Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

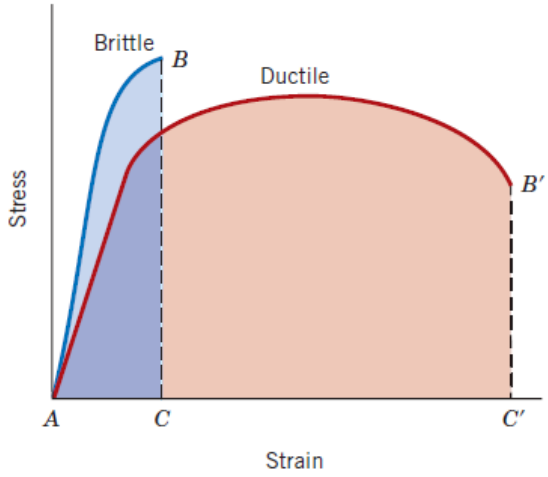
TMEC034
Seleção de Materiais

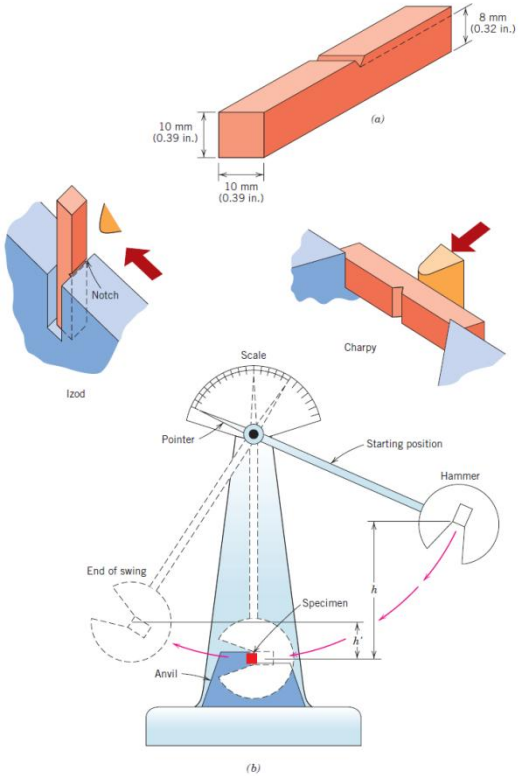
Seleção por propriedades: Tenacidade

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

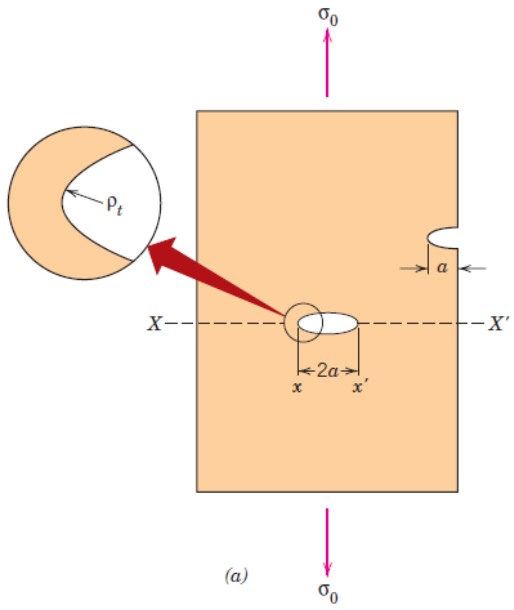
Favor desligar o celular ou passá-lo para o modo silencioso

Em caso de ligação favor não atender durante a aula





$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$



Introdução

- A resistência mecânica, apesar de mais aplicada na seleção de materiais, não é a única propriedade importante -> em projetos normalmente se procura um conjunto de propriedades
- A experiência mostra que a maioria das estruturas falhas com cargas inferiores à tensão de escoamento do material -> tenacidade é uma propriedade importantes

Introdução

- No passado os projetistas não levavam a tenacidade em conta (faltavam ferramentas - teorias). O que reduzia o número de falhar era:
  - Fator de segurança elevado
  - Uso de junção mecânica (rebites e parafusos) -> falha de um componente não levava a falha da estrutura como um todo
  - O uso de formas delgadas permitia que a deformação localizada reduzisse a concentração de tensão

Introdução

- Esta situações foi se modificando com o tempo (necessidade de: menores fatores de segurança, junção por solda, estruturas de paredes mais espessas) -> ex: vaso de água pressurizada de um reator nuclear ~304mm de espessura e é produzido por soldagem.
- Problema atual dos projetistas:
  - Que nível de tenacidade é necessária para assegura a performance desejada a custo razoável?
  - Como especificar isso numericamente?

  (para a mesma resistência mecânica, maior tenacidade = maior custo de material -> buscar a real necessidade)

Introdução

Liberty Ships – 2ª Guerra Mundial

- O casco dos Liberty Ships fraturavam sem aviso, Principalmente no Atlântico Norte.
- Houveram 2751 Liberty Ships fabricados entre 1941-1945. Trincas apareceram em 400 deles, sendo 145 falhas catastróficas;

Introdução
Liberty Ships

- **A baixa temperatura do Atlântico Norte "tornou o aço frágil".**
- **Foram os primeiros navios produzidos em massa por soldagem.**

• O problema pode ser solucionado empregando aços de melhor qualidade e melhorando o projeto dos navios

Significado de tenacidade

- Tenacidade -> “resistência a fratura”, Enegia necessária para a fratura
  - Frágil -> “quebra fácil” pouca tenacidade

	Fratura Frágil	Fratura Tenaz
Tensão	Fratura ocorre a tensão menor que a necessária para causar deformação plástica em toda secção da peça	Fratura ocorre em tensão que causa deformação plástica em toda secção da peça
Energia	Baixa absorção de energia	Envolve elevada energia
Velocidade	Fratura rápida	Fratura lenta

  - Fratura ocorre pela propagação de trinca -> mecanismos: clivagem, coalescimento de microvazios, corrosão sob tensão, fadiga, fluência.

Fratura

- Clivagem: Separação de planos cristalinos -> Fratura Frágil
- Coalescimento de microvazios: encontro de vazios gerados pelo “rasgamento” de partículas de segunda fase -> Fratura Dúctil
- Corrosão sob tensão: Energia para crescimento de trinca vem da reação química na ponta da trinca -> ainda mal entendida

Fratura

- Fadiga: Induzida por carregamento cíclico ou flutuante. Um dos mais importante modos de falha -> veremos detalhe a frente

- Mecanismos estáticos a baixa temperatura

Micromecanismo	Fratura frágil	Fratura dúctil
Clivagem	Esperada em aços	Improvável
Coalescimento de microvazios	Possível em aços de elevada resistência	Comum

Fratura

- Antes da fratura a trinca é iniciada em algum tipo de defeito. (ex: inclusões e microvazios)
- Em geral materiais com menor quantidade de segunda fazer são mais tenazes -> quanto mais “limpo” melhor o material (controle na produção)
- Para fratura frágil pode-se calcular o tamanho crítico de defeito para uma dada tensão -> mesmo se este defeito não existe no início de operação ele pode aparecer com o tempo

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

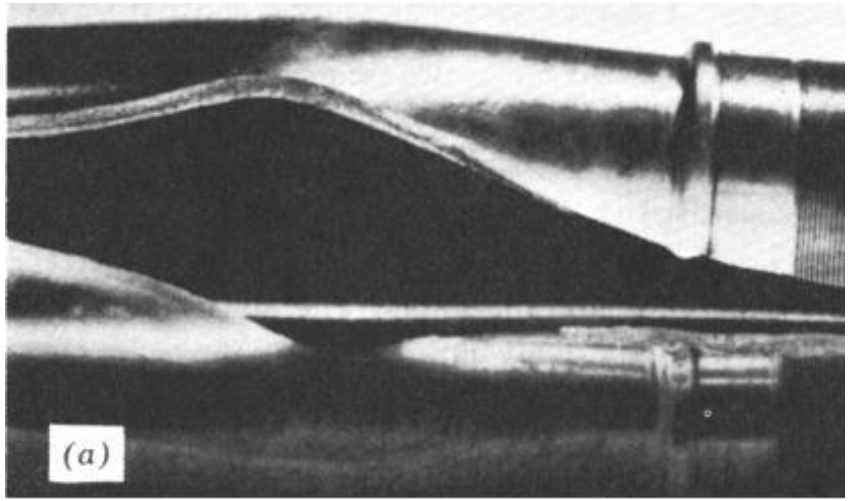
Fratura

Característica dos materiais:

