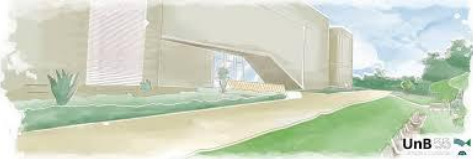
σ_o = tensão nominal

a = comprimento da trinca superficial ou metade da trinca interna

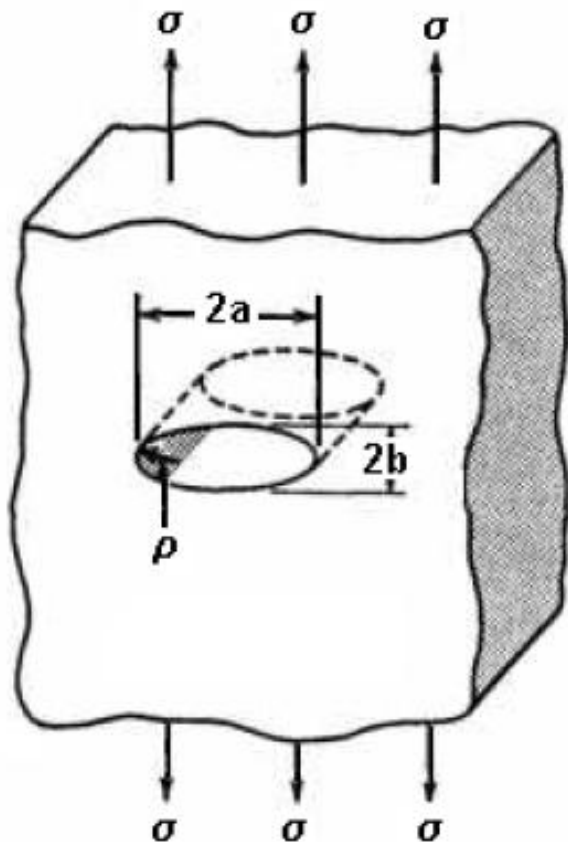
ρ_e = raio de curvatura da extremidade da trinca



Para uma trinca muito longa e com pequeno raio de curvatura, $(a/\rho_e)^{1/2}$ será muito grande, logo: $\sigma_m = 2 \sigma_o (a/\rho_e)^{1/2}$



CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO



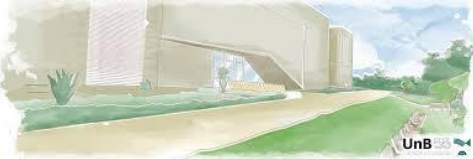
$$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_a = 1 + 2a/b$$

- $\sigma_{\text{máx}}$ é a tensão máxima nas extremidades do defeito.
- σ_a é a tensão aplicada
- a é o semi-eixo normal ao carregamento,
- b é o semi-eixo paralelo à direção de carregamento.

$$\rho = b^2 / a$$

Como na maioria dos casos $a \gg \rho$, então:

$$\sigma_{\text{máx}} = 2 \cdot \sigma_a (a/\rho)^{0,5}$$

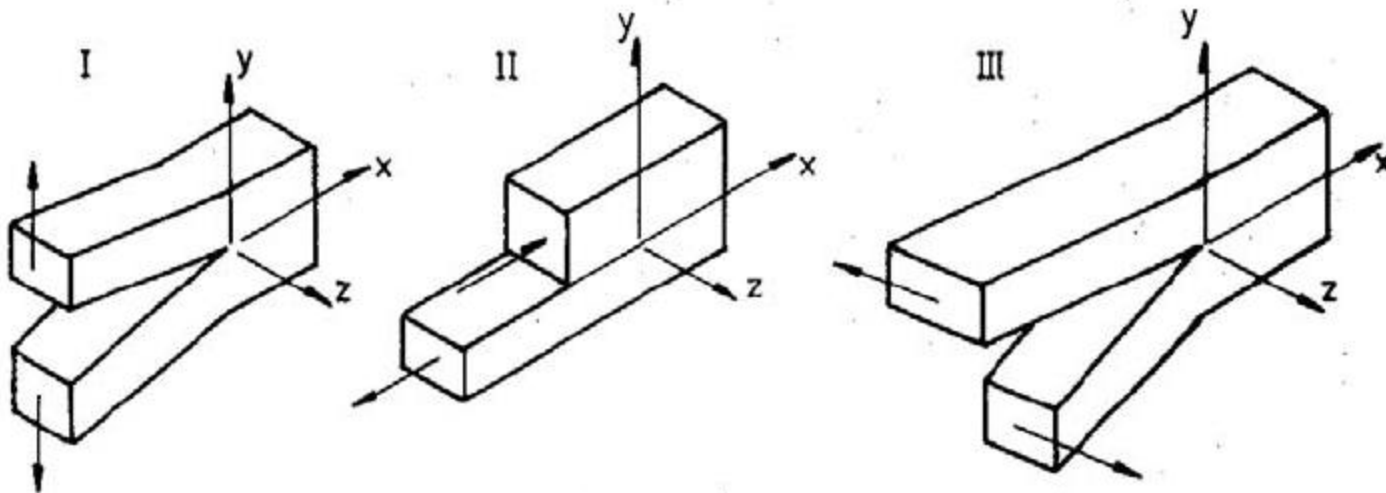


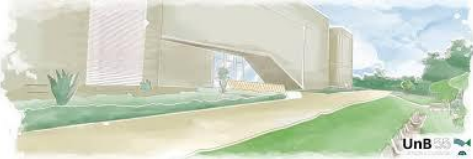
FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES (K_e)

$$K_e = \sigma_m / \sigma_o = 2 (a/\rho_e)^{1/2}$$

K_e mede o grau com que uma tensão é amplificada na extremidade da trinca

K é governado pela configuração geométrica do componente trincado e pelo nível e modo do carregamento imposto

