



CECS

*Centro de Engenharia, Modelagem
e Ciências Sociais Aplicadas*

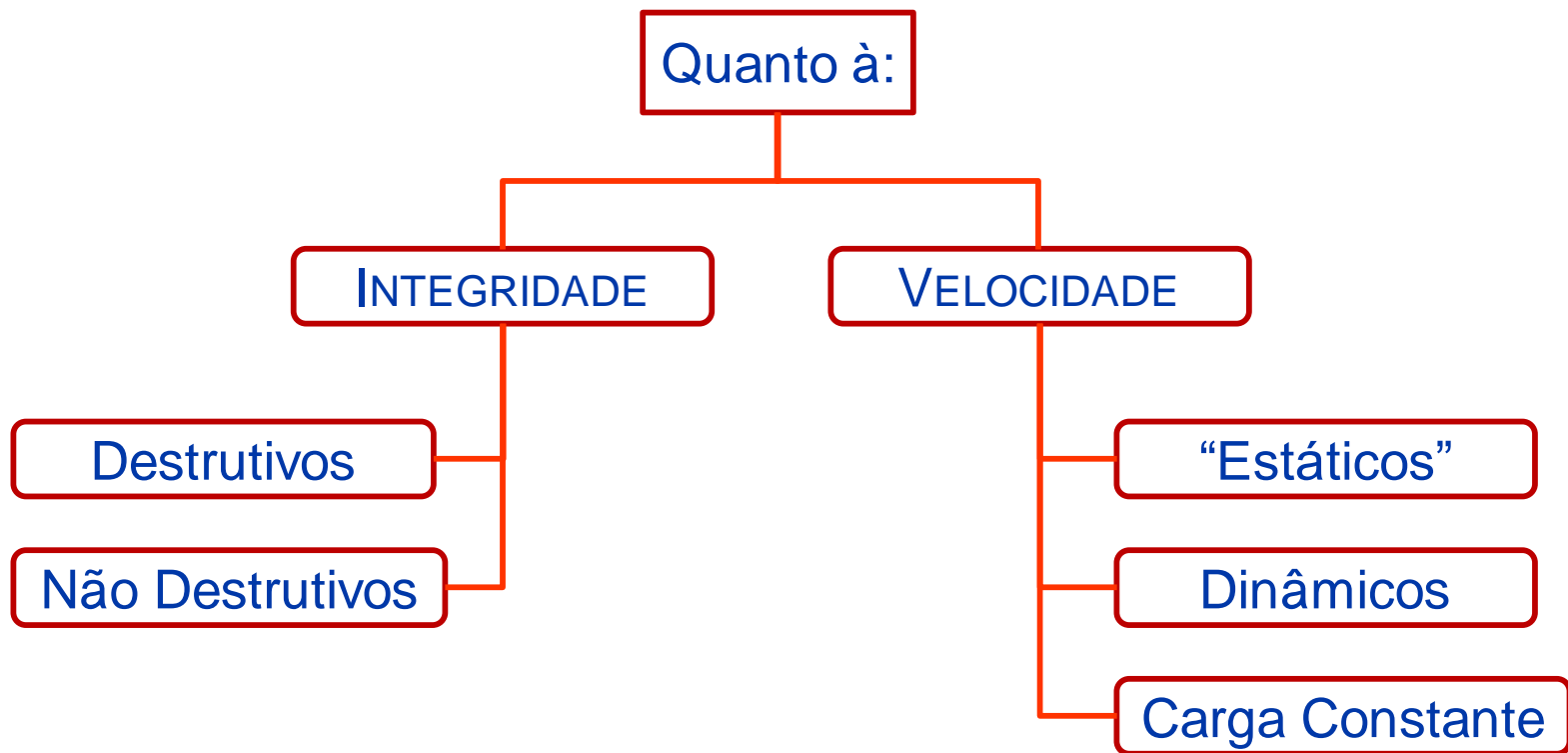
BC1105 Materiais e Suas Propriedades

3º Quadrimestre de 2016

Comportamento Mecânico dos Materiais – Parte 2

Erika Fernanda Prados
erika.prados@ufabc.edu.br

Classificação dos testes mecânicos



Aspecto da velocidade

➤ Estáticos

Carga relativamente lenta

Ex: Tração, Compressão, Dureza, Torção, Flexão

➤ Dinâmicos

Carga rápida ou cíclica.

Ex: Fadiga, Impacto

➤ Carga Constante

Carga aplicada durante um longo período.

Ex: Fluência

RESISTÊNCIA AO IMPACTO – comportamento do material submetido a tensão em tempos muito curtos.

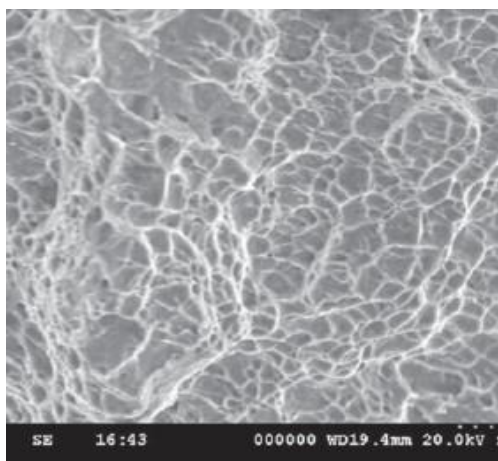
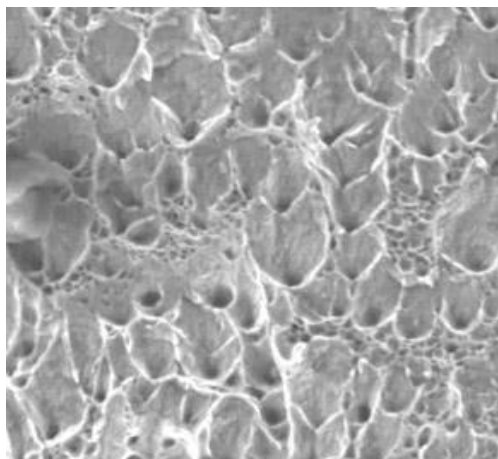
RESISTÊNCIA A FADIGA - comportamento do material submetido a tensões cíclicas inferiores ao limite de escoamento.

FLUÊNCIA – comportamento do material submetido a tensão inferior ao limite de escoamento por tempos longos e temperaturas elevadas quando o material é metálico.