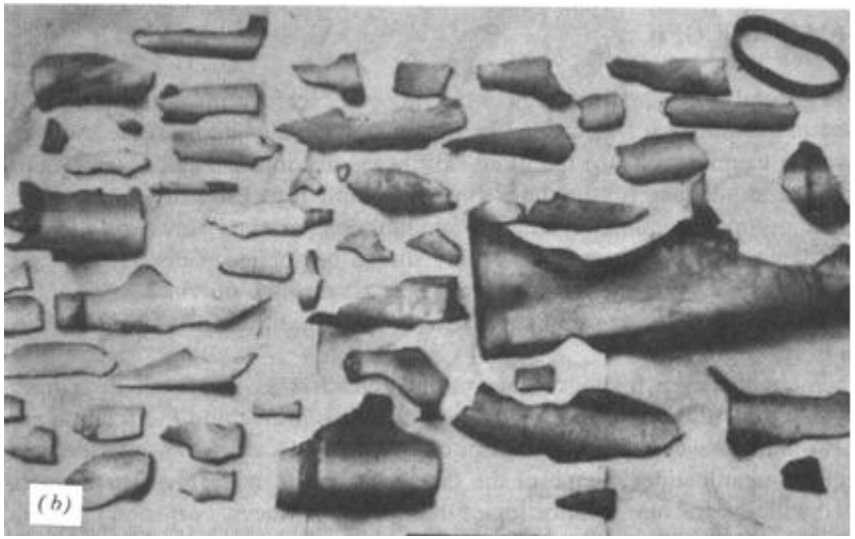
- Materiais metálicos de baixa resistência normalmente são dúcteis
- Para materiais de elevada resistência o problema de tenacidade pode ser mais grave
  - Fratura catastrófica -> especialmente perigosa em sistemas com energia armazenada (vasos de pressão)
- A tenacidade de aços é reduzida por:
  - Redução da temperatura , aumento da taxa de carregamento e aumento de restrições a deformação plástica (tamanho da peça e tipo de carregamento)

Ex: Falha de um tubo

- Falha **Dúctil**:
  - Uma parte
  - Grande deformação



- Falha **Frágil**:
  - Muitas partes
  - pequena deformação

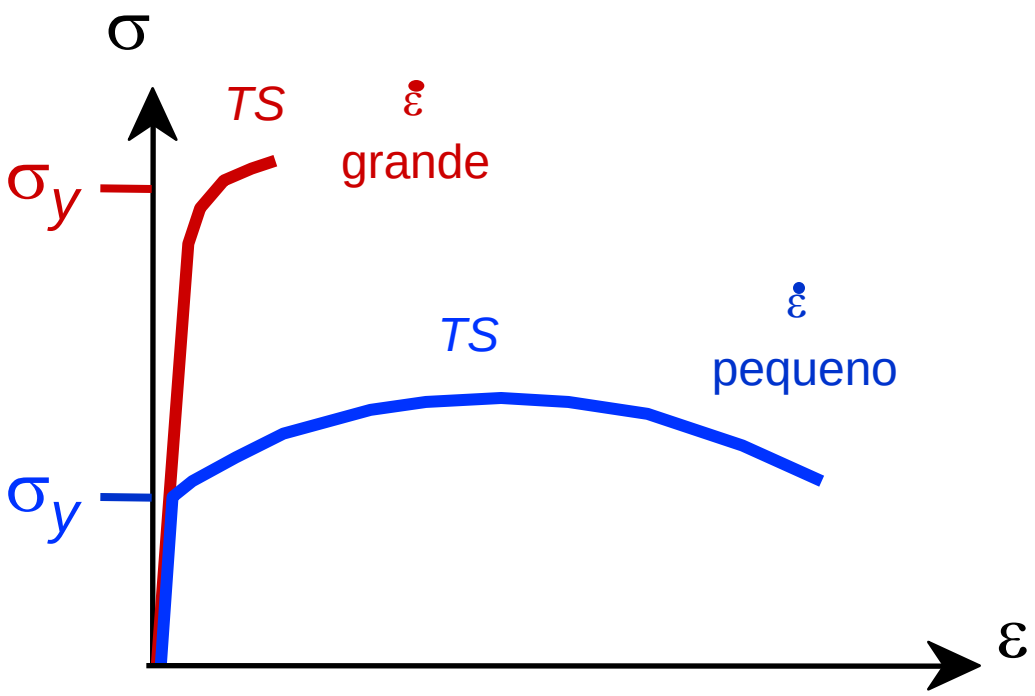


Figures from V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.1(a) and (b), p. 66 John Wiley and Sons, Inc., 1987. Used with permission.

Taxa de carregamento

- Taxa de carregamento aumentada...
  - aumenta σ_y e *TS*
  - diminui %*AL*

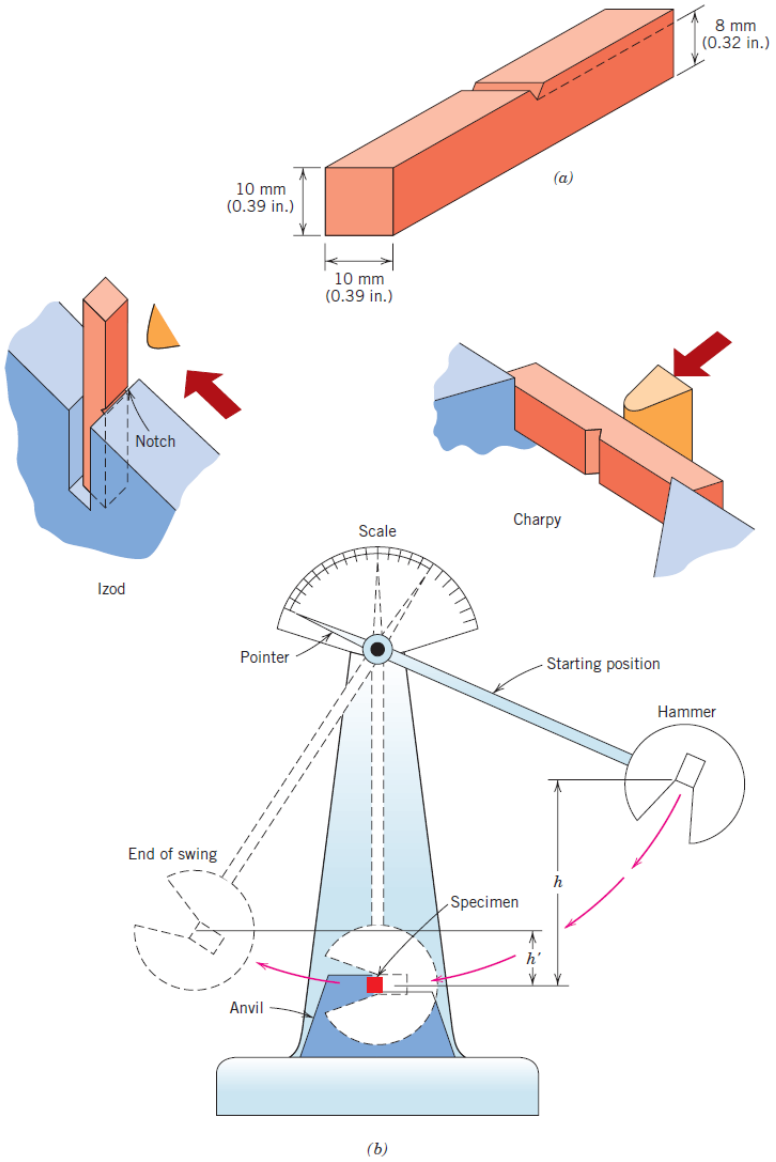
- Porque?? Aumento da taxa de carregamento "deixa pouco tempo" para as discordâncias se mover e superar obstáculos



Medida de tenacidade

- O ensaio Charpy é realizado para um dado intervalo de temperatura, a elevada taxa de carregamento e em corpos de prova entalhados. Mas os teste não fornecem valores quantitativos úteis para projeto, pois:
  - Somente uma taxa de carregamento é possível
  - Corpo de prova é muito pequeno
  - Concentrador de tensão não reproduz um defeito real.
- Apesar de não extrapoláveis para casos diferentes, resultados podem ser usados qualitativamente, mas não se tem uma ideia de “quão perto da falha” está o projeto. (útil para controle da qualidade)
- Avaliação quantitativa -> Mecânica da fratura

Teste de impacto



- Ensaios de impacto surgiram antes da mecânica da fratura

- Ensaio de tração não eram úteis em alguns casos (material normalmente dúctil podia romper de maneira frágil)