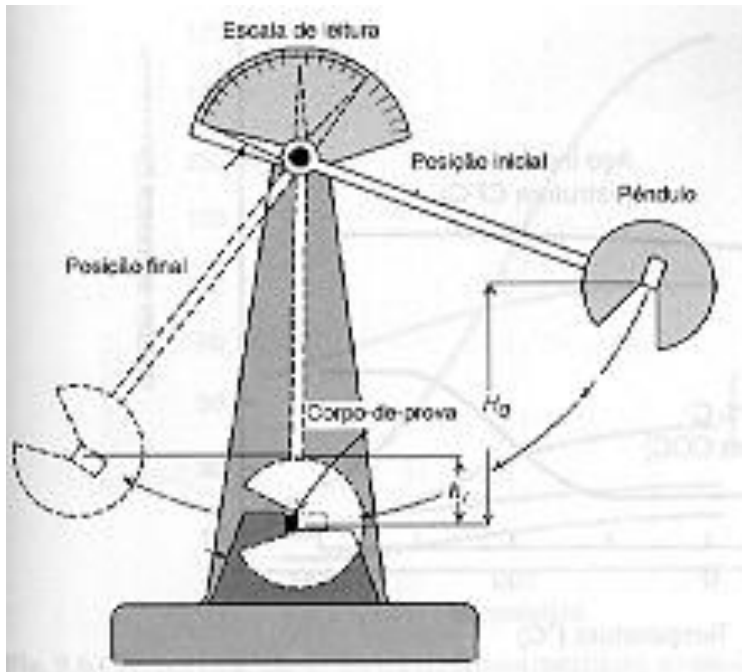




FALHAS EM MATERIAIS

TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

ENSAIOS DE FRATURA POR IMPACTO (*Charpy – EUA*)



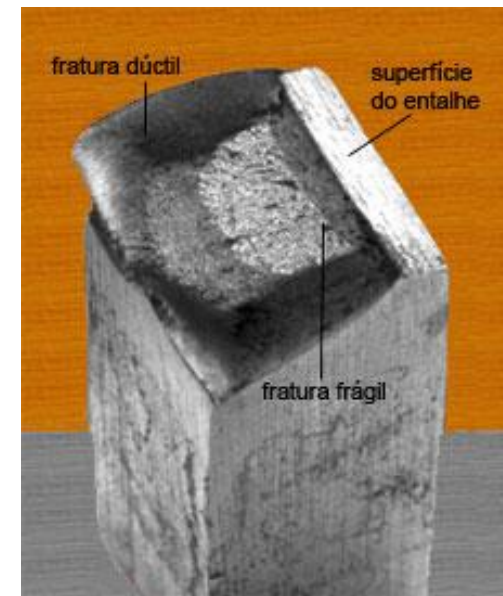
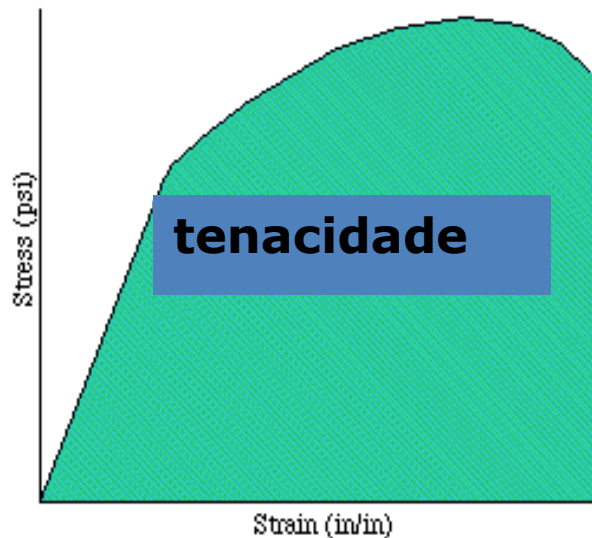
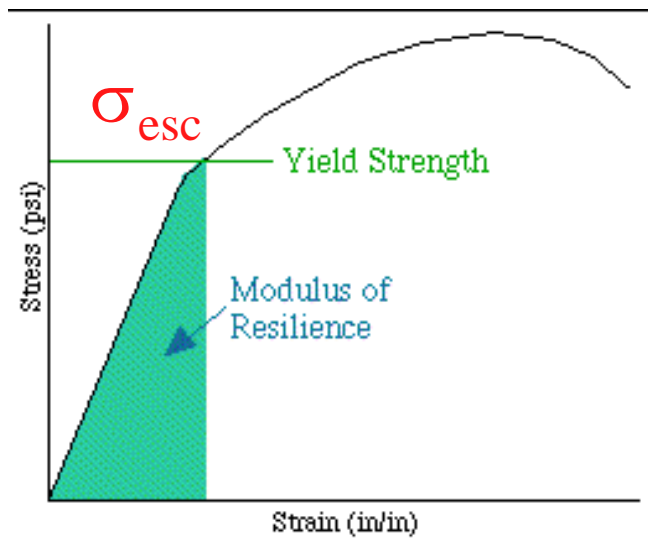
O ensaio de resistência ao choque caracteriza o comportamento dos materiais quanto a transição do comportamento dúctil para frágil em função da temperatura

Foram criados antes do desenvolvimento da “mecânica da fratura”