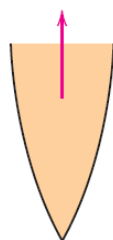
VISCOELASTICIDADE – comportamento mecânico dos materiais em função das suas componentes **elásticas** e **viscosas** e dependentes do TEMPO e TEMPERATURA.

Influência da temperatura na fluência e na resistência a impacto.

Tipos de Fratura

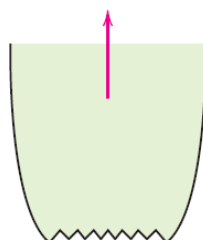


Fratura Dúctil



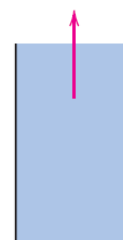
(a)

Dúctil



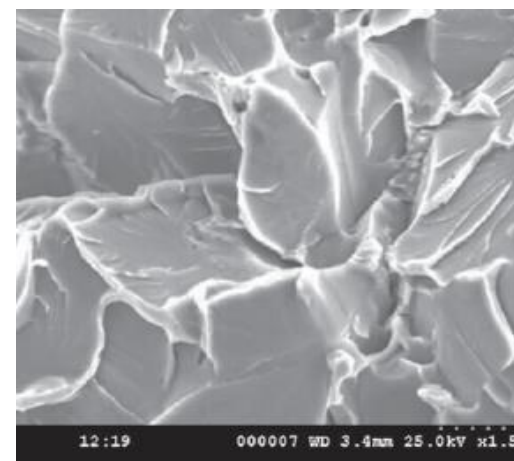
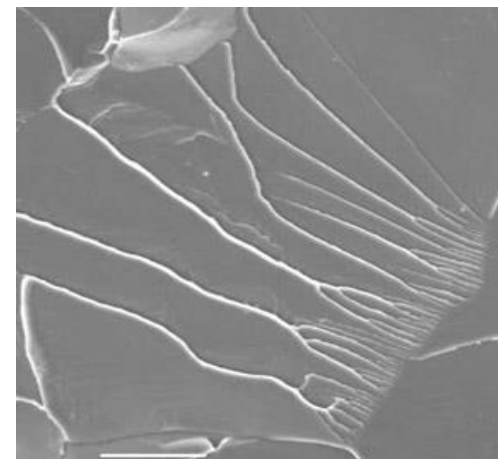
(b)

Intermediário



(c)

Frágil



Fratura Frágil

IMPACTO

Ensaio de tração convencional: $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-5} \sim 10^{-1} [s^{-1}]$

Solicitações de impacto: $\dot{\varepsilon} \approx 10^2 \sim 10^4 [s^{-1}]$



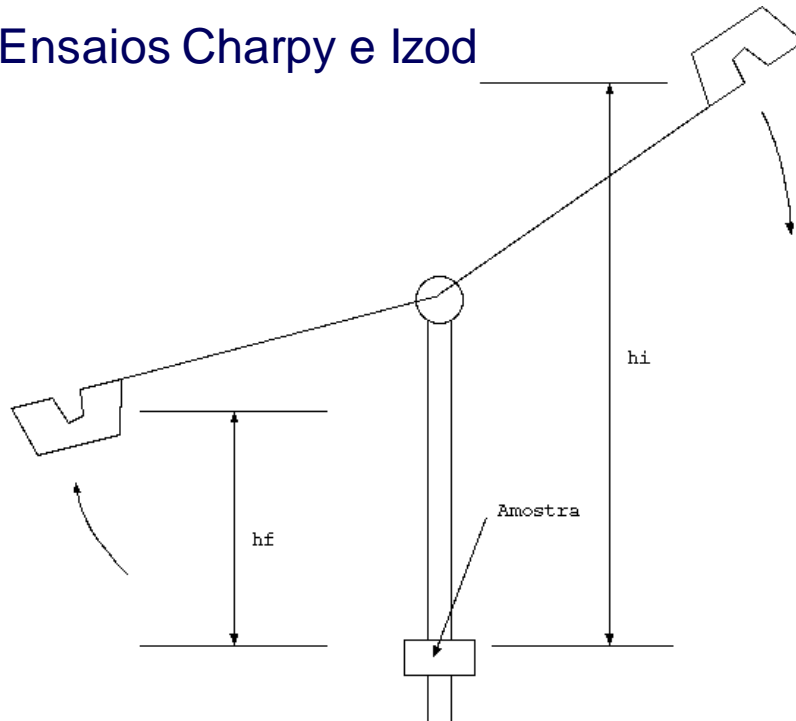
**PÊNDULO PARA
PLÁSTICOS,
LEITURA DIGITAL**



**PÊNDULO PARA
METAIS, LEITURA
ANALÓGICA**

Ensaio de impacto (Pêndulo)

Ensaio Charpy e Izod



$$W_f = mg(h_i - h_f)$$

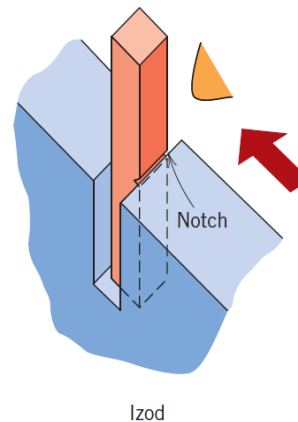
W_f : trabalho de fratura

m : massa do pêndulo

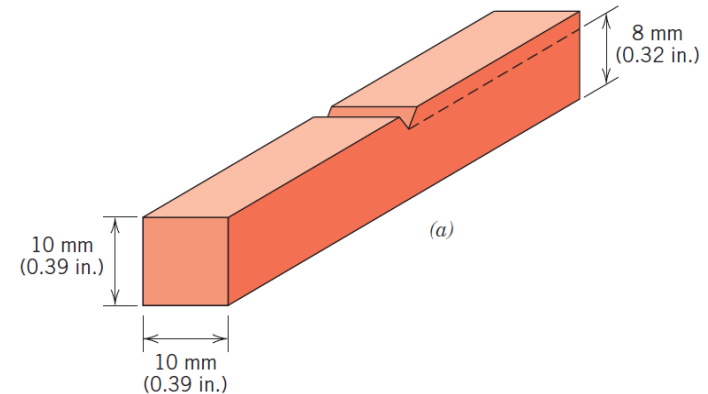
g : aceleração da gravidade

h_i : altura inicial do pêndulo

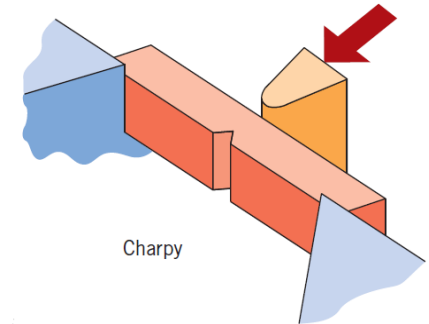
h_f : altura final do pêndulo



Izod



(a)



