

05

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

Ciências Exatas

Prof. Luis Fernando Maffeis Martins

Propriedades mecânicas

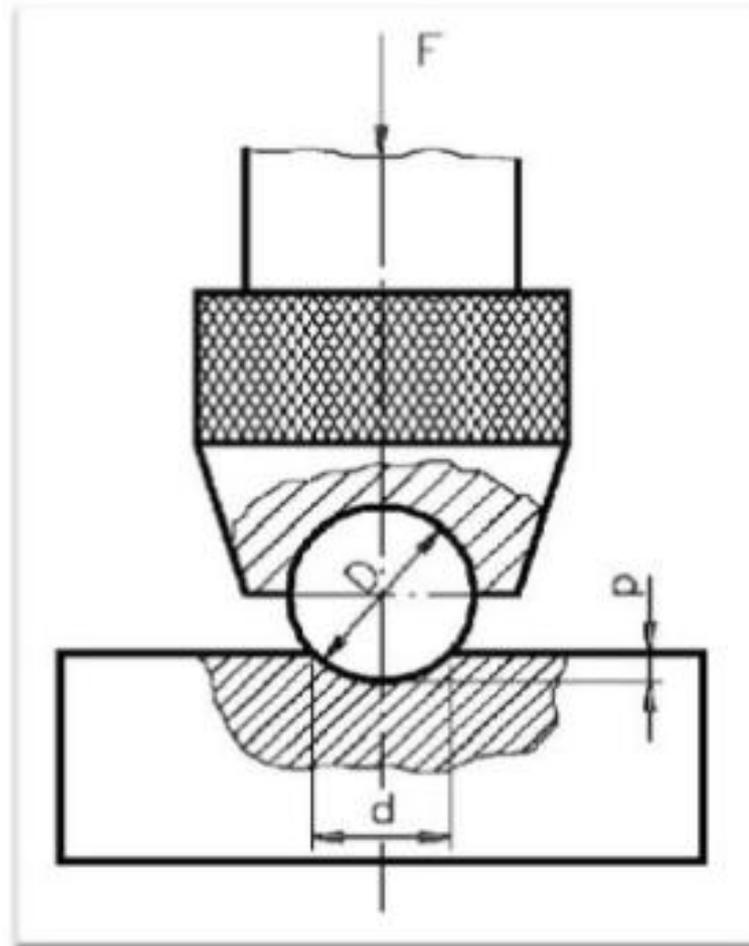
Principais ensaios realizados em materiais metálicos

- tração
- dureza
- impacto
- fadiga
- fluência

Ensaio de dureza



Ensaio de dureza



Ensaio de dureza - escalas

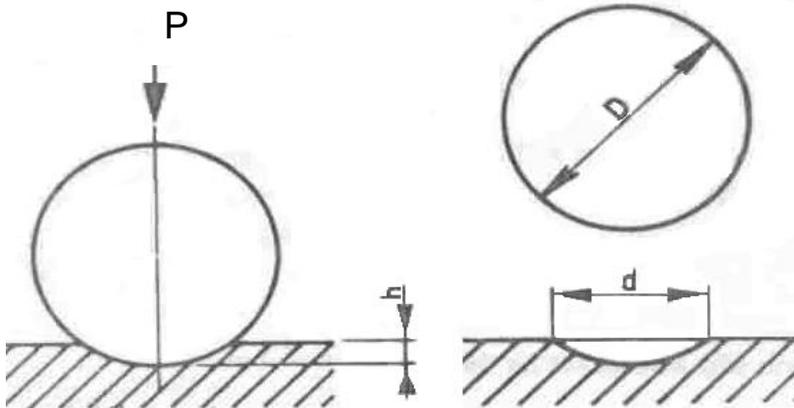
Escala	Norma ABNT	Norma ASTM
Brinell	NBR 6394	E10
Rockwell	NBR 6671	E18
Vickers	NBR 6672	E92

Conversão entre medidas de diferentes escalas: ASTM E140

Escala Brinell

Baseia-se na impressão, sobre o material, de uma esfera de ϕD , com força P .