ENSAIOS DE FRATURA POR IMPACTO

Medem a energia absorvida no impacto por área



MAT. DÚCTEIS

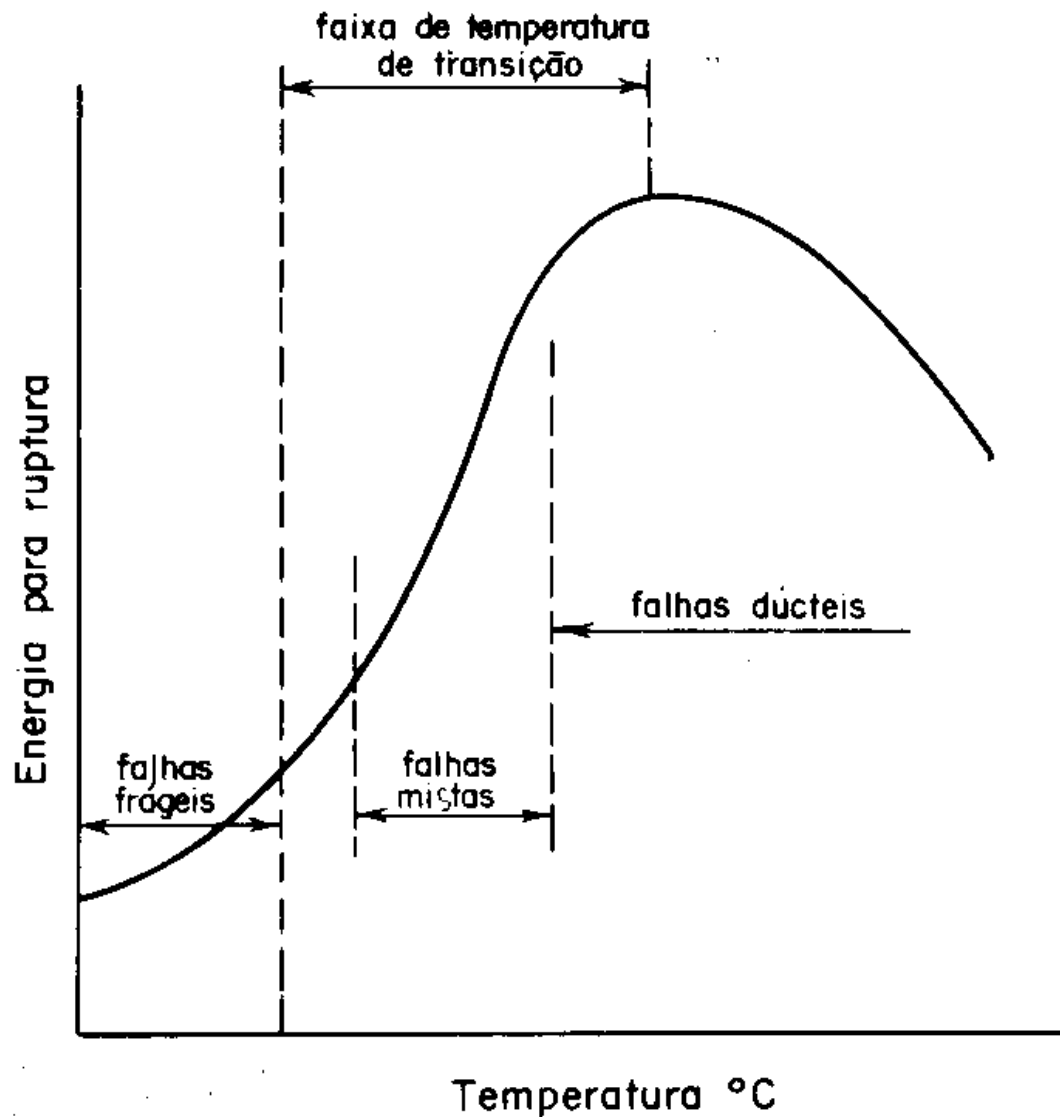
$$U_t = (\sigma_{esc} + \sigma_{LRT})/2 \cdot \epsilon_f$$