Charpy

Detalhes dos corpos de prova e da forma de ensaios Charpy e Izod

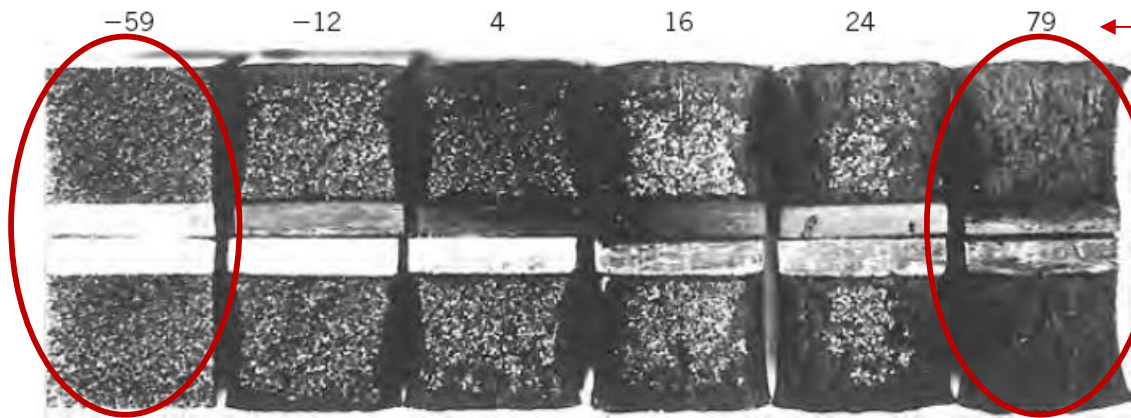
Efeito da concentração de tensões na fratura

- As resistências à fratura medidas para a maioria dos materiais frágeis são significativamente menores do que aquelas calculadas a partir das energias das ligações atômicas.
- A presença de defeitos e trincas (pequenos e frequentemente microscópicos), no interior ou na superfície do material, implica em amplificação da tensão na extremidade do defeito.
- A magnitude da concentração de tensões depende da geometria e da orientação do defeito.

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

- Transição abrupta de um comportamento frágil, em baixa temperatura, para um comportamento dúctil, em alta temperatura.
- Depende fortemente da geometria da amostra e do critério para definição da temperatura de transição \Rightarrow cuidado em projeto para que um material não sofra essa transição em operação.
- Pode ser observada em metais CCC e HC, e em cerâmicas (em temperaturas elevadas).
- Em polímeros esta transição num teste de impacto está relacionada com a T_g .

TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

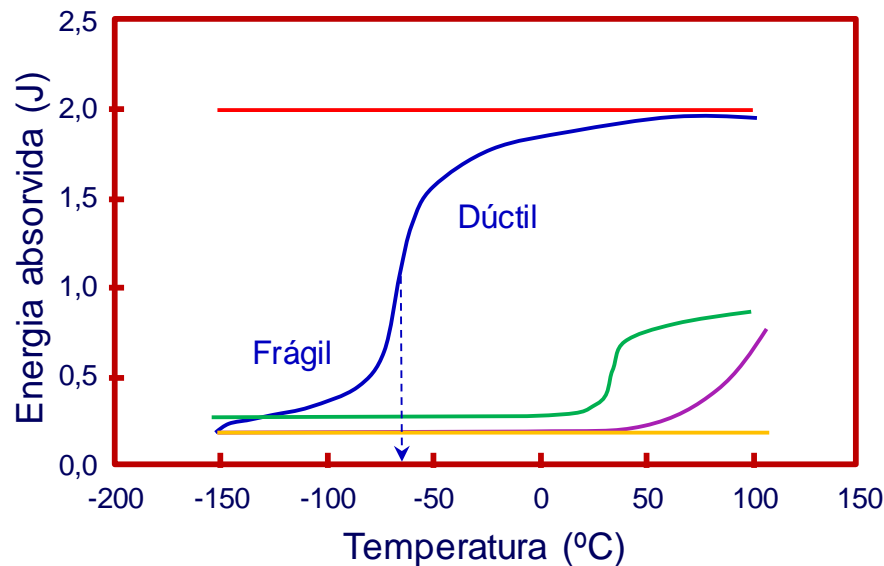


Temperatura, °C

Aço A36

Ensaio Charpy
com entalhe V

Energia absorvida no ensaio Charpy
em função da temperatura

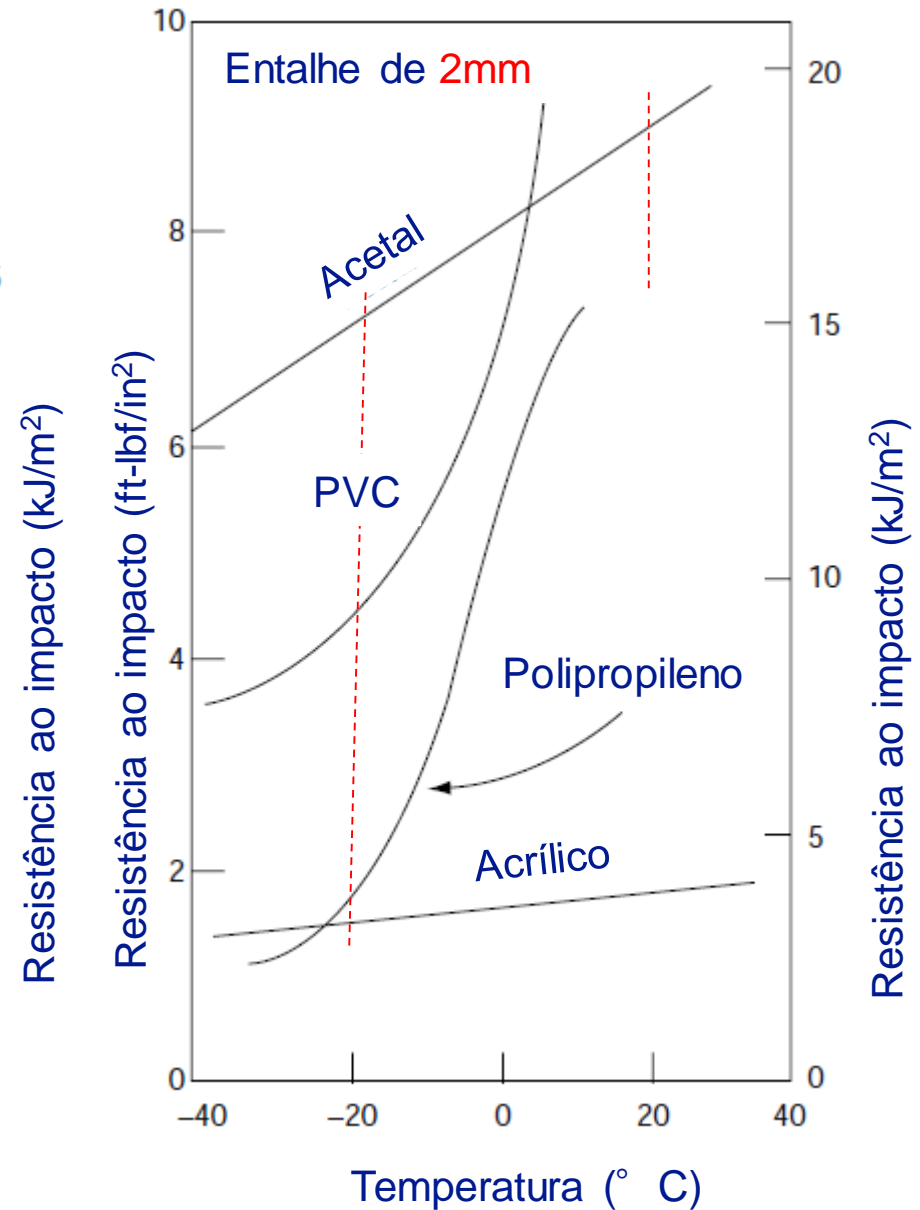
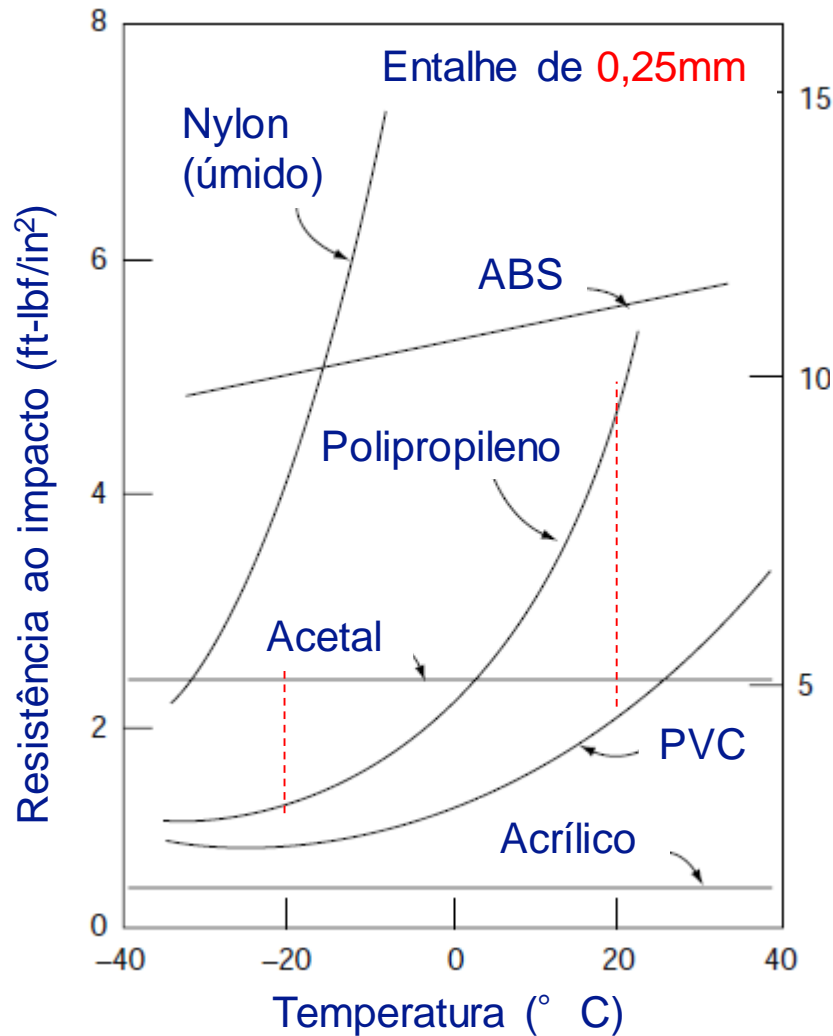


— Cobre, — Aço carbono, — Zinco
— Náilon, — Acrílico

Metais: associada à
imobilização de
discordâncias devido à
baixa temperatura (difusão)

Polímeros: associada à
presença de reticulação e
T_g, ou seja, à mobilidade
da cadeia polimérica em
função da temperatura.

Transição de comportamento dúctil para frágil com a mudança da temperatura.