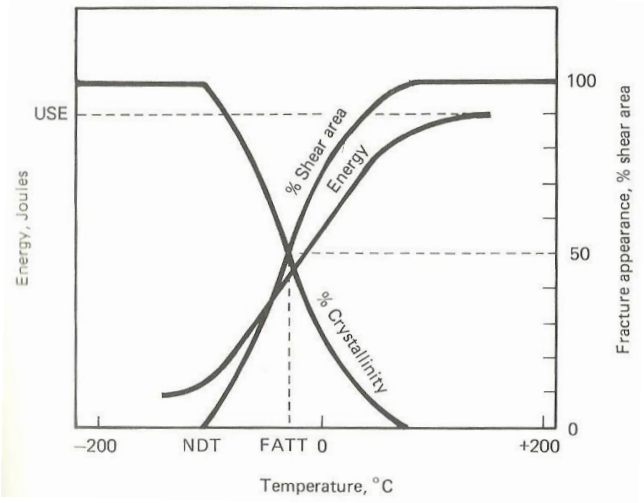
- Ensaio de impacto busca condição mais severa:
  - Temperatura baixa
  - Elevada taxa de deformação
  - Estado triaxial de tensões (entalhe)
- Dois tipos principais, Charpy e Izod
  - Energia de impacto

Medidas de tenacidade

- Existem duas maneiras de se medir tenacidade:
  - Abordagem pela temperatura de transição
    - Validada para aços de baixa resistência (com transição dúctil frágil bem definida) -> medidas por ensaios de impacto (ex. Charpy)
      - Medida de energia
      - Medida de fratura dúctil

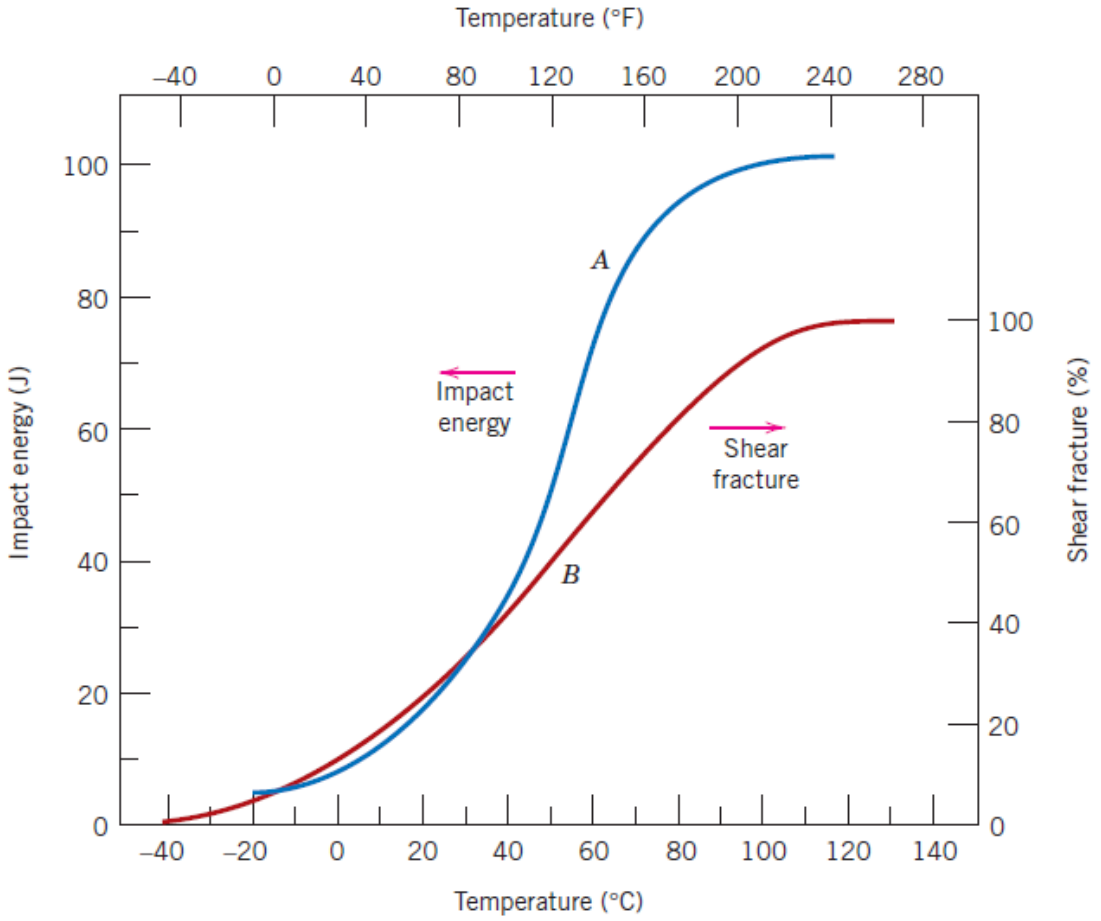
      (Fibrosa -> microvazios)

      (Brilhosa -> clivagem)



  - Abordagem pela mecânica fratura

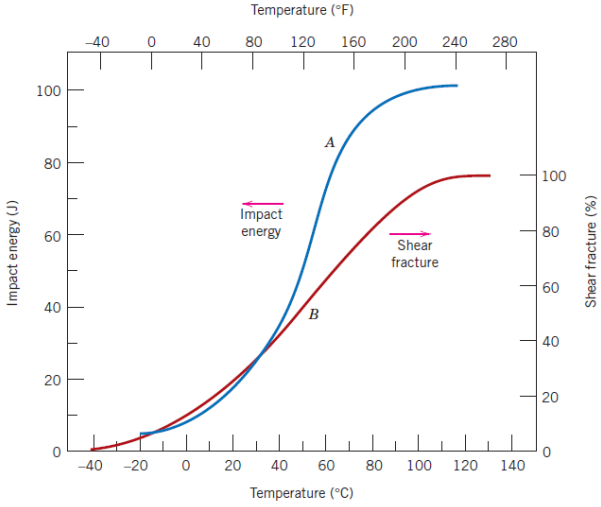
Transição Dúctil-Frágil



Transição Dúctil-Frágil

Como definir a temperatura de transição?

Qual a escolha para projeto? (conservadora)



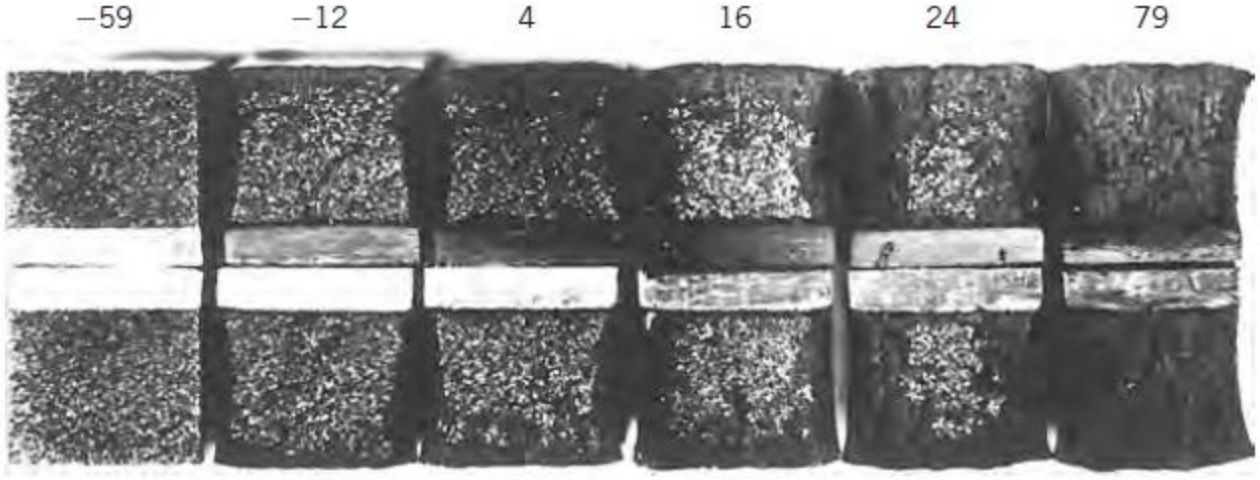
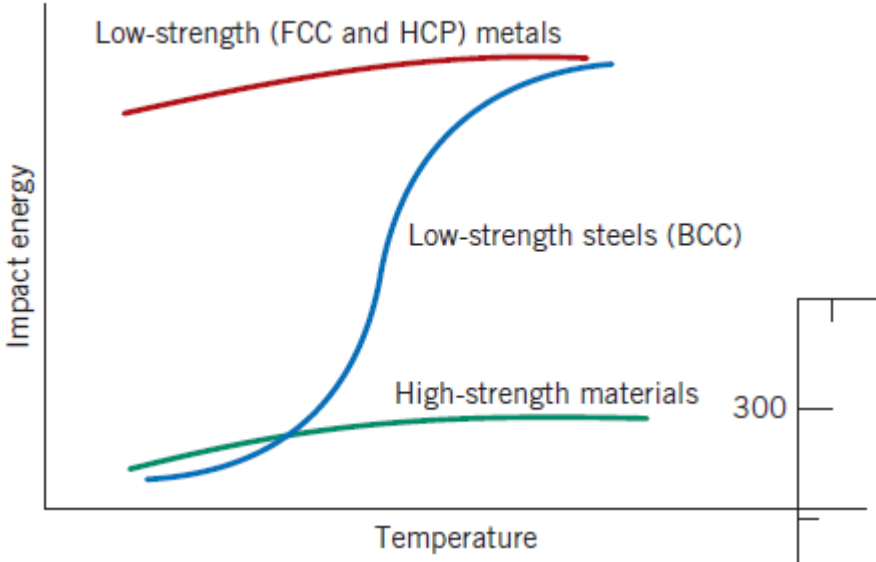