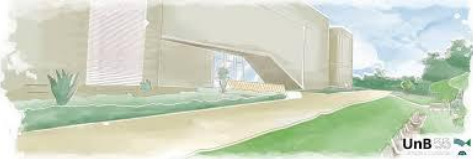
MAT. FRÁGEIS

$$U_t = 2/3 \cdot (\sigma_{LRT} \cdot \epsilon_f)$$

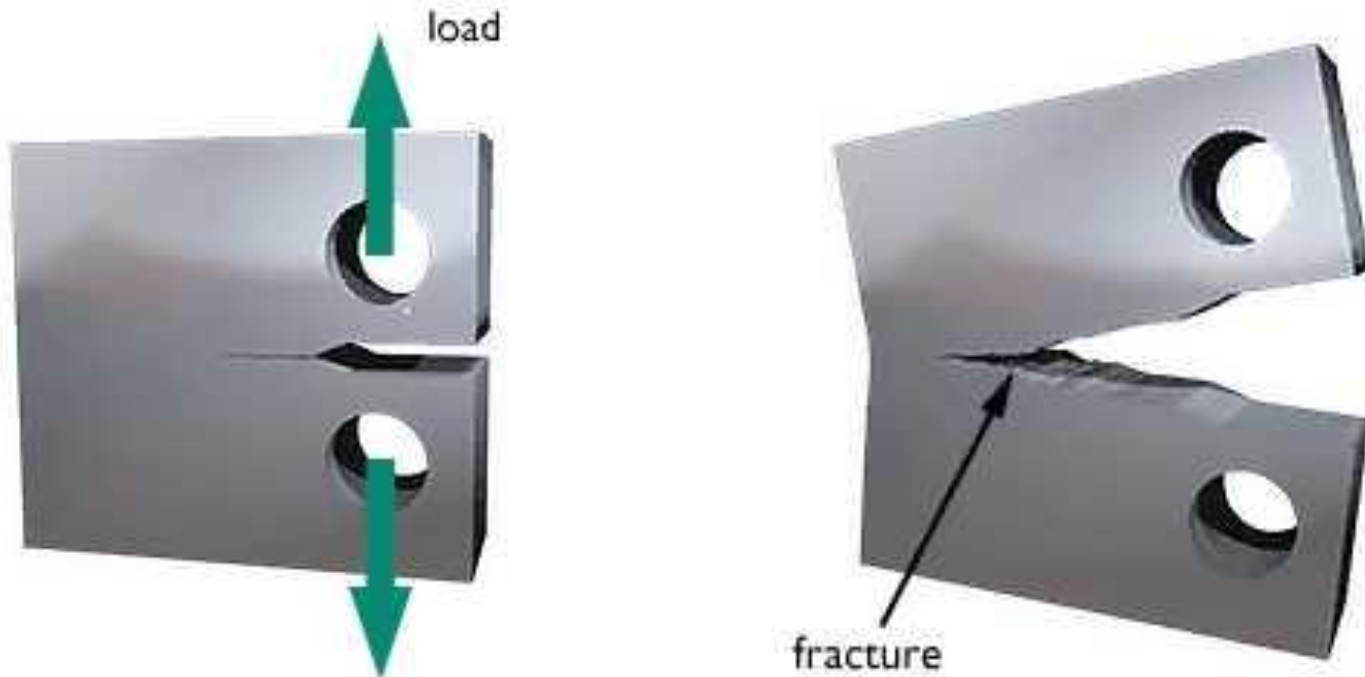
em N.m/m³

dependência com a temperatura

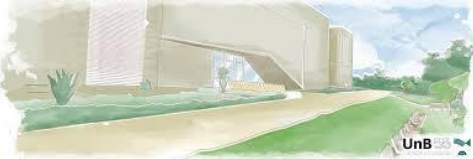




ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA

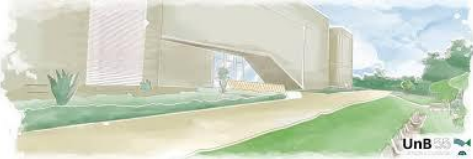


A tenacidade é avaliada comparando-se as curvas para diferentes materiais com diferentes comprimentos de trincas



FLUÊNCIA (*CREEP*)

- Quando um metal é solicitado por uma carga, imediatamente sofre uma deformação elástica. Com a aplicação de uma carga constante, a deformação plástica progride lentamente com o tempo (fluência) até haver um estrangulamento e ruptura do material
- Velocidade de fluência (relação entre deformação plástica e tempo) aumenta com a temperatura
- Esta propriedade é de grande importância especialmente na escolha de materiais para operar a altas temperaturas



FLUÊNCIA (*CREEP*)

- Então, fluência é definida como a deformação permanente, dependente do tempo e da temperatura, quando o material é submetido à uma carga constante
- Este fator muitas vezes limita o tempo de vida de um determinado componente ou estrutura
- Este fenômeno é observado em todos os materiais, e torna-se importante à altas temperaturas ($0,4T_F$)



FLUÊNCIA (*CREEP*)

FATORES QUE AFETAM A FLUÊNCIA

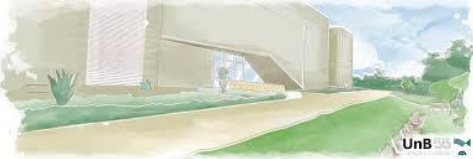
- Temperatura
- Módulo de elasticidade
- Tamanho de grão

Por quê um tamanho de grão grande favorece uma maior resistência à fluência?

Em geral:

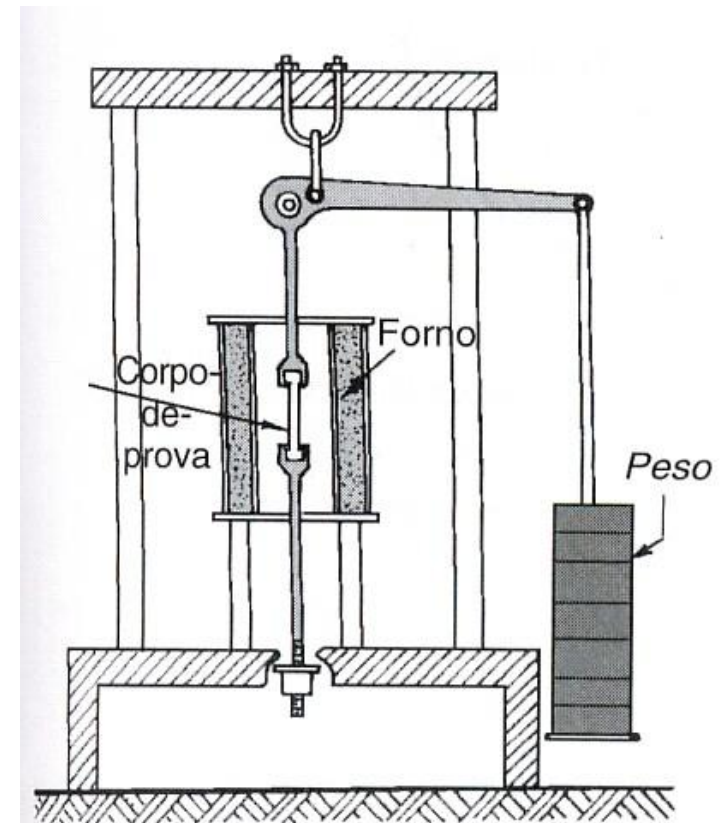
“Quanto maior o ponto de fusão, maior o módulo de elasticidade e maior é a resistência à fluência”.

“Quanto maior o tamanho de grão maior é a resistência à Fluência”.

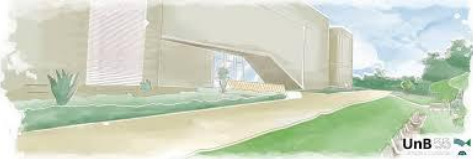


ENSAIO DE FLUÊNCIA

- É executado pela aplicação de uma carga uniaxial constante a um corpo de prova de mesma geometria dos utilizados no ensaio de tração, a uma temperatura elevada e constante
- O tempo de aplicação de carga é estabelecido em função da vida útil esperada do componente
- **Mede-se as deformações ocorridas em função do tempo ($\epsilon \times t$)**