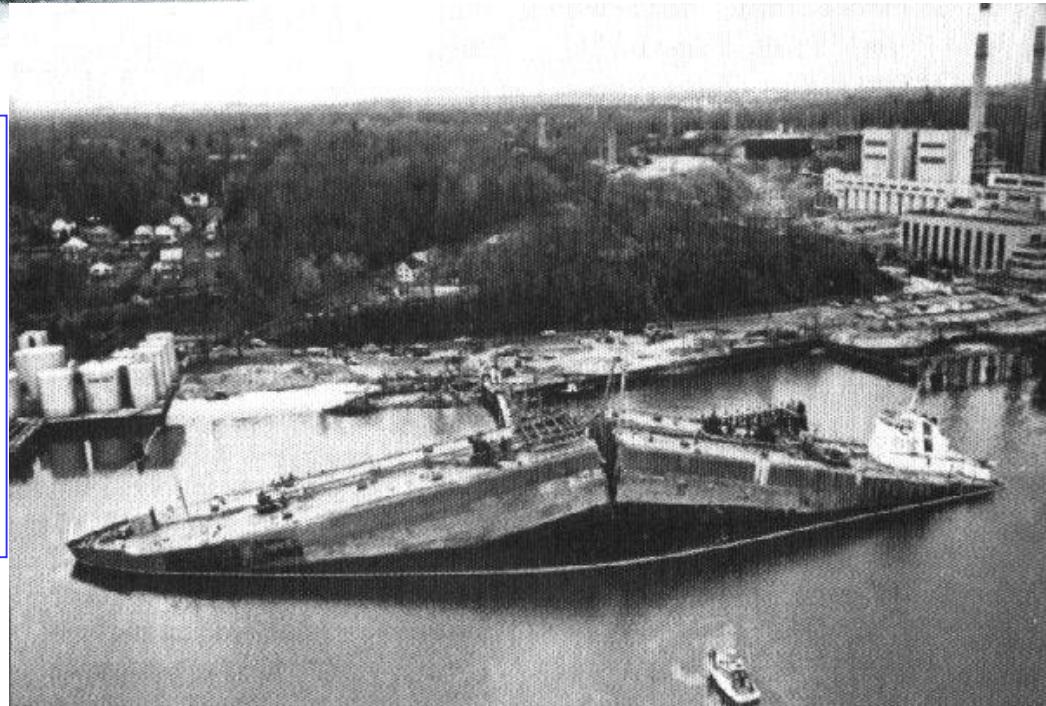
Transição Dúctil-Frágil



Ruptura de uma ponte metálica no Canadá, acontecida em 1951. A estrutura rompeu de forma frágil numa noite de inverno (-30°C), num momento em que a ponte não estava sequer submetida a uma grande solicitação.

- Não se deve construir estruturas utilizando materiais que apresentem a temperatura de transição dúctil-frágil acima da temperatura de serviço, para evitar fraturas frágeis e catastróficas.

‘Liberty ships’ = navios que rompiam ao meio durante a fabricação por soldagem. Os navios foram fabricados para transportar alimentos, remédios e vestimentas para os aliados dos EUA na Europa. Alguns navios romperam ao meio durante a fabricação, outros durante a viagem para a Europa e outros chegaram intactos.



FADIGA

É o processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações cíclicas (flutuantes) em algum ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos (flutuações)*.

* ASTM E1823 - Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing

Fadiga



- A *fadiga* é responsável por um grande número das falhas mecânicas observadas nos componentes de engenharia e por um grande número de acidentes com vítimas fatais.
- A fadiga ocorre em todas as classes de materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos).

Ensaio de fadiga

Máquina servo-hidráulica de ensaio de fadiga



Corpos de prova antes e depois do ensaio



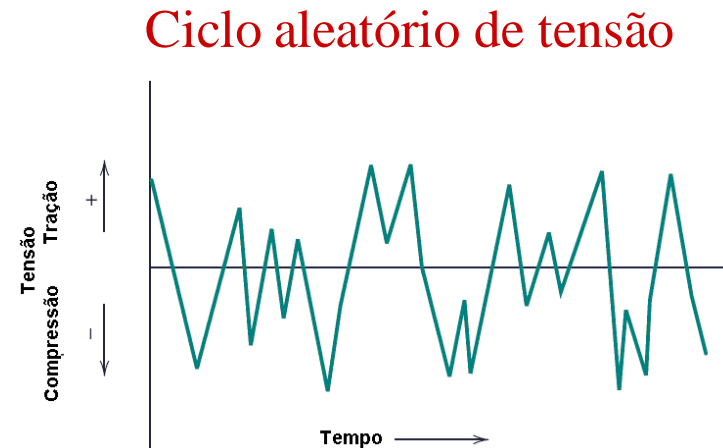
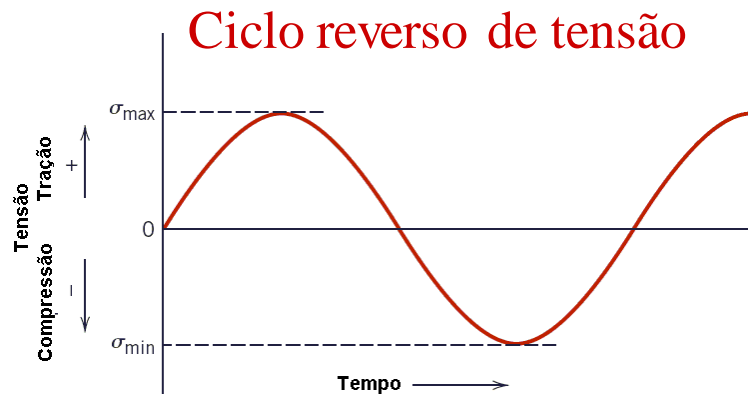
Ensaio de fadiga a quente em material resistente ao calor



Parâmetros da Solicitação Cíclica

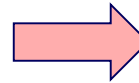
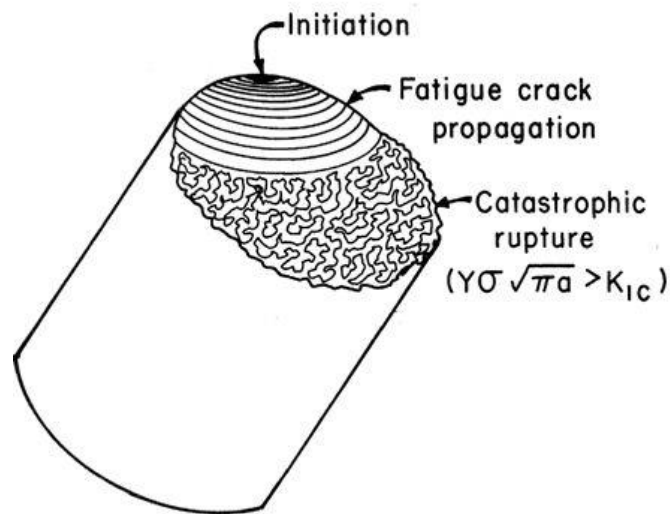
A aplicação de tensão em função do tempo pode variar de 3 formas distintas:

- Ciclo de tensões Reverso (alternadas) – a tensão varia no tempo na forma de uma senóide regular.
- Ciclo de tensões repetidas – neste tipo os valores de σ_{\max} e σ_{\min} são assimétricos em relação à tensão igual a zero.
- Ciclo de tensões aleatórias – a amplitude e a frequência podem variar aleatoriamente.