Figure 8.14 Photograph of fracture surfaces of A36 steel Charpy V-notch specimens tested at indicated temperatures (in °C). (From R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3rd edition, Fig. 9.6, p. 329. Copyright © 1989 by John Wiley & Sons, Inc., New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Medidas de tenacidade

- É mais difícil determinar uma temperatura de transição para um material de maior resistência
  - Possibilidade de utilização de uma energia limite
    - Dificuldade de comparação para aços de resistência diferente -> Problema inexistente se o parâmetro for a temperatura de transição
    - Possibilidade de definir a temperatura de transição como a temperatura onde a fratura apresenta 50% de cisalhamento (processo menos preciso e mais trabalhoso)
    - Falha para materiais de elevada resistência -> transição praticamente indeterminada -> pequena diferença entre a maior e a menor energia absorvida
    - Nesse caso que os conceitos de tenacidade da mecânica da fratura se mostram úteis

Transição Dúctil-Frágil

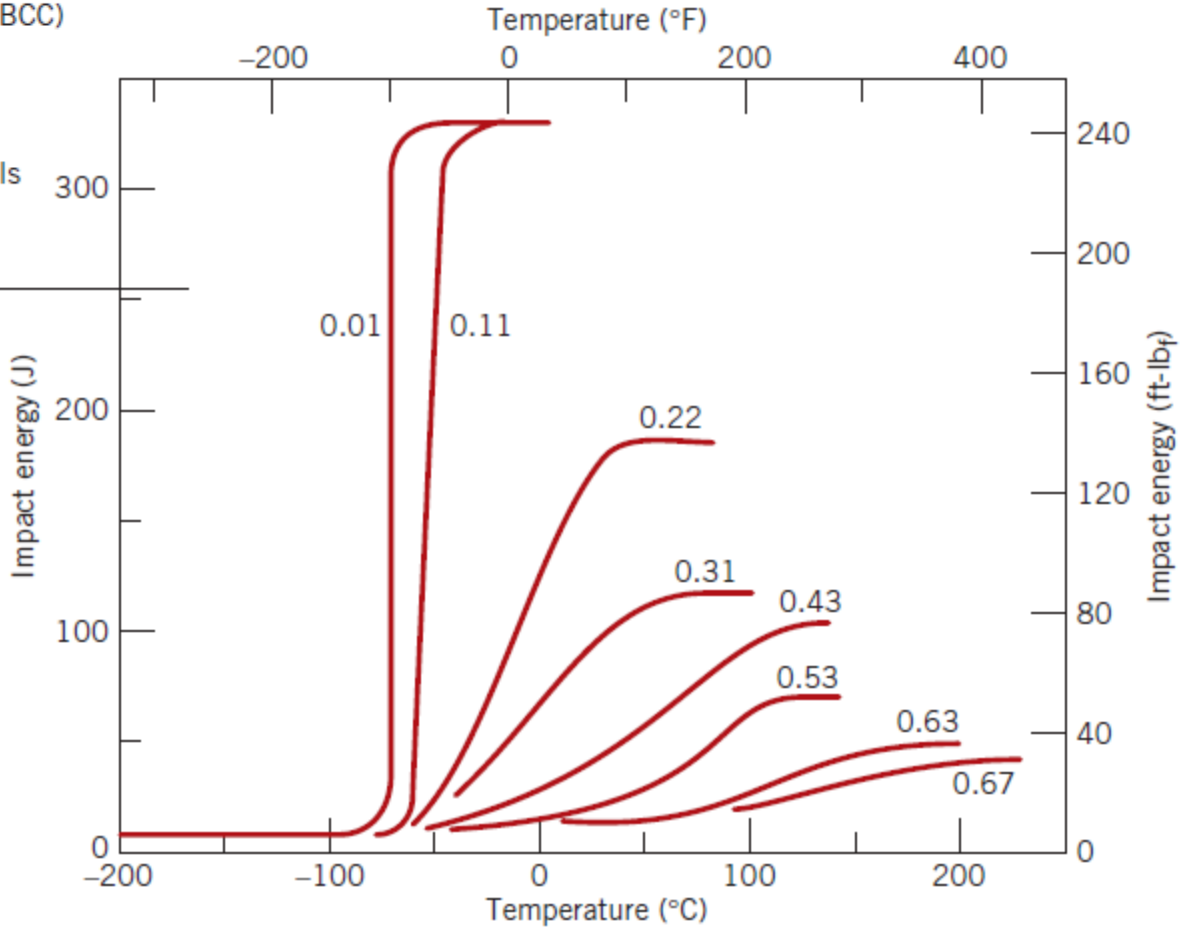


Depende da microestrutura:

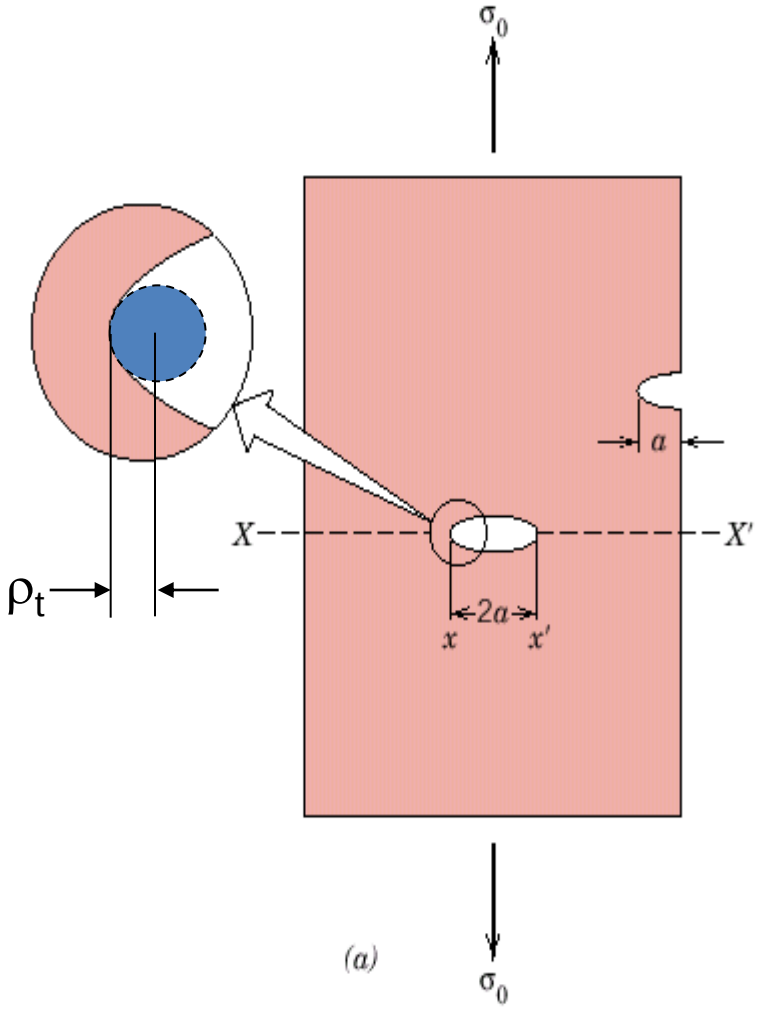
Tamanho de grão

Teor de liga (carbono)

Para cerâmico a transição está acima de 1000 °C



Defeitos e a concentração de tensão



Resultados de propagação de trincas

- Trincas de Griffith

$$\sigma_m = 1 + 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

Fator de concentração de tensão

$$\sigma_m = 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} = K_e \sigma_o$$