A deformação no material, de ϕd define a dureza do material



$$HB = \frac{2.P}{\pi.D. \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$$

P ... carga em Kg

D ... diâmetro da esfera (mm)

d ... diâmetro da marca (mm)

Parâmetros do ensaio

Força:

de 5 a 3000 kgf

Esfera:

φ D de 1 a 10 mm

Diâmetro nominal da esfera "D" (mm)	Força de ensaio para graus de carga									
	30		10		5		2,5		1,25	
	N	kgf	N	kgf	N	kgf	N	kgf	N	kgf
10	29.420	3.000	9.800	1.000	4.900	500	2.450	250	1.225	125
5	7.355	750	2.450	250	1.225	125	613	62,5	306,5	31,25
2,5	1.840	187,5	613	62,5	306,5	31,25	153,2	15.625	76,6	7.812
1	294	30	98	10	49	5	-	-	-	-

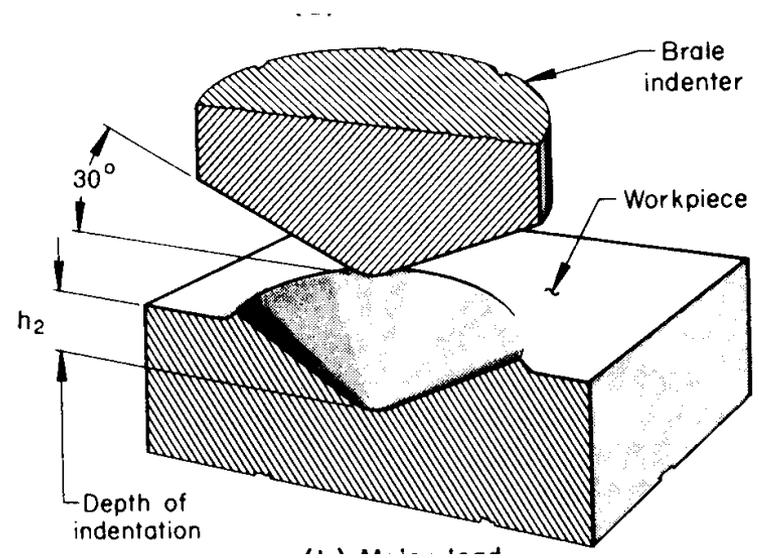
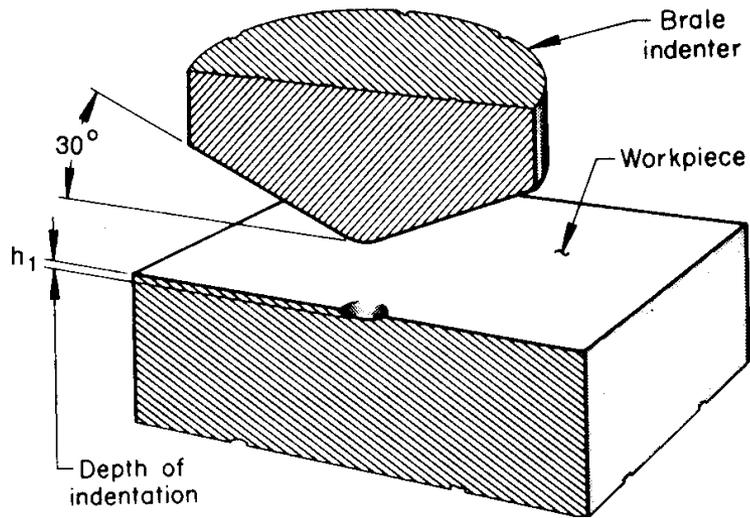
Grau de Carga:

$$G = F / D^2$$

Grau de carga	30	10	5	2,5	1,25
Intervalo de dureza abrangido	450 a 95,5	200 a 31,8	100 a 15,9	50 a 7,9	25 a 4
Grupos de metais para os quais devem ser preferencialmente empregados os graus de carga indicados.	Ligas ferrosas e ligas de alta resistência		Metais e ligas não ferrosas		
	Ferro Aço Aço fundido Ferro fundido Ligas de titânio Ligas de níquel e cobalto para temperaturas elevadas	Ligas de alumínio Ligas de cobre Ligas de magnésio Ligas de zinco Latões Bronzes Cobre Níquel	Alumínio Magnésio Cobre Zinco Latão fundido	Ligas de estanho Ligas de chumbo	Ligas de chumbo Ligas de estanho Metal patente

Escala Rockwell

Baseia-se na a profundidade da impressão formada sobre a superfície do material.