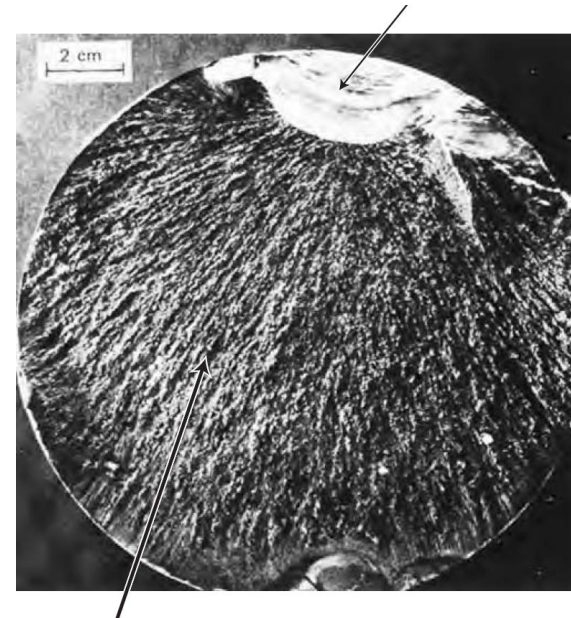


Fadiga de alto ciclo: > 10000 ciclos

Morfologia da Fratura por Fadiga nos Metais



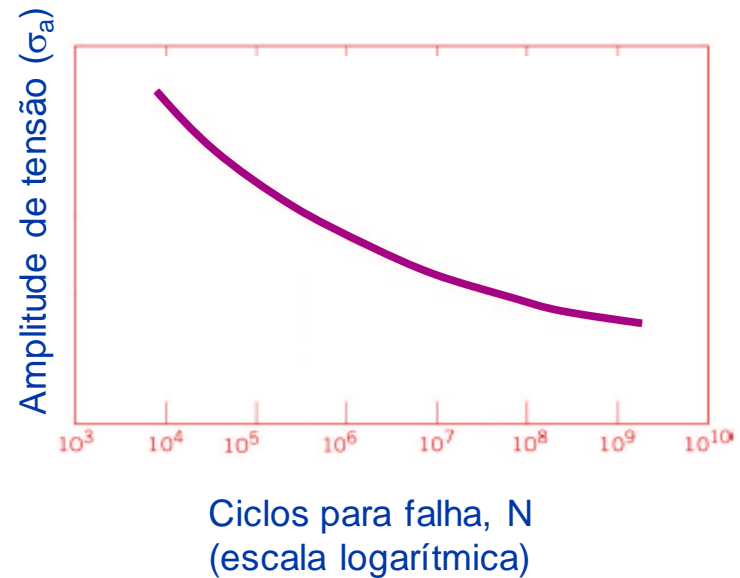
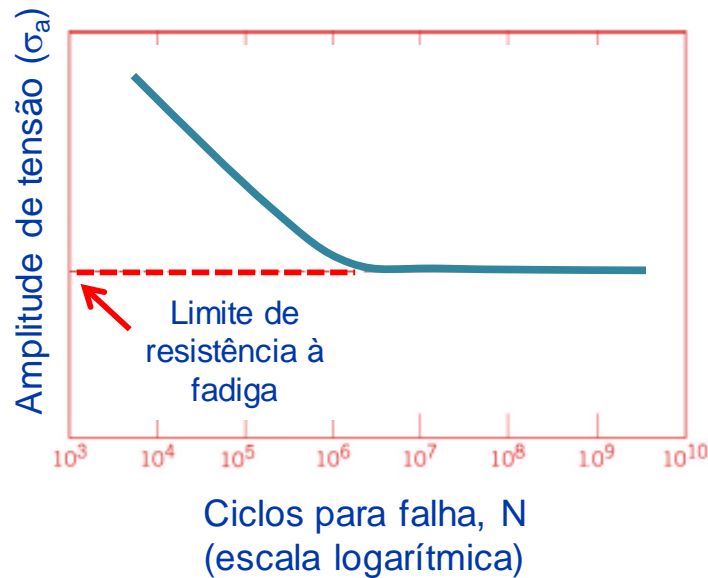
Mecanismo de crescimento de trinca estável



Mecanismo de crescimento de trinca instável

As marcas de praia se formam quando há alteração na frequência, onde o padrão pode indicar o tipo de esforço que a peça foi submetida.

Curva σ -N (curva de Wöhler)



- O ensaio é realizado em frequência constante e com um valor de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ fixo para um grande número de amostras em cada nível de amplitude de tensão.
- Faz-se o gráfico do número médio de ciclos necessários para a ruptura do material.
- Define-se o limite de fadiga (σ_L , *endurance limit*) como sendo o nível de amplitude de tensão abaixo do qual não se observa a ruptura por fadiga.
- Para aços-carbono, aços baixa liga e ferros fundidos há um limite de fadiga bem definido, para os demais materiais convencionam-se um número de 10^7 ciclos para a definição do limite de fadiga.

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, etc, melhoram significativamente a vida em fadiga.
- Efeitos do ambiente:
 - ✓ Fadiga térmica – flutuações na temperatura.

Fluência

- **RELAXAÇÃO DE TENSÃO**

- O material é deformado. A deformação é mantida constante e avalia-se a tensão resultante em função do tempo

- **FLUÊNCIA**

- O material é submetido a uma tensão (abaixo da tensão de escoamento). A tensão é mantida constante e avalia-se a deformação resultante em função do tempo.



Peso Morto

Efeito da Temperatura na FLUÊNCIA

- Em baixas temperaturas (e *baixas taxas de deformação*), uma deformação ε praticamente só depende da tensão σ .
- Em altas temperaturas (e *baixas taxas de deformação*), uma deformação ε depende não somente da tensão σ , mas também do tempo e da temperatura.
- O limite entre “baixa temperatura” e “alta temperatura” varia de material para material.