Trinca longa
Raio pequeno

onde

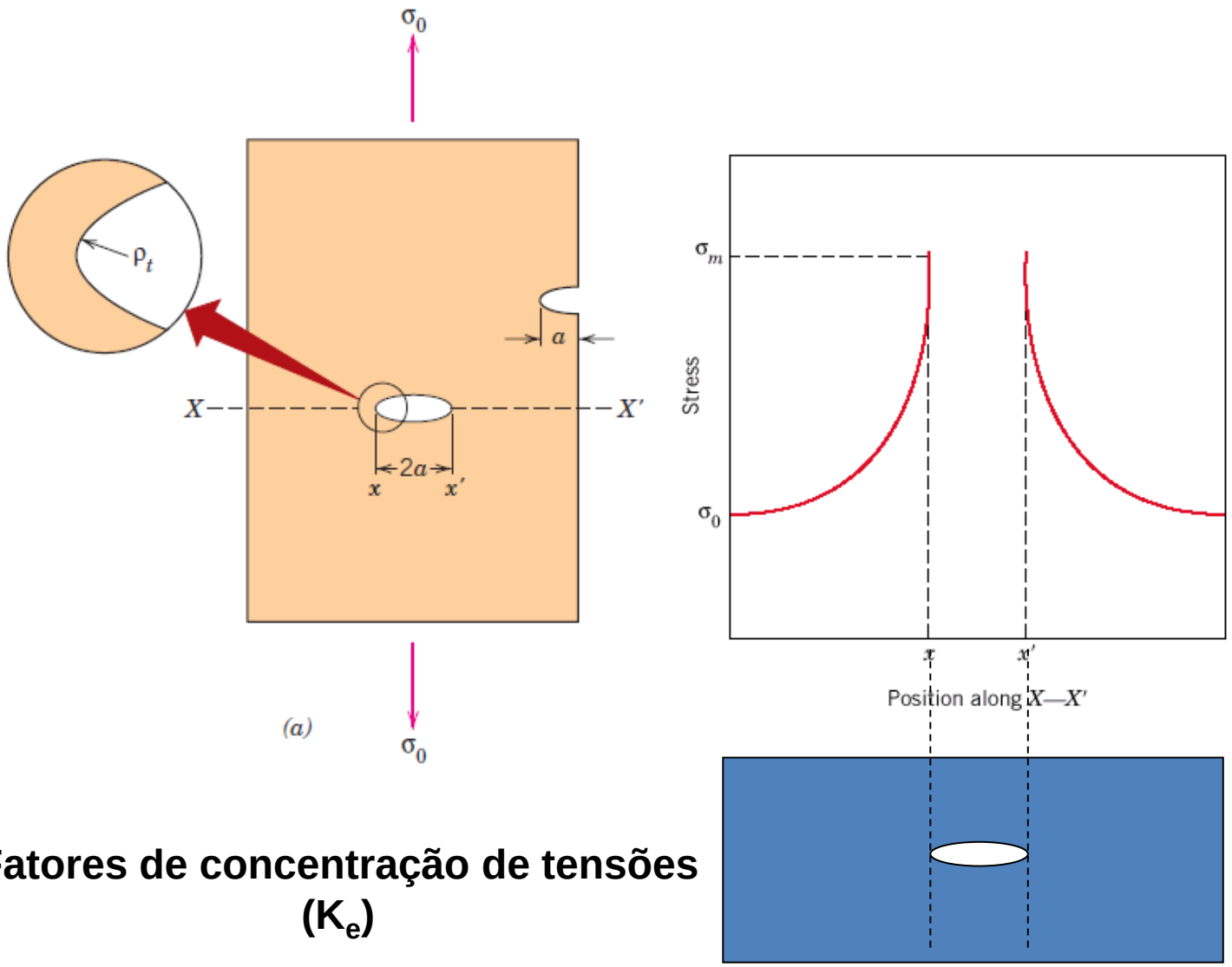
ρ_t = raio de curvatura

σ_o = tensão aplicada

σ_m = tensão na ponta trinca

Adapted from Fig. 8.8(a), *Callister 7e.*

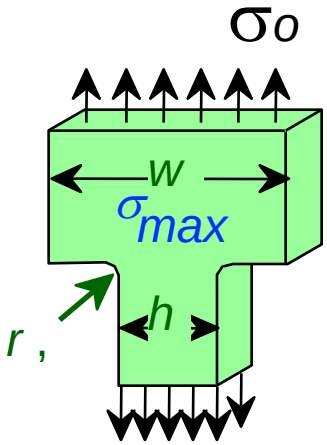
Distribuição de tensões



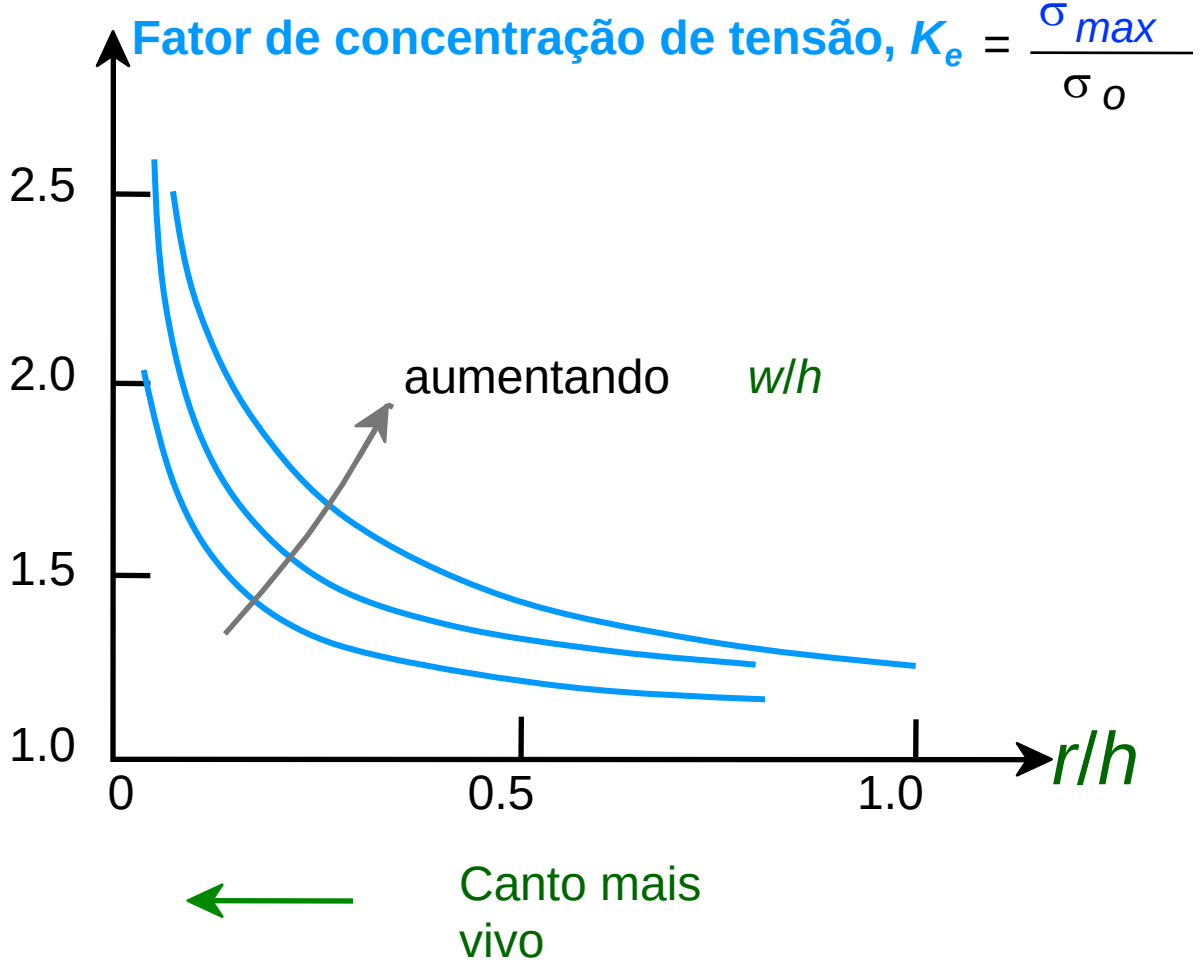
Fatores de concentração de tensões (K_e)

Concentradores de tensão

- **Evitar cantos vivos!**



raio

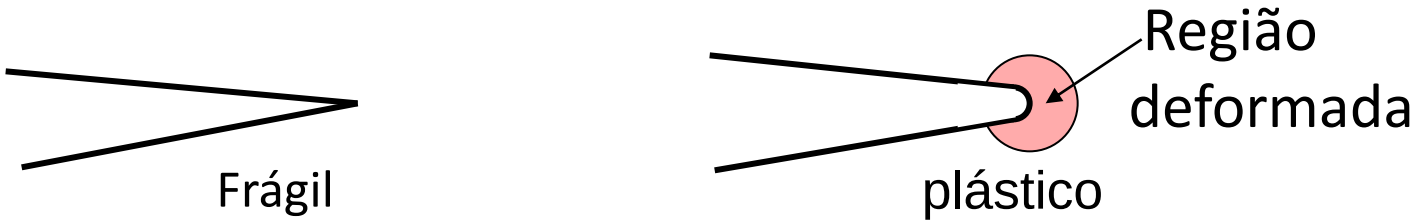


Adapted from Fig. 8.2W(c), *Callister 6e.* (Fig. 8.2W(c) is from G.H. Neugebauer, *Prod. Eng.* (NY), Vol. 14, pp. 82-87 1943.)