Escala Rockwell

Escala	Penetrador	Carga (kgf)	Leitura na Escala	Aplicações Típicas
B	Esfera 1,58 mm	100	Vermelha	FoFo (ferro fundido), aços não-temperados
C	Diamante (cone)	150	Preta	Aço temperado ou cementado
A	Diamante (cone)	60	Preta	Metal duro, aço fundido/temperado/rápido
D	Diamante (cone)	100	Preta	Aço fundido com espessura reduzida
E	Esfera 3,175 mm	100	Vermelha	FoFo, ligas de alumínio e magnésio, metal duro
F	Esfera 1,588 mm	60	Vermelha	Metais moles, ligas de cobre
G	Esfera 1,588 mm	150	Vermelha	Bronze, fósforo, ligas de berílio, FoFo maleável
H	Esfera 3,175 mm	60	Vermelha	Alumínio, zinco, chumbo, abrasivos
K	Esfera 3,175 mm	150	Vermelha	Metal duro e metais de baixa dureza
L	Esfera 6,350 mm	60	Vermelha	Mesma Rockwell K, borracha e plásticos
M	Esfera 6,350 mm	100	Vermelha	Mesma Rockwell K e L, madeira e plásticos
P	Esfera 6,350 mm	150	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plásticos
R	Esfera 12,700 mm	60	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plásticos
S	Esfera 12,700 mm	100	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plásticos
V	Esfera 12,700 mm	150	Vermelha	Mesma Rockwell K, L, M, P e R ou S

Penetradores

- Esfera
- Cone de diamante

Forças de Ensaio

Pré-carga	Carga
Normal:	10 kgf
Superficial:	3 kgf Tabela abaixo.

Símbolos Rockwell	Força inicial F_0		Força complementar F_1		Força de ensaio F	
	N	kgf	N	kgf	N	kgf
HRA	98 ± 2	10 ± 0,2	490	50	588 ± 5	60 ± 0,5
HRA 62,5	98 ± 2	10 ± 0,2	515	52,6	613 ± 5	62,5 ± 0,5
HRB	98 ± 2	10 ± 0,2	883	90	980 ± 6,5	100 ± 0,65
HRF	98 ± 2	10 ± 0,2	490	50	588 ± 5	60 ± 0,5
HRC	98 ± 2	10 ± 0,2	1373	140	1471 ± 9	150 ± 0,9
HR 15 N	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	117,6	12	147 ± 1	15 ± 0,1
HR 15 T	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	117,6	12	147 ± 1	15 ± 0,1
HR 30 N	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	265	27	294 ± 2	30 ± 0,2
HR 30 T	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	265	27	294 ± 2	30 ± 0,2
HR 45 N	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	412	42	441 ± 3	45 ± 0,3
HR 45 T	29,4 ± 0,6	3 ± 0,06	412	42	441 ± 3	45 ± 0,3

Gamas de Dureza

Rockwell B	0 a 105
Rockwell C	20 a 71
Rockwell F	30 a 100
Rockwell 15 N	67 a 92
Rockwell 30 N	41 a 82
Rockwell 45 N	19 a 73
Rockwell 15 T	72 a 93
Rockwell 30 T	16 a 86
Rockwell 45 T	7 a 72

Designação

D = 30 HRA;

D = 60 HRC;

D = 70 HR 30 N

Vantagens

- Rapidez
- Reprodutividade
- Menor erro de operador
- Sensível a pequenas diferenças em aços de alta dureza
- Pequena impressão: não destrutivo
- Uso de pré-carga: menor necessidade de preparação

Desvantagens

- Escala não contínua
- Requer mudança de penetrador / carga

Escala Vickers

Introdução

Método: impressão de um penetrador de diamante, com força F .

A partir da média das diagonais produzida deduz-se a dureza do material.

Aplicação

Todos materiais metálicos com quaisquer dureza, camadas endurecidas de elevada dureza, peças pequenas, finas e com forma irregular. Com micro-carga é usada também para medir a dureza de fases numa microestrutura multifásica.

Cargas

- microcarga: 1 a 200 gf
- carga pequena: 200 gf a 5 kgf
- normal: 5 a 100 kgf

Penetrador

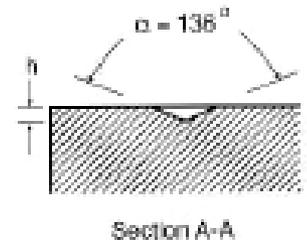
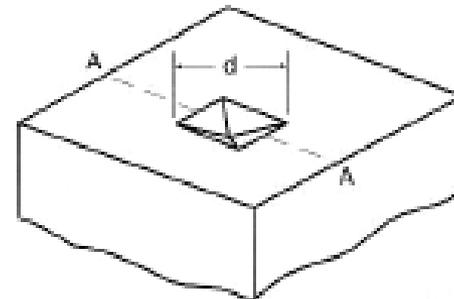
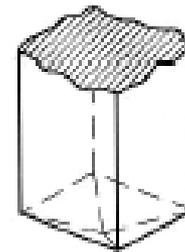
Tronco de cone de diamante de base quadrada.

Definição

$$HV = \frac{1,854.P}{d^2}$$

P ... carga em Kg

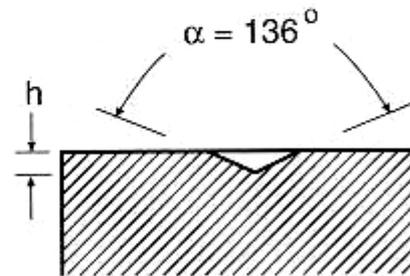
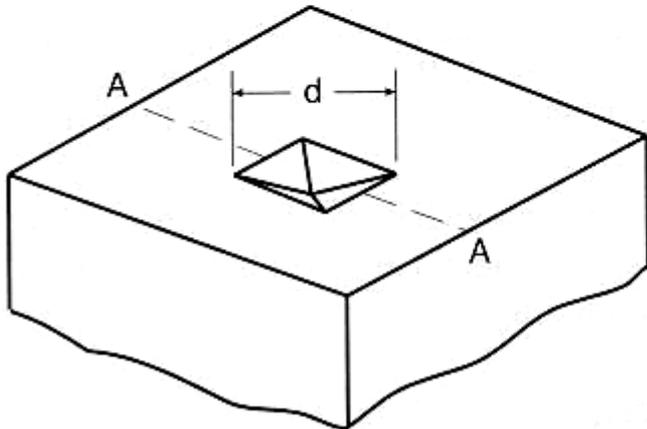
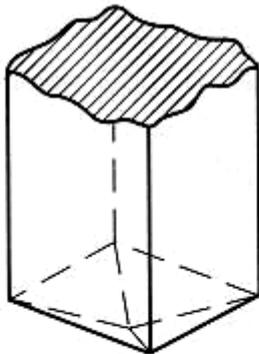
d ... diagonal da marca (mm)



ESCALA DE DUREZA VICKERS

$$HV = \frac{1,854.P}{d^2}$$

P ... carga em Kg
d ... diagonal da marca (mm)



Section A-A

- Unidade: HV
- Números sempre inteiros

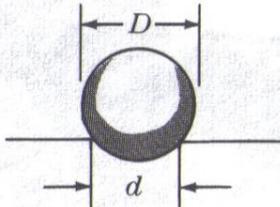
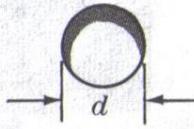
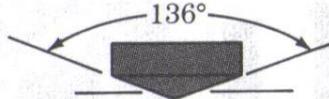
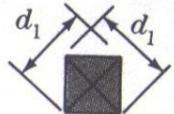
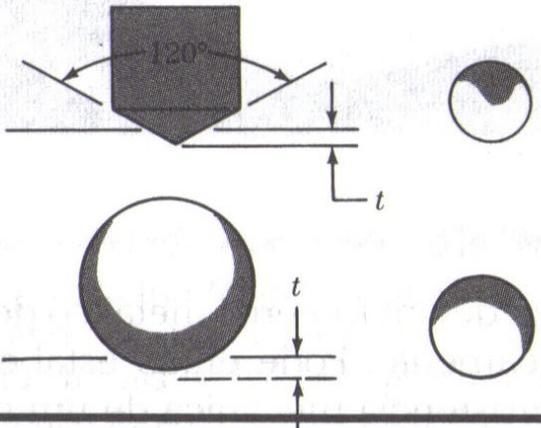
Ensaio	Penetrador	Forma da impressão		Carga	Equação para cálculo da dureza
		Vista lateral	Vista de topo		
Brinell	Esfera de aço ou de carboneto de Tungstênio			P	$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirâmide de Diamante			P	$HV = \frac{1,854 P}{d_1^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cone de diamante			60 kg	R_A
				150 kg	R_C
				100 kg	R_D
B } F } G }	Esfera de aço com 1,6 mm de diâmetro			100 kg	R_B
				60 kg	R_F
				150 kg	R_G
E	Esfera de aço, com 3,2 mm de diâmetro			100 kg	R_E

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

Rockwell C Hardness Number	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness Number ^a		Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness ^b	Rockwell C Hardness Number
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf Load	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf Load	A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	D Scale, 100-kgf Load, Diamond Penetrator	15-N Scale, 15-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator	30-N Scale, 30-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator	45-N Scale, 45-kgf Load, Superficial Diamond Penetrator		
68	940	...	...	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	739	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	...	722	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	...	705	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	...	688	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	...	670	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	...	654	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	...	634	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	...	615	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	...	595	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	...	577	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	595	...	560	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	...	543	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	...	525	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	500	512	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	487	496	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	475	481	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	464	469	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38

Conversão entre as
 escalas de
 dureza segundo a
 Norma ASTM E 140

Falhas



Falhas



Falhas



Falhas



Falhas

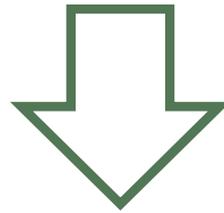


Falhas



Falhas

- O projeto de um componente ou de uma estrutura deve minimizar a possibilidade de ocorrência de falhas.