Temperatura Homóloga (τ_H)

$$\tau_H = \frac{T}{T_F}$$

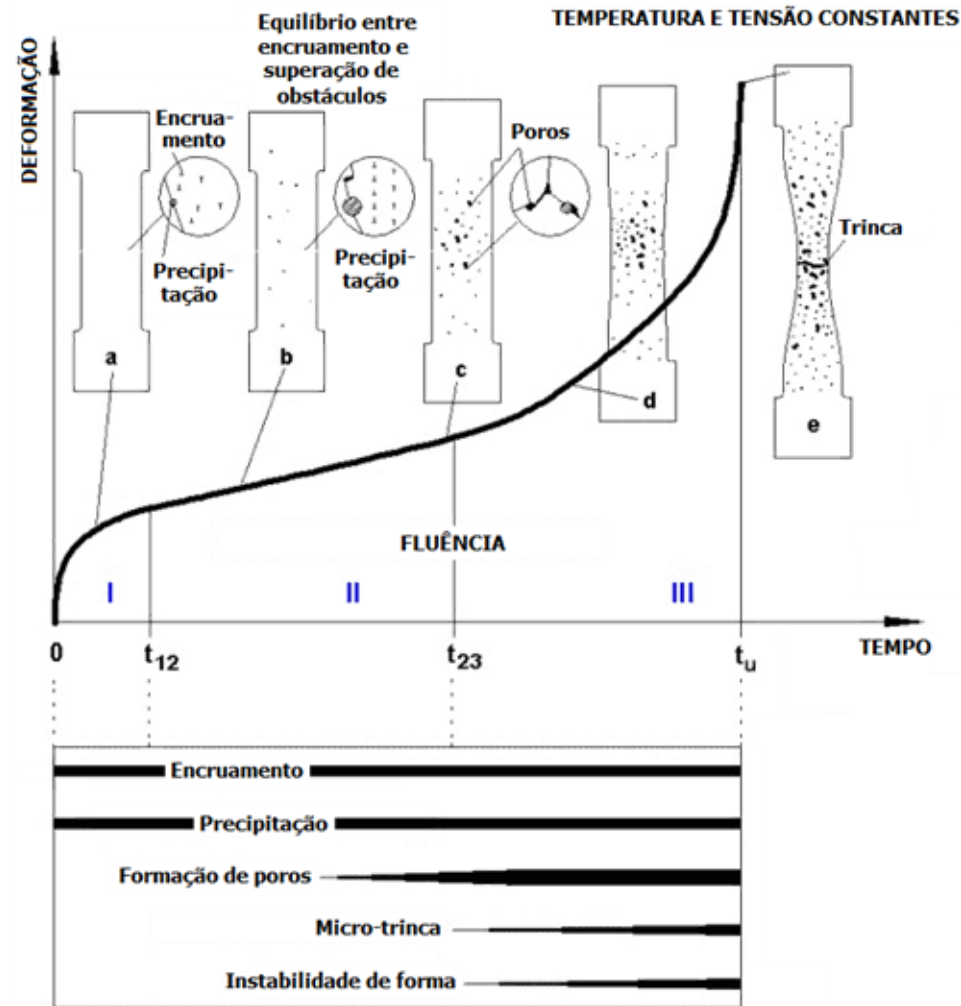
T = temperatura do material
 T_F = temperatura de fusão
(dadas em K)

para metais: $\tau_H > 0,4 \rightarrow$ Alta Temperatura

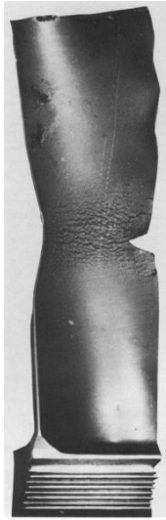
- Quando a temperatura é superior a $0,4 T_F$, os fenômenos difusivos tornam-se bastante significativos nos metais, e observam-se deformações plásticas em função do tempo, mesmo em tensões relativamente baixas. Esse é o fenômeno da **FLUÊNCIA**.

CURVA DE FLUÊNCIA

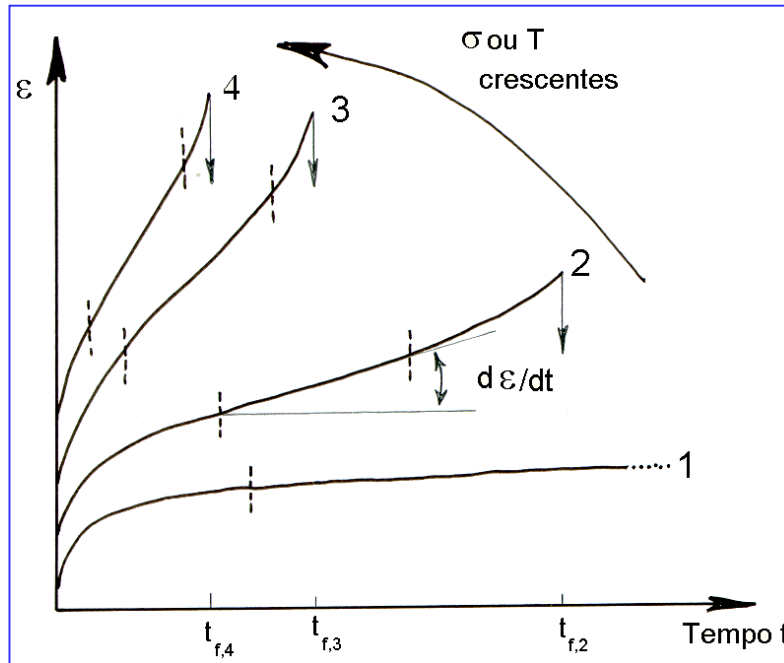
- Estágio I** ou **TRANSIENTE**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ **decrecente**; efeito do encruamento
- Estágio II** ou **ESTACIONÁRIO**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ (**constante**) é mínima; equilíbrio entre o encruamento e a superação de obstáculos por processos difusivos (por exemplo, ascensão de discordâncias)
- Estágio III** ou **TERCIÁRIO**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ **crescente**; desenvolvimento de **cavidades (poros)** que **levam à ruptura do material**



Efeito da Temperatura e da Tensão sobre a Fluência ²³



Falha por fluência de uma paleta de turbina de avião



$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$

$$t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$$

e

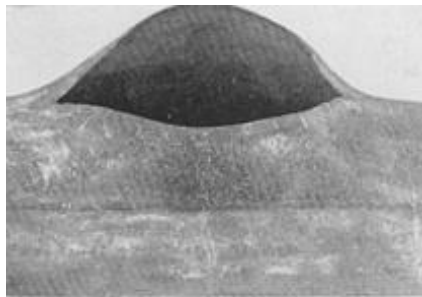
$$(\dot{\epsilon}_{\min})_1 < (\dot{\epsilon}_{\min})_2 < (\dot{\epsilon}_{\min})_3 < (\dot{\epsilon}_{\min})_4$$

$$\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$$

$$t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$$

e

$$(\dot{\epsilon}_{\min})_1 < (\dot{\epsilon}_{\min})_2 < (\dot{\epsilon}_{\min})_3 < (\dot{\epsilon}_{\min})_4$$



(a)