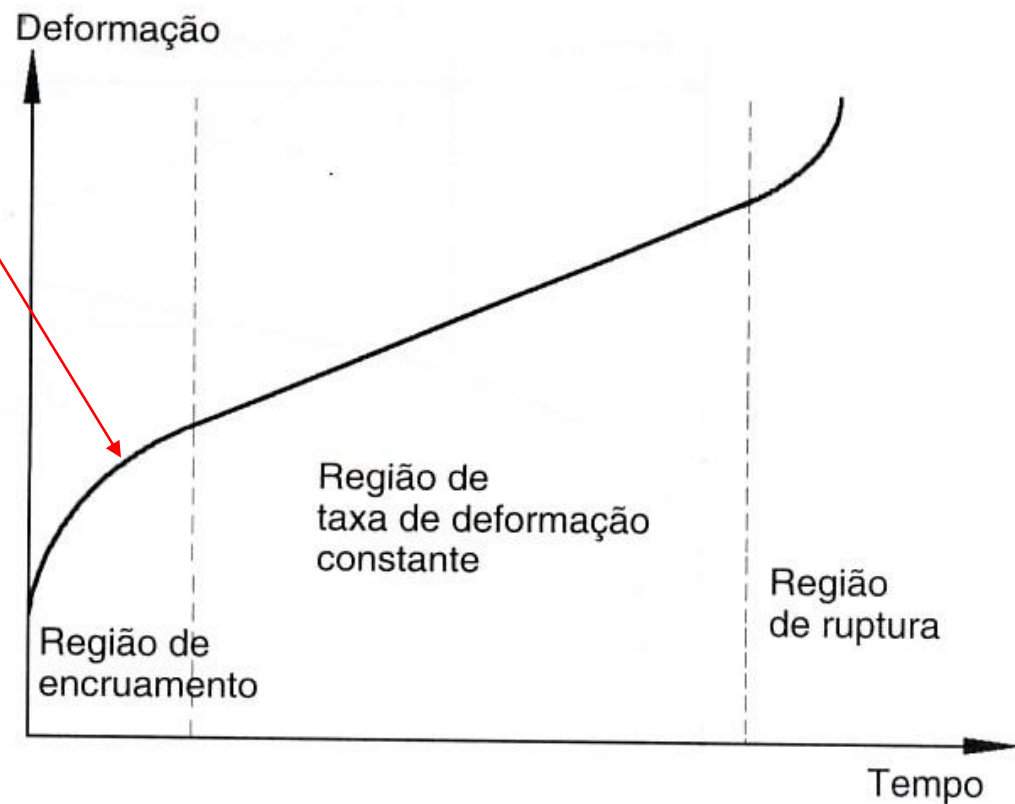
(A) Aparelho de fluência



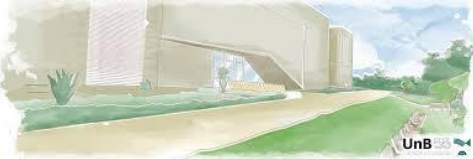
Curva $\epsilon \times t$

$\epsilon = d\epsilon/dt$
diminui

- **Estágio primário:** ocorre um decréscimo contínuo na taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$), ou seja, a inclinação da curva diminui com o tempo devido ao aumento da resistência por encruamento.

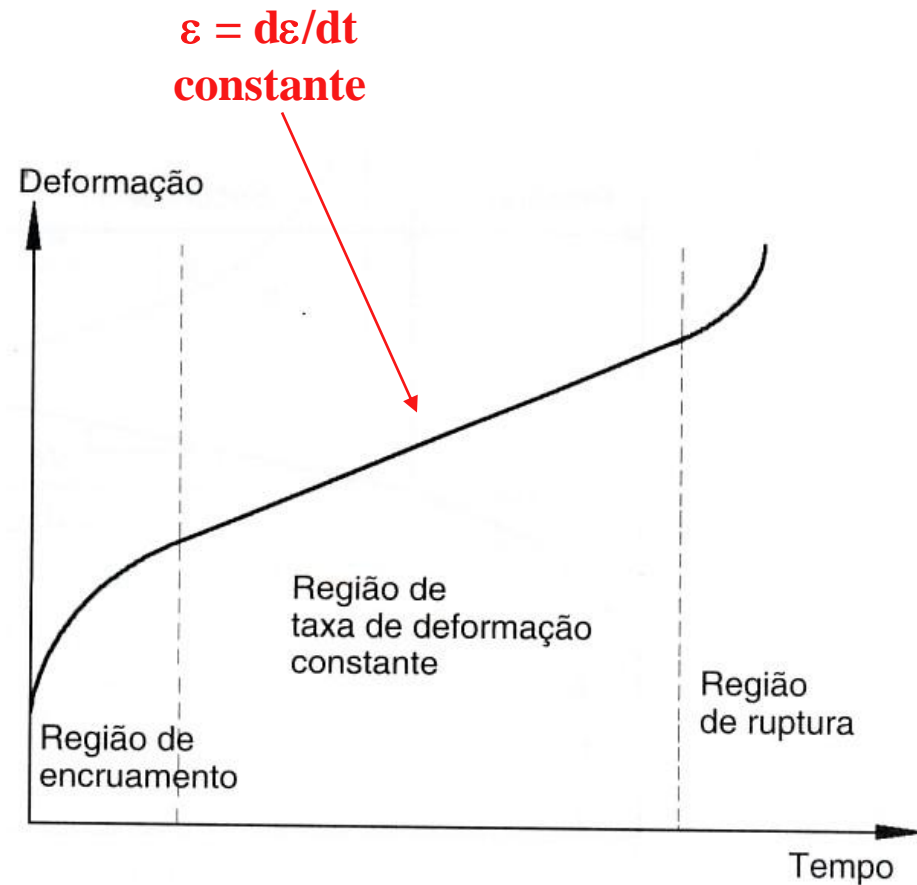


(B) Curva típica do ensaio de fluência

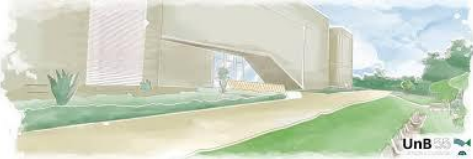


Curva $\epsilon \times t$

- **Estágio secundário:** a taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$) é constante (comportamento linear). A inclinação da curva constante com o tempo é devido à 2 fenômenos competitivos: **encruamento e recuperação**.
- O valor médio da taxa de fluência nesse estágio é chamado de **taxa mínima de fluência** (ϵ_m), que é um dos parâmetros mais importantes a se considerar em projeto de componentes que deseja-se vida longa.