Propagação de trinca

Propagação de trinca (raio pequeno)

- Um material dúctil deforma na ponta da trinca, "arredondando" a trinca.



Balanço de energia na trinca

- Energia elástica
  - Energia elástica armazenada no material quando ele deforma elasticamente
  - Esta energia é liberada quando a trinca se propaga
  - Criação de nova superfície necessita de energia

Mecânica da fratura

- Para prever fratura no projeto deve-se conhecer a relação entre a tensão aplicada e o tamanho crítico de trinca para propagação instável (Griffith) $\frac{d}{dc}\left(-\frac{\sigma^2 \pi a^2}{E} + 4a\gamma_s\right) = 0$

Redução de energia elástica devido à trinca (descarregamento)

Energia necessária para criar superfície da trinca

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a\pi}}$$ Ok para materiais frágeis

para materiais ducteis

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(2\gamma_s + \gamma_p)E}{a\pi}}$$

γ_p pode ser 1000x γ_s

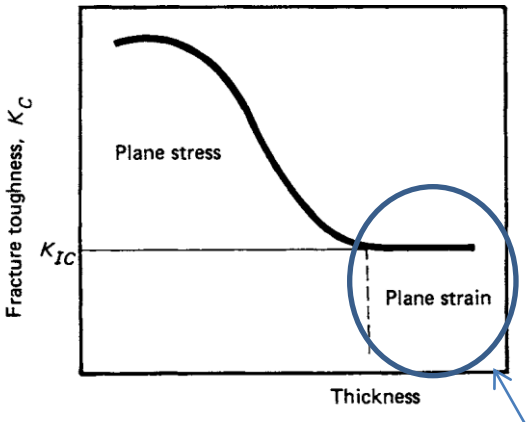
Mecânica da fratura

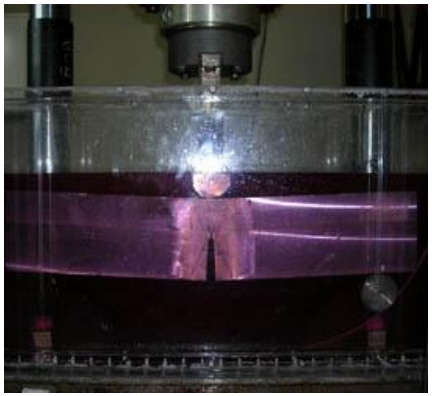
$$K_{IC}^2 = \frac{EG_{IC}}{1-\nu^2}(estado\,plano\,def.)$$

- Reescrevendo:

$$\sigma_c^2 a\pi = EG$$

$$K_c^2 = EG(estado\,plano\,tensão)$$

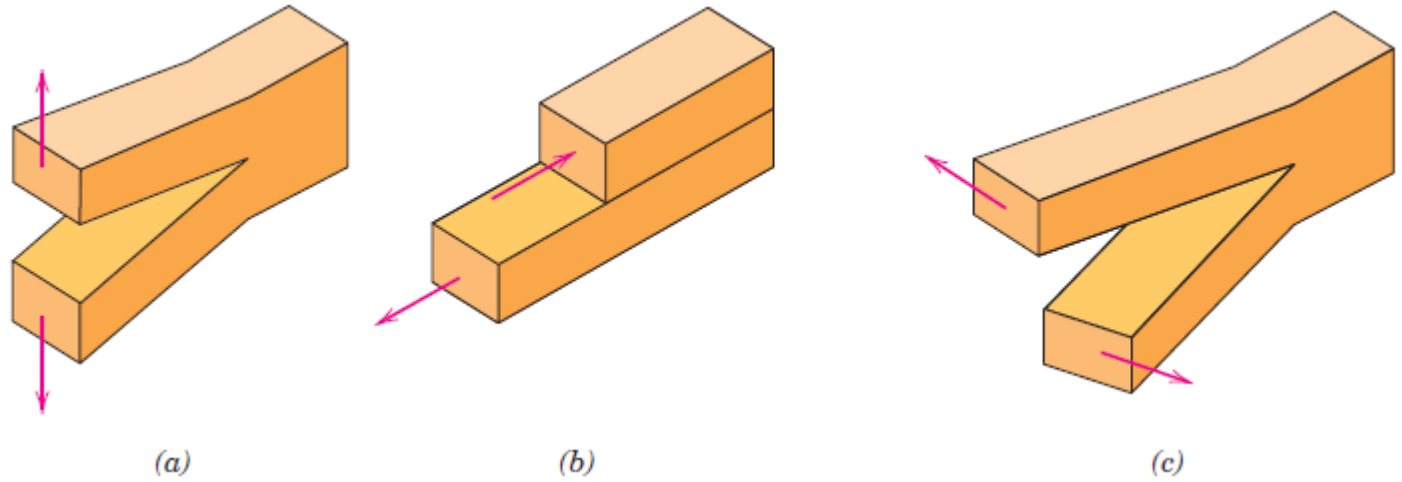




G representa a tenacidade -> energia liberada com o avanço da ponta da trinca para criação de uma nova superfície, na fratura G_c

G e G_c dependem da zona plástica (tipo de esforço, espessura do material) -> entretanto em condição de deformação plana é uma constante do material

Modos de trinca



Abertura ou tração

Deslizamento

Rasgamento

Mecânica da fratura

- Em princípio a aplicação é simples

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

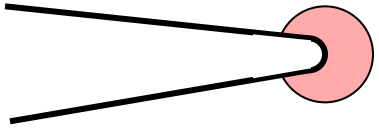
- Na prática utiliza-se um fator (Y – matemática complexa) para levar em conta a geometria dos defeitos e estruturas (estruturas finas)

$$K_{IC} = Y \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

- Difícil de determinar o tamanho dos defeitos
- Nem sempre se conhece com precisão o estado de tensão das estruturas

Mecânica da fratura

- Teoria elástica linear se aplica se a deformação plástica for desprezível
- Normalmente materiais de engenharia não são puramente frágeis (deformação plástica na ponta da trinca



$$r_p = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right]^2$$

- Parâmetro $\left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right]^2$ proporcional à zona plástica

Mecânica da fratura

- K_{IC} será válido se a zona deformada for pequena em relação à seção do corpo de prova, espessura maior que $2{,}5\left[K_{IC}/\sigma_e\right]^2$
  - Valor conservativo -> pode levar a tamanhos impraticáveis de corpos de prova (ex. material com tensão de escoamento de 350 MPa)

Corpos de prova finos não tem consequência se as partes projetadas forem mais finas ainda (Ex. Al aeronáutico)
Grave para peças espessas (ex. vaso de pressão de 304 mm – nuclear)

K_{IC} (MPam^{½})	t (mm)
30	18
60	73
90	165
120	294

Tamanho crítico diminui para materiais com maior limite de escoamento

Mecânica da fratura

- Reescrevendo

$$a = \frac{K_{IC}^2}{\sigma^2 Y^2 \pi}$$

- Tensão de projeto é uma fração da tensão de escoamento

$$a = \frac{n^2}{\pi Y^2}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$$

- Logo, a resistência a trinca aumenta com o aumentos da zona de deformação plástica

Quando uma trinca se propaga?