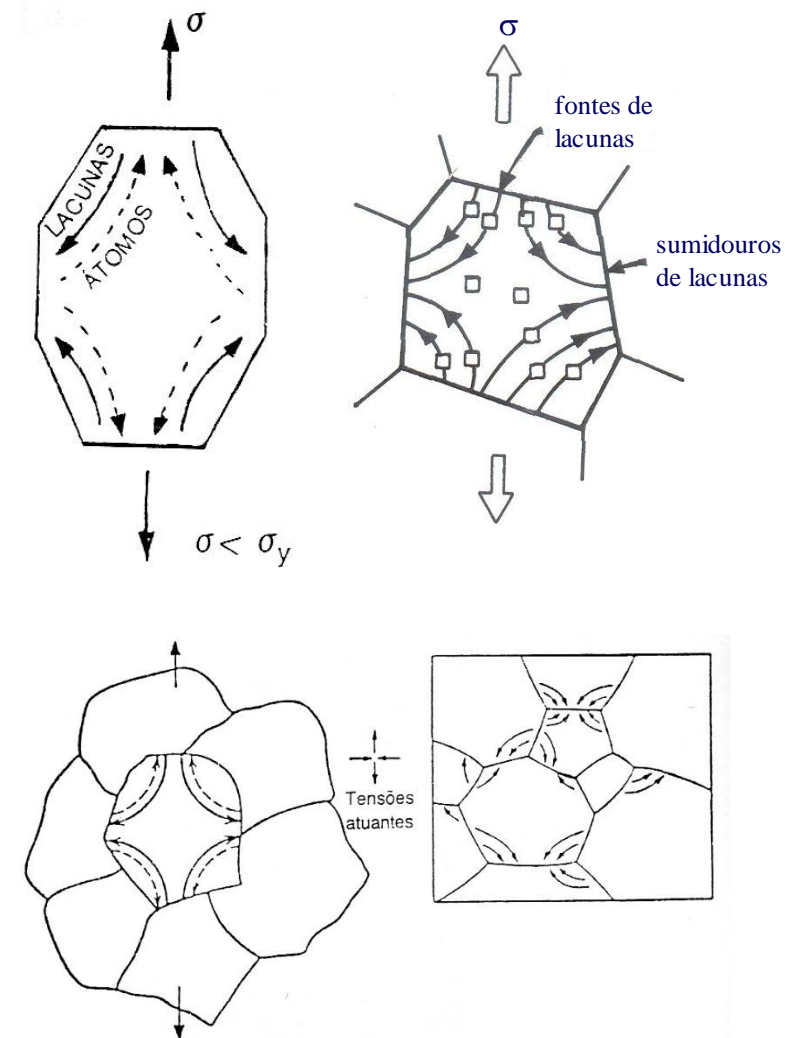
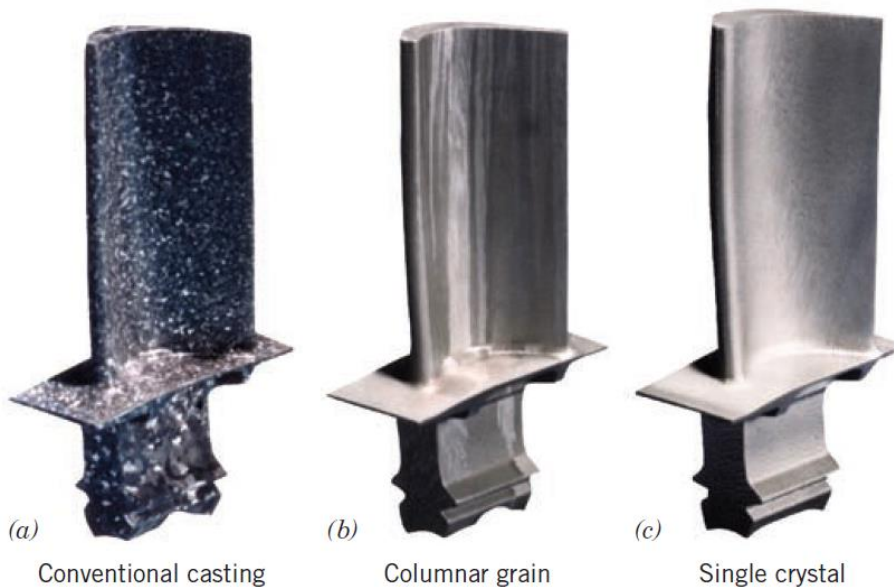
Falha por fluência de uma tubulação

- Obs.: no caso 1 o material não rompe no intervalo coberto pelo gráfico, e poderia permanecer por todo o tempo de operação sem quebrar.

Mecanismos de Fluência nos Metais

Dois mecanismos são responsáveis pela fluência na região de fluência por difusão:

- 1) Difusão no interior do grão (**Nabarro-Herring**)
- 2) Difusão nos contornos de grão (**Coble**)



Outros Fatores que afetam a fluência em metais

- ✓ Estrutura cristalina: \uparrow complexa $\Rightarrow \uparrow$ resistência à fluência
- ✓ Precipitados: \uparrow fração $\Rightarrow \uparrow$ resistência à fluência
- ✓ Contornos de grão: \uparrow tamanho de grão $\Rightarrow \uparrow$ resistência à fluência



← Pá de turbina para aviões a jato com grãos orientados feita por solidificação direcional

Pá de turbina monocristalina: o canal em forma de espiral permite que apenas um grão cresça na peça →



Fonte: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2001/slides.IB/photo.html>

- **Capítulo do Callister (7ª ed., 2008) tratado nesta aula**

- Comportamento viscoelástico : seção 15.4
- Fluência : seção 8.12 a 8.15
- Concentração de tensões : 8.5
- Impacto : seção 8.6
- Fadiga : seção 8.7 e 8.8

- Textos complementares indicados

- Callister, 5 ed. : Comportamento viscoelástico : 16.7; Fluência : seção 8.13 a 8.15; Impacto : seção 8.6; Fadiga : seção 8.7 e 8.8
- Shackelford, Ciência dos materiais, 6ª ed., 2008, Fluência: 6.5; Deformação viscoelástica: 6.6; Impacto e Fadiga: 8.1 a 8.3
- Sperling, Introduction to physical polymer science, 4ª ed, 2006, Viscoelasticidade, capítulo 10: seção 10.1 a 10.1.2.2 e 10.2 a 10.2.3 e Apêndice 10.2 (Experiência: Viscoelasticidade do queijo)