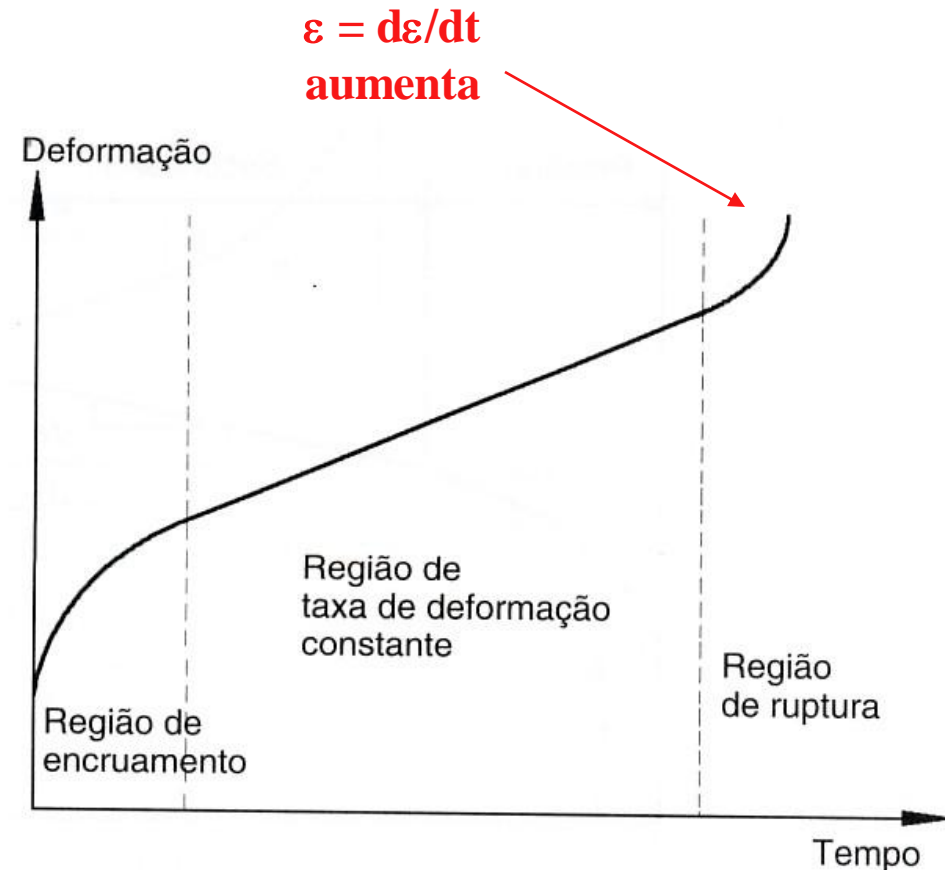


(B) Curva típica do ensaio de fluência



Curva $\epsilon \times t$

- **Estágio terciário:** ocorre uma aceleração na taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$) que culmina com a ruptura do corpo de prova.
- A ruptura ocorre com a separação dos contornos de grão, formação e coalescimento de trincas, conduzindo a uma redução de área localizada e conseqüente aumento da taxa de deformação

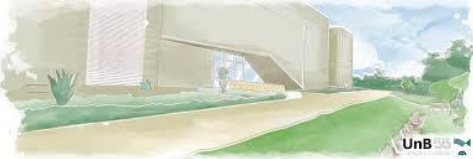


(B) Curva típica do ensaio de fluência



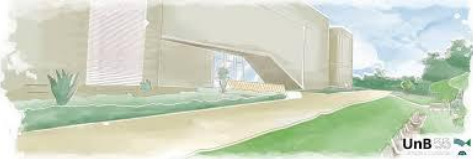
FADIGA

- É a forma de falha ou ruptura que ocorre nas estruturas sujeitas à forças dinâmicas e cíclicas
- Nessas situações o material rompe com tensões muito inferiores à correspondente à resistência à tração (determinada para cargas estáticas)
- É comum ocorrer em estruturas como pontes, aviões, componentes de máquinas
- A falha por fadiga é geralmente de natureza frágil mesmo em materiais dúcteis.



FADIGA

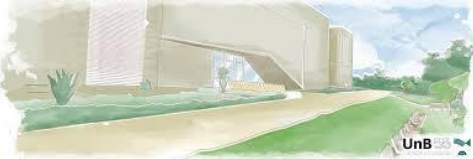
- A fratura ou rompimento do material por fadiga geralmente ocorre com a formação e propagação de uma trinca.
- A trinca inicia-se em pontos onde há imperfeição estrutural ou de composição e/ou de alta concentração de tensões (que ocorre geralmente na superfície)
- A superfície da fratura é geralmente perpendicular à direção da tensão à qual o material foi submetido



FADIGA

Os esforços alternados que podem levar à fadiga podem ser:

- Tração
- Tração e compressão
- Flexão
- Torção,...