Trinca se propaga se a tensão exceder a

Tensão crítica

i.e., $\sigma_m > \sigma_c$

or $K_e > K_c$

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

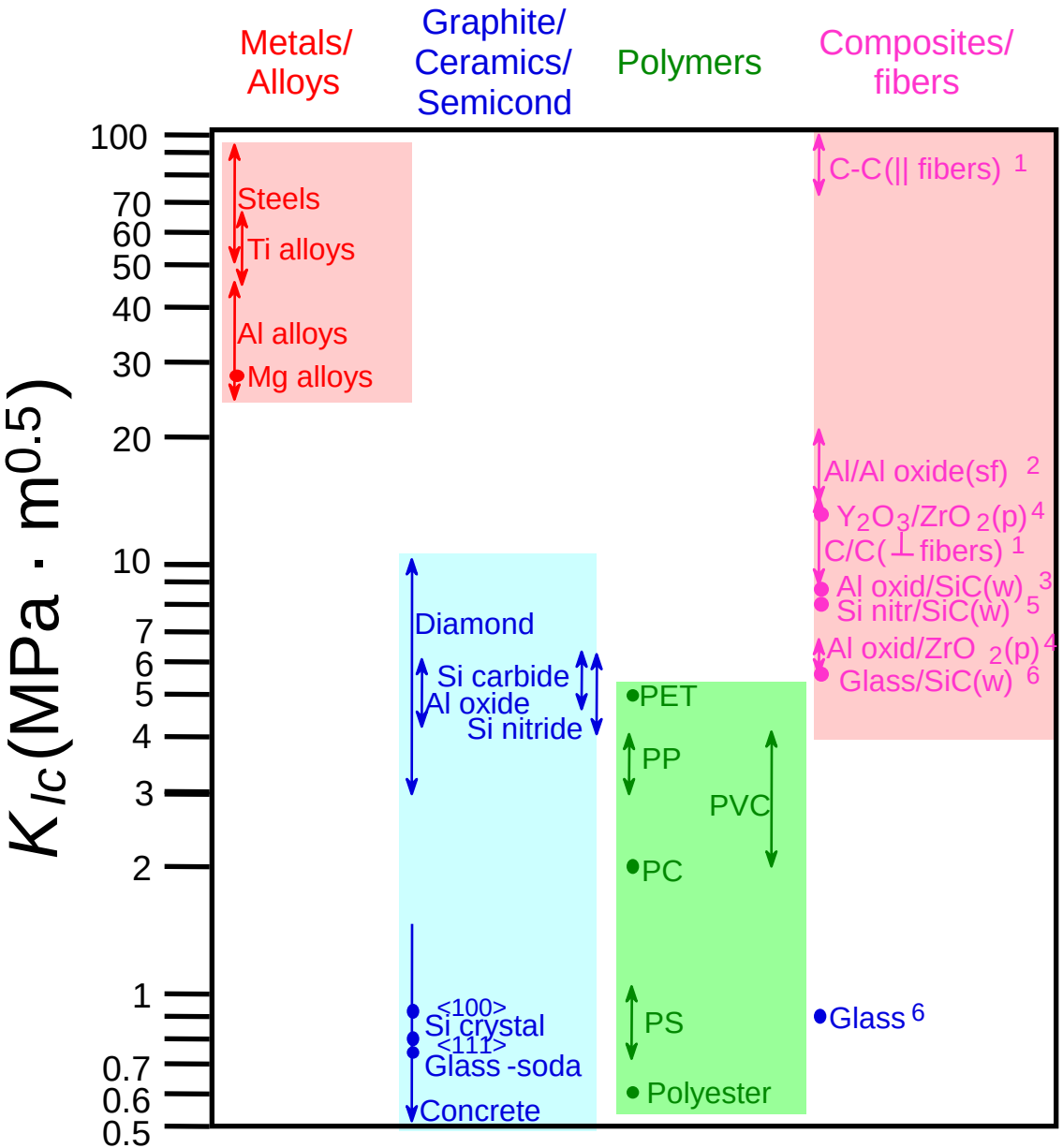
onde

- E = módulo de elasticidade
- γ_s = energia de superfície específica
- a = metade do comprimento da trinca
- $K_c = \sigma_c/\sigma_0$

Para materiais dúcteis=> substituir γ_s por $\gamma_s + \gamma_p$

onde γ_p é a energia de deformação plástica

Tenacidade a fratura

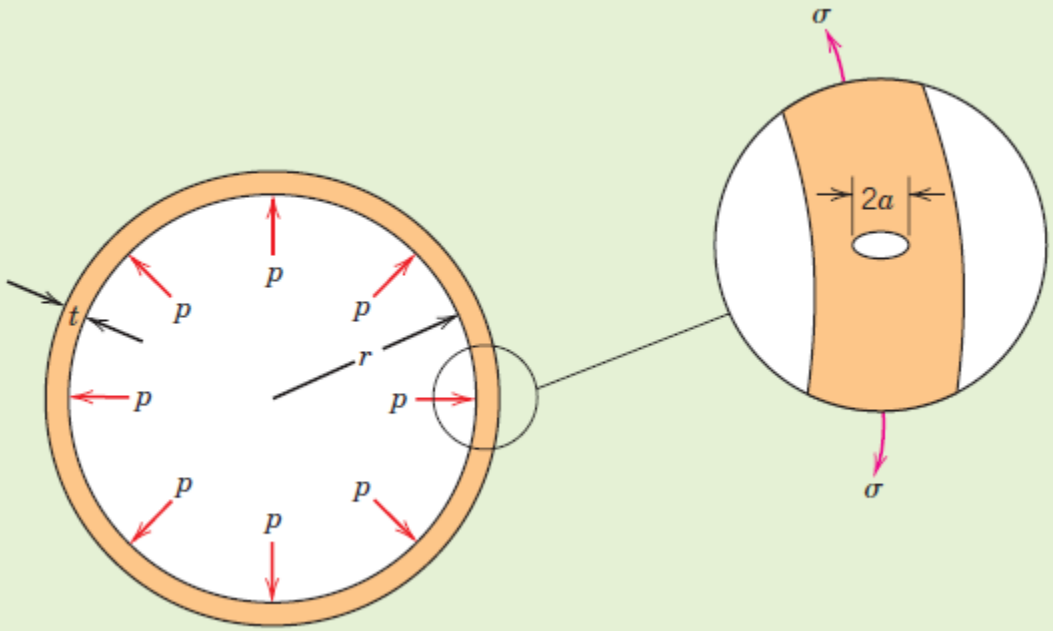


Based on data in Table B5, *Callister 7e*.

Composite reinforcement geometry is: f = fibers; sf = short fibers; w = whiskers; p = particles. Addition data as noted (vol. fraction of reinforcement):

1. (55vol%) *ASM Handbook*, Vol. 21, ASM Int., Materials Park, OH (2001) p. 606.
2. (55 vol%) Courtesy J. Cornie, MMC, Inc., Waltham, MA.
3. (30 vol%) P.F. Becher et al., *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol. 7, Plenum Press (1986). pp. 61-73.
4. Courtesy CoorsTek, Golden, CO.
5. (30 vol%) S.T. Buljan et al., "Development of Ceramic Matrix Composites for Application in Technology for Advanced Engines Program", ORNL/Sub/85-22011/2, ORNL, 1992.
6. (20vol%) F.D. Gace et al., *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 7 (1986) pp. 978-82.

Exercício - Callister



Material	$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}\right)^2$ *(mm)*
Medium carbon (1040) steel	43.1
AZ31B magnesium	19.6
2024 aluminum (T3)	16.3
Ti-5Al-2.5Sn titanium	6.6
4140 steel (tempered @ 482°C)	5.3
4340 steel (tempered @ 425°C)	3.8
Ti-6Al-4V titanium	3.7
17-7PH steel	3.4
7075 aluminum (T651)	2.4
4140 steel (tempered @ 370°C)	1.6
4340 steel (tempered @ 260°C)	0.93

$$\sigma = \frac{pr}{2t}$$

$$a = \frac{n^2}{\pi Y^2}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$$

Mecânica da fratura generalizada

- A teoria elástica permitiu uma grande avanço no entendimento e medidas de tenacidade. Entretanto para materiais muito dúcteis e seções muito grandes existe a necessidade e estender esta teoria para o regime elasto-plástico
- Uma proposta é de medir a separação entre as superfícies na ponta de trinca (maior separação = maior tenacidade) -> sem problemas de tamanho de corpo de prova (dificuldades técnicas de medida)

Tenacidade de polímeros e adesivos

- Ganhando espaço por sua tenacidade (ex. compósitos)
- Mecanismos distintos dos metais e das cerâmicas (transição vítrea, viscoelasticidades (dependência com o tempo))
- Nem sempre a mecânica da fratura convencional pode ser aplicada

Seleção de materiais por tenacidade

- Tradicionalmente os projetos de engenharia iniciam-se considerando apenas resistência mecânica e rigidez (desconsiderando tenacidade) -> possibilidade de grandes falhas
- Hoje é consenso que a tenacidade deve ser considerada ao menos com o mesmo grau de importância das demais propriedades
- Como nos demais casos podemos pensar na tenacidade como dependente do material ou do projeto

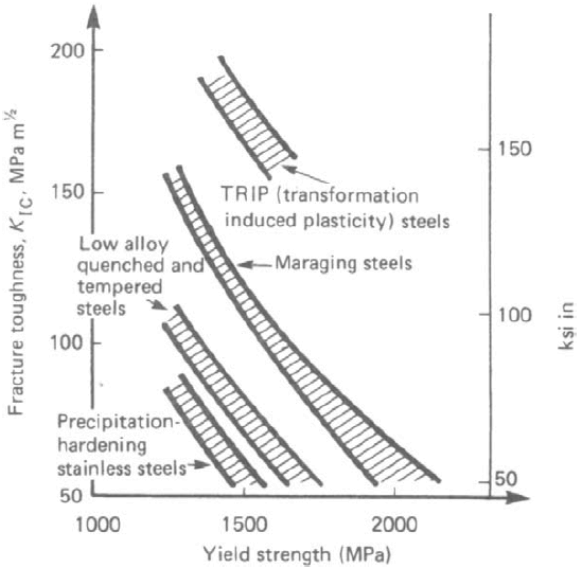
Seleção de materiais por tenacidade

- No projeto, maiores seções são menos tenazes que seções mais finas (maiores restrições à deformação plástica) -> seções muito espessas podem comprometer a tenacidade de materiais normalmente tenazes.
- Normalmente em uma classe

de materiais: limite de escoamento

e tenacidade são inversamente

proporcionais



Seleção de materiais por tenacidade

- Para materiais de elevada resistência muitos dados estão disponíveis -> ok para projeto
- Para materiais de baixa resistência o projeto é mais complicado
- Importante para aços estruturais -> dificuldade de estabelecer o nível desejado
- Nível quantitativo insuficiente e deve ser melhorado

Seleção de materiais por tenacidade

- Dados comparativos de K_{IC} para alguns materiais

Variação importante para materiais da mesma classe (medida e processamento + faixa de especificações da norma)

Como referência, **60 MPam^{½}** é um valor considerável de tenacidade

TABLE 7.4. Typical values of plane strain fracture toughness K_{IC}

	Strength		*Fracture toughness*	
	MPa	ksi	MPa m^{½}	ksi. in^{½}
Steels				
Medium-carbon steel	260	37.7	54	49
Pressure-vessel steel A533B Q and T	500	72.5	200	182
Maraging steel	1390	202	110–176	100–160
	1700	247	99–165	90–150
	1930	280	85–143	80–130
300M	2033	295	66	60
	1895	275	83	75
AISI 4340	1758	255	77	70
	1930	280	61	55
AISI 4340 Tempered 200°C, commercial purity	1650	239	40	36
Tempered 200°C, high purity	1630	236	80	73
Aluminium alloys				
2024–T4	346	50	55	50
2024–T851	414	60	24	22
7075–T6	463	67	38–66	35–60
7075–T651	482	70	31	28
7178–T6	560	81	23	21
7178–T651	517	75	24	22
Titanium alloys				
Ti–6Al–4V	830	120	50–60	45–55
Ti–6Al–5Zr–0.5Mo–0.2Si	877	127	60–70	55–65
Ti–4Al–4Mo–2Sn–0.5Si	960	139	40–50	36–45
Ti–11Sn–5Zr–2.25Al–1Mo–0.2Si	970	141	35–45	32–41
Ti–4Al–4Mo–4Sn–0.5Si	1095	159	30–40	27–36
Thermoplastics				
PMMA	30	4	1	0.9
GP Polystyrene	—	—	1	0.9
Acrylic sheet	—	—	2	1.8
Polycarbonate	—	—	2.2	2.0
Others				
Concrete	—	—	0.3–1.3	0.3–1.2
Glass	—	—	0.3–0.6	0.3–0.5
Douglas fir	—	—	0.3	0.3

Seleção de materiais por tenacidade

- Com K_{IC} podemos calcular o maior defeito aceitável ou a maior tensão admissível

$$a = \frac{n^2}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$$

- Ex: com n=2 (influência da estrutura)

Aço	Estrutura	σ_e (MPa)	K_{IC} (MPam$^{1/2}$)	a (mm)
A212	Ferrita-perlita	283	77	94
A533	Mistura de produtos de transformação	427	95	63
A543	Bainita inferior	586	181	121

Pior relação entre σ_e e K_{IC}

Seleção de materiais por tenacidade

Ex: Chapas de Al -> K_{IC} determinado para chapas de 6mm com trinca no centro

Liga	σ_e (MPa)	K_{IC} (MPam^{½})
2024-T3	276	121
7178	448	41
2024-T81	400	70
7075-T73	386	82

Decidir o menor tamanho de trinca detectável por um determinado teste não destrutivo (30mm -> a=15mm), com n=1,6

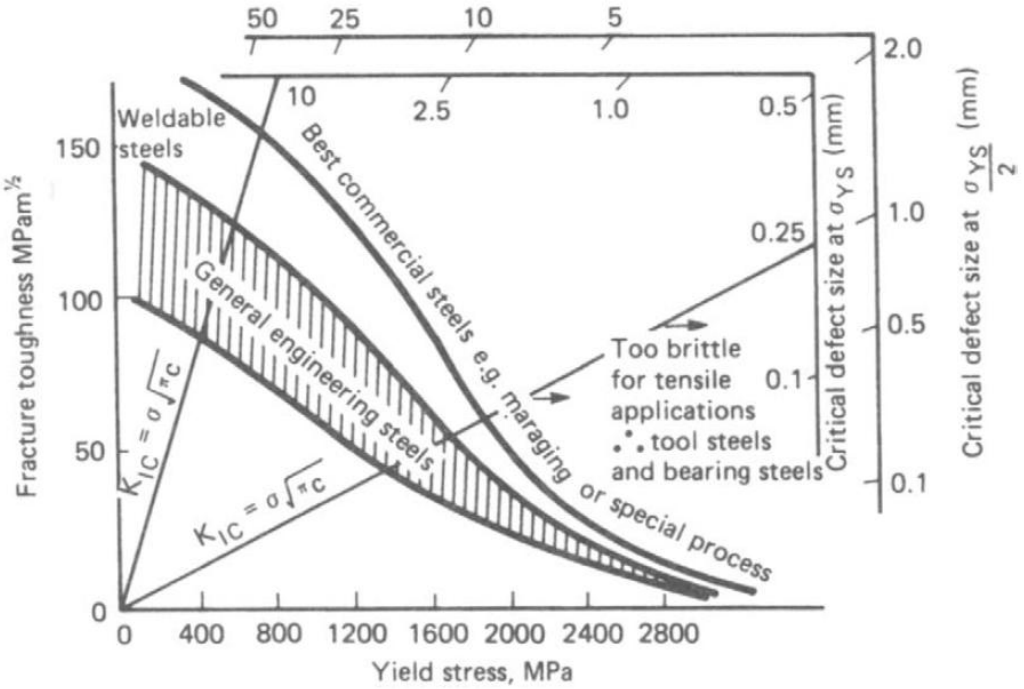
$$a = \frac{n^2}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$$

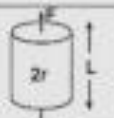
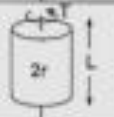
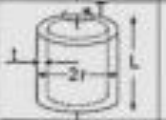
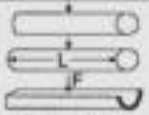
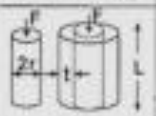
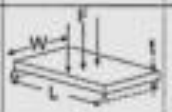
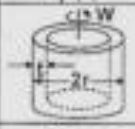
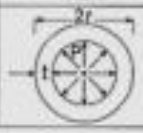
Liga	$\sigma_{projeto}$ (MPa)	σ_c (MPa)	$\sigma_c/\sigma_{projeto}$
2024-T3	172	504	2,9
7178	280	171	0,6
2024-T81	250	292	1,2
7075-T73	241	342	1,4

Seleção de materiais por tenacidade

- Tamanho aceitável de trinca vai de alguns mm para pequenas peças até algumas dezenas de mm para grandes estruturas.

Diagrama para aços temperados e revenidos



MODO DE CARREGAMENTO		MINIMIZAÇÃO DE PESO PARA... Rigidez	Resistência dobramento	Resistência fratura
Barra em tração		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$
Barra em torção		$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$
Tubo em torção		$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$
Barra e tubos em flexão		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}^{2/3}}{\rho}$
Flambagem de coluna e tubo		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	—	—
Chapa em flexão		$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}^{1/2}}{\rho}$
Flambagem de chapa		$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	—	—
Cilíndro em rotação		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$
Vaso de pressão cilíndrico		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$
Vaso de pressão esférico		$\frac{E}{(1-\nu)\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{Ic}}{\rho}$

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.

É importante lembrar

- Qual sua importância
- Material tenaz x Projeto tenaz
- Como levá-la em conta no projeto
  - Medidas
  - Mecânica da fratura
- O que influência a tenacidade dos materiais metálicos de um ponto de vista microestrutural
- Índices de mérito