- É necessário compreender as modalidades de falhas

Motivos que podem gerar falhas

Motivos que podem gerar falhas

- Projeto inadequado

Motivos que podem gerar falhas

- Projeto inadequado
 - Má utilização

Motivos que podem gerar falhas

- Projeto inadequado
 - Má utilização
- Falha na execução

Motivos que podem gerar falhas

- Projeto inadequado
 - Má utilização
 - Falha na execução
- Materiais não apropriados

Fratura

- Fratura simples: Separação de um corpo em dois ou mais pedaços em resposta a uma tensão imposta de natureza estática e a temperaturas baixas se comparadas ao ponto de fusão do material.
- A tensão pode ser:
 - tração
 - compressão
 - cisalhamento
 - torção

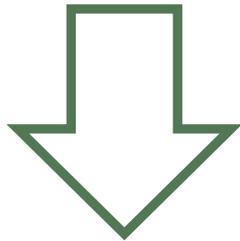
Modos de fratura

frágil

dúctil

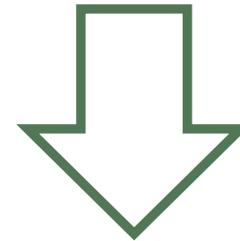
Modos de fratura

frágil



pouca ou nenhuma deformação
plástica

dúctil

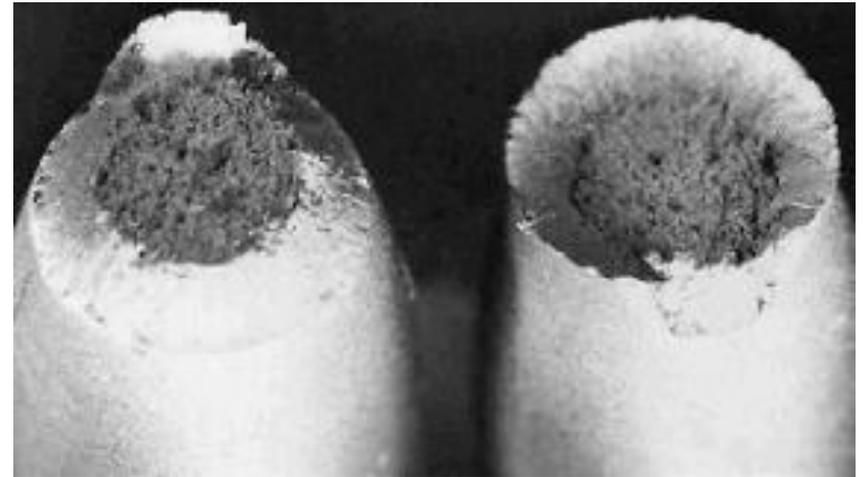


deformação plástica substancial

Modos de fratura

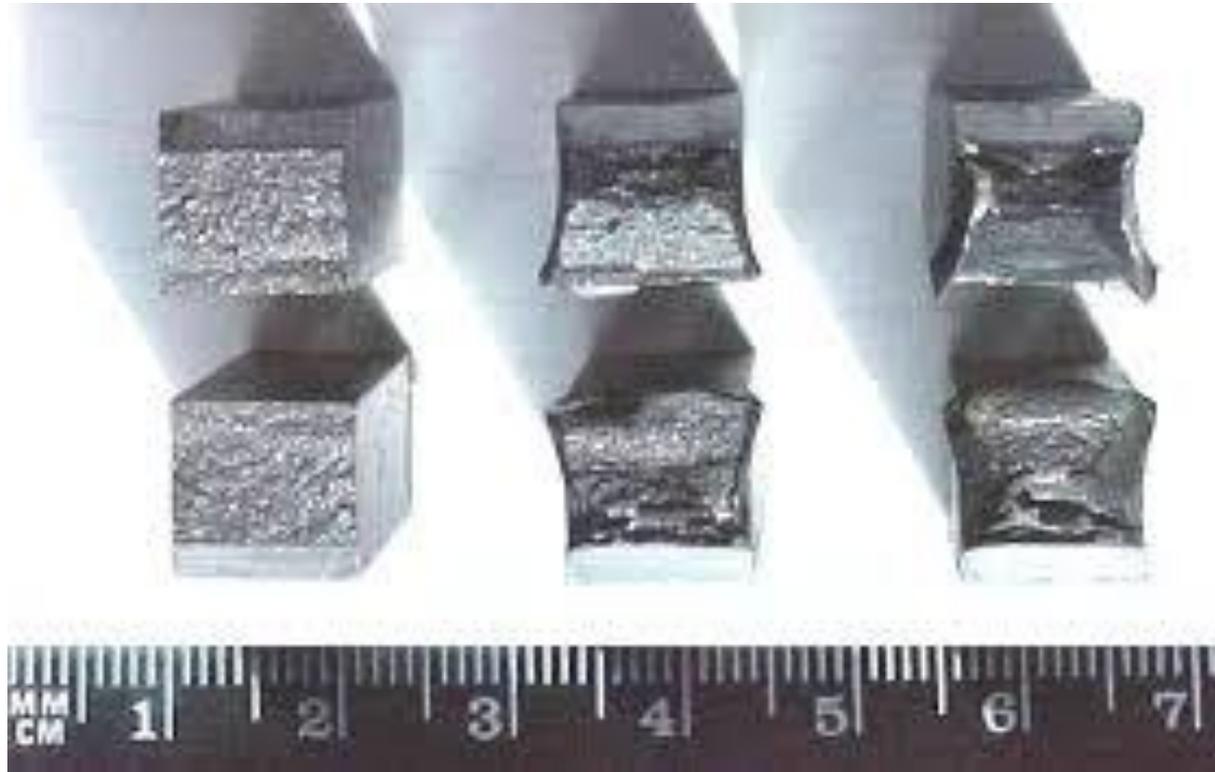


frágil



dúctil

Modos de fratura



frágil

dúctil

Fratura dúctil

- extensa deformação plásticas nas vizinhas da trinca que está se propagando

Fratura dúctil

- extensa deformação plásticas nas vizinhas da trinca que está se propagando
- processo relativamente lento

Fratura dúctil

- extensa deformação plásticas nas vizinhas da trinca que está se propagando
- processo relativamente lento
- “trinca estável”: resiste à propagação a não ser que ocorra aumento da tensão aplicada

Fratura dúctil

- extensa deformação plásticas nas vizinhas da trinca que está se propagando
- processo relativamente lento
- “trinca estável”: resiste à propagação a não ser que ocorra aumento da tensão aplicada
- evidências de deformação nas superfícies da fratura

Fratura frágil

- inexistência ou baixa presença de deformação plástica nas vizinhanças da trinca que se propaga

Fratura frágil

- inexistência ou baixa presença de deformação plástica nas vizinhanças da trinca que se propaga
- processo extremamente rápido

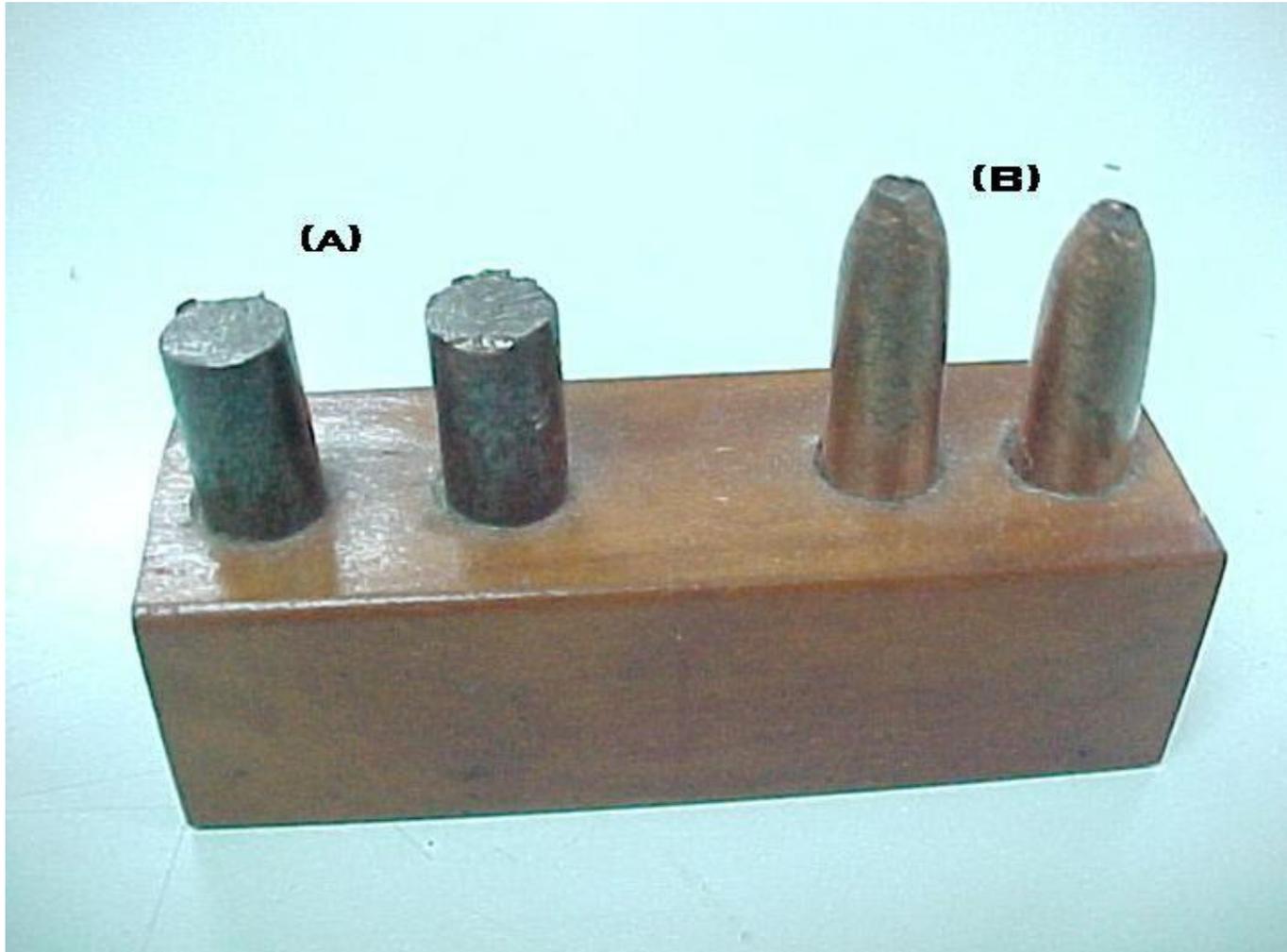
Fratura frágil

- inexistência ou baixa presença de deformação plástica nas vizinhanças da trinca que se propaga
- processo extremamente rápido
- “trinca instável”: propagação da trinca, após iniciada, ocorre espontaneamente, sem necessidade de aumento da tensão aplicada

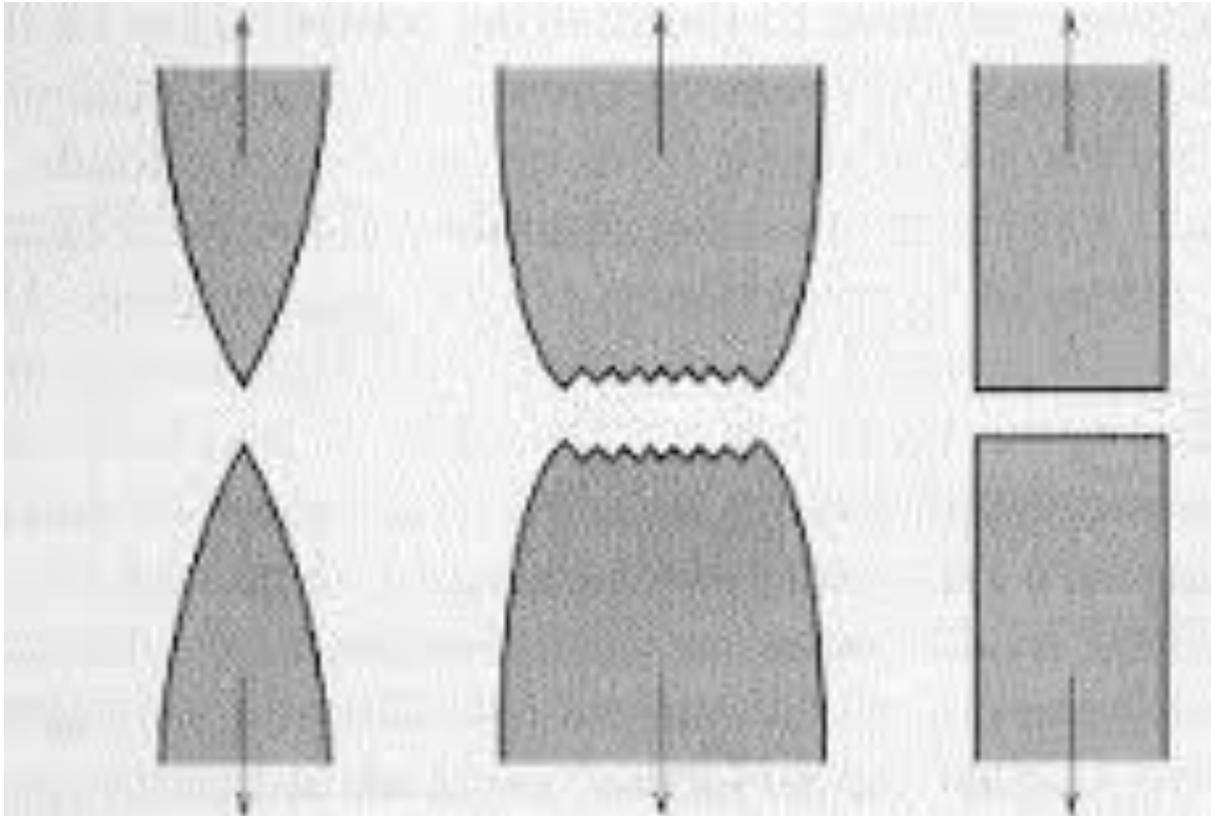
Fratura frágil

- inexistência ou baixa presença de deformação plástica nas vizinhanças da trinca que se propaga
- processo extremamente rápido
- “trinca instável”: propagação da trinca, após iniciada, ocorre espontaneamente, sem necessidade de aumento da tensão aplicada
- inexistência ou baixa presença de deformação nas superfícies da fratura

Modos de fratura

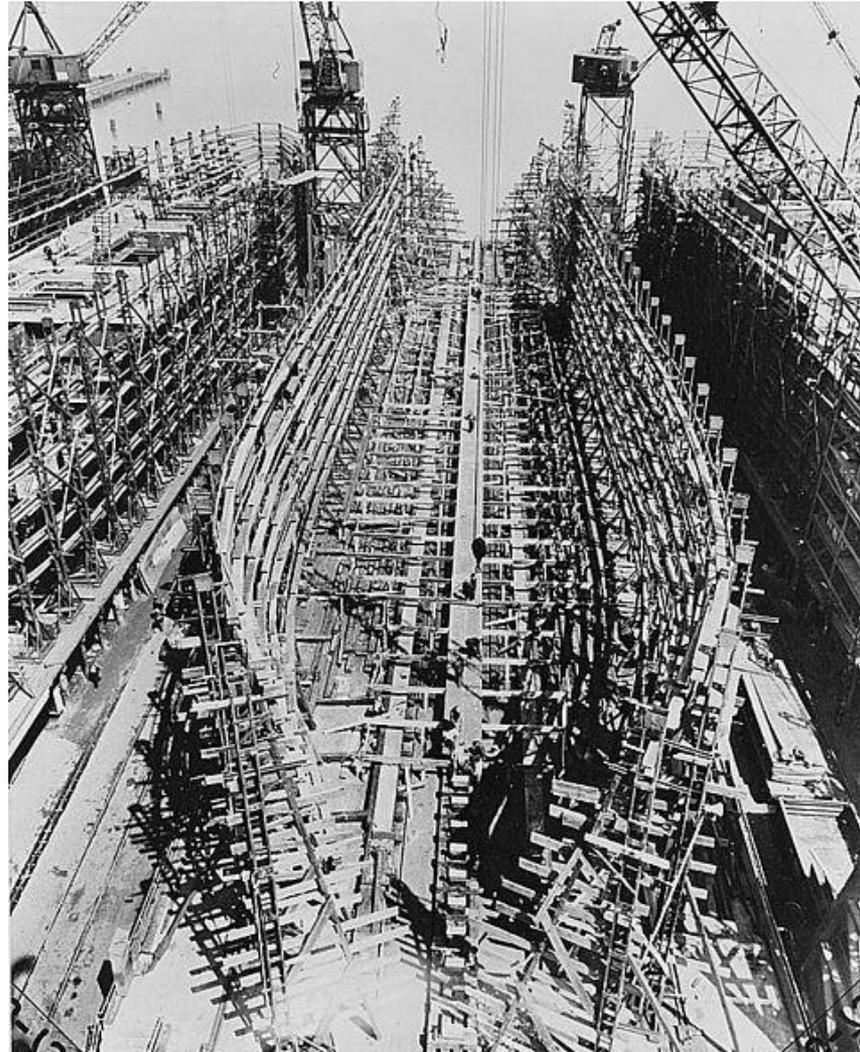


Modos de fratura