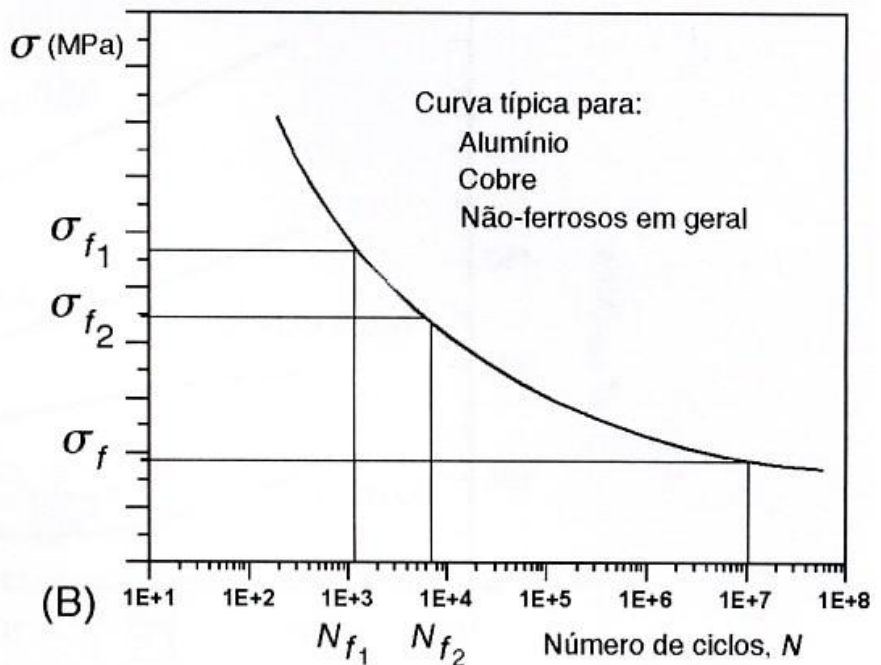
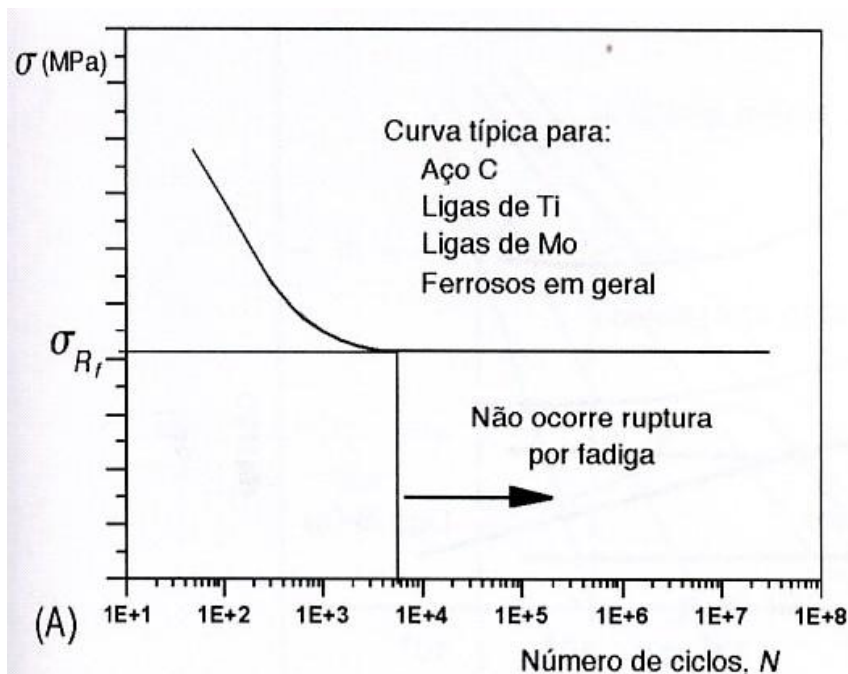


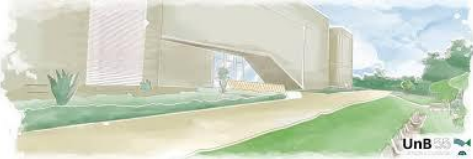
RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA

CURVA σ -N OU CURVA WOHLER

A CURVA σ -N REPRESENTA A TENSÃO VERSUS NÚMERO DE CICLOS PARA QUE OCORRA A FRATURA.

Normalmente para N utiliza-se escala logarítmica

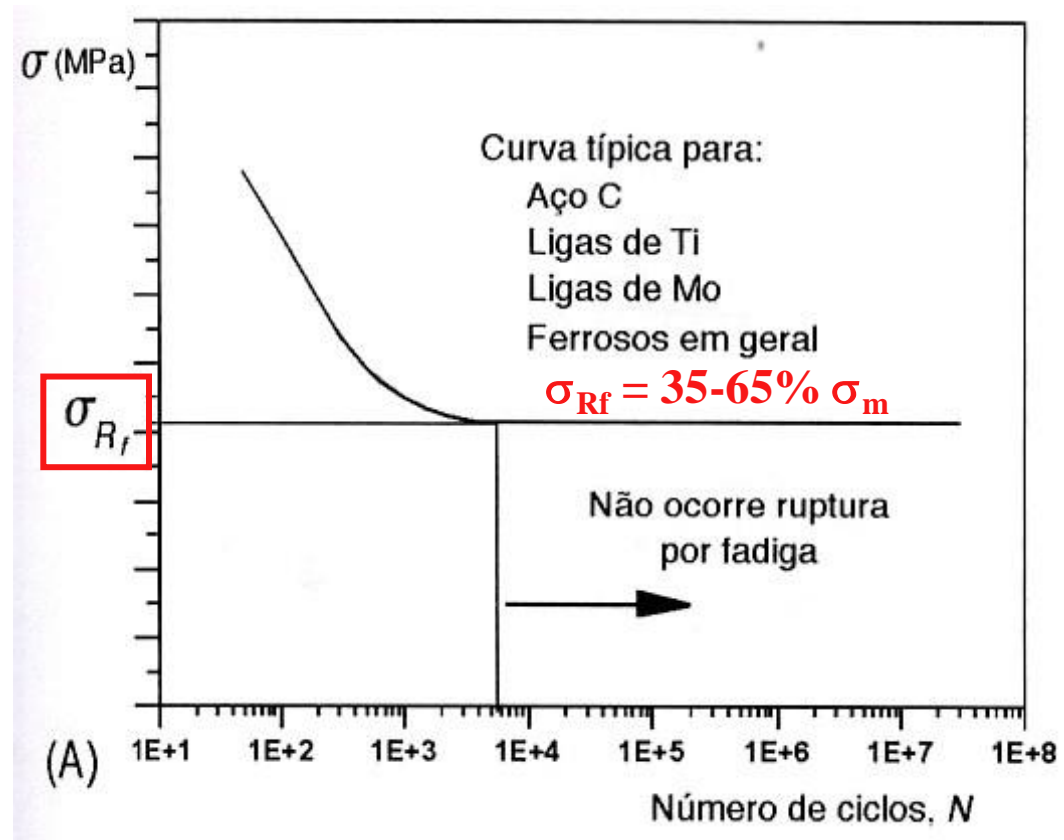




PRINCIPAIS RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA

Limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}): em certos materiais (aços, titânio,...) abaixo de um determinado limite de tensão abaixo do qual o material nunca sofrerá ruptura por fadiga.

Para os aços o limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}) está entre **35-65%** do limite de resistência à tração.





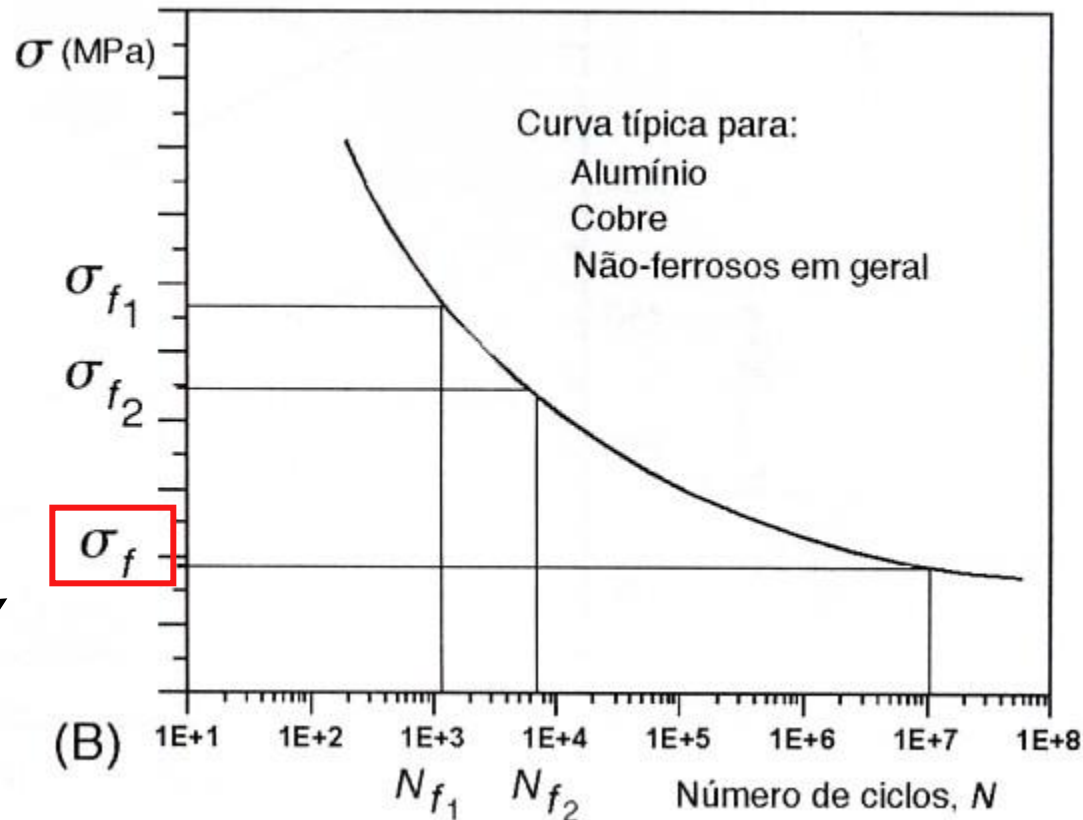
PRINCIPAIS RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA

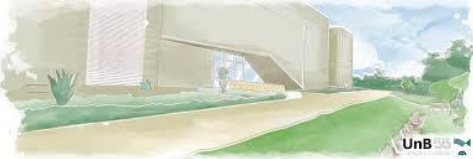
Resistência à fadiga

(σ_f): em alguns materiais a tensão na qual ocorrerá a falha decresce continuamente com o número de ciclos (ligas não ferrosas: Al, Mg, Cu,...). Nesse caso a fadiga é caracterizada por **resistência à fadiga** (σ_f)



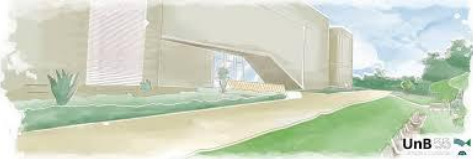
Que corresponde à tensão na qual ocorre a ruptura p/ um no. arbitrário de ciclos (em geral 10^7 - 10^8 ciclos)





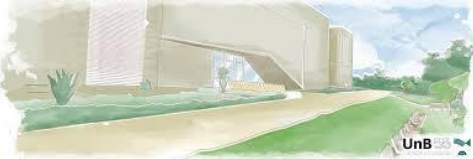
PRINCIPAL RESULTADO DO ENSAIO DE FADIGA

- **Vida em fadiga (N_f):** corresponde ao número de ciclos necessários para ocorrer a falha em um nível de tensão específico.



FATORES QUE INFLUENCIAM A VIDA EM FADIGA

- ⌘ **Tensão Média:** o aumento do nível médio de tensão leva a uma diminuição da vida útil
- ⌘ **Efeitos de Superfície:** variáveis de projeto (cantos agudos e demais descontinuidades podem levar a concentração de tensões e então a formação de trincas) e tratamentos superficiais (polimento, jateamento, endurecimento superficial melhoram significativamente a vida em fadiga)
- ⌘ **Efeitos do ambiente:** **fadiga térmica** (flutuações na temperatura) e **fadiga por corrosão** (ex. pites de corrosão podem atuar como concentradores de tensão)



FALHAS EM MATERIAIS

TEORIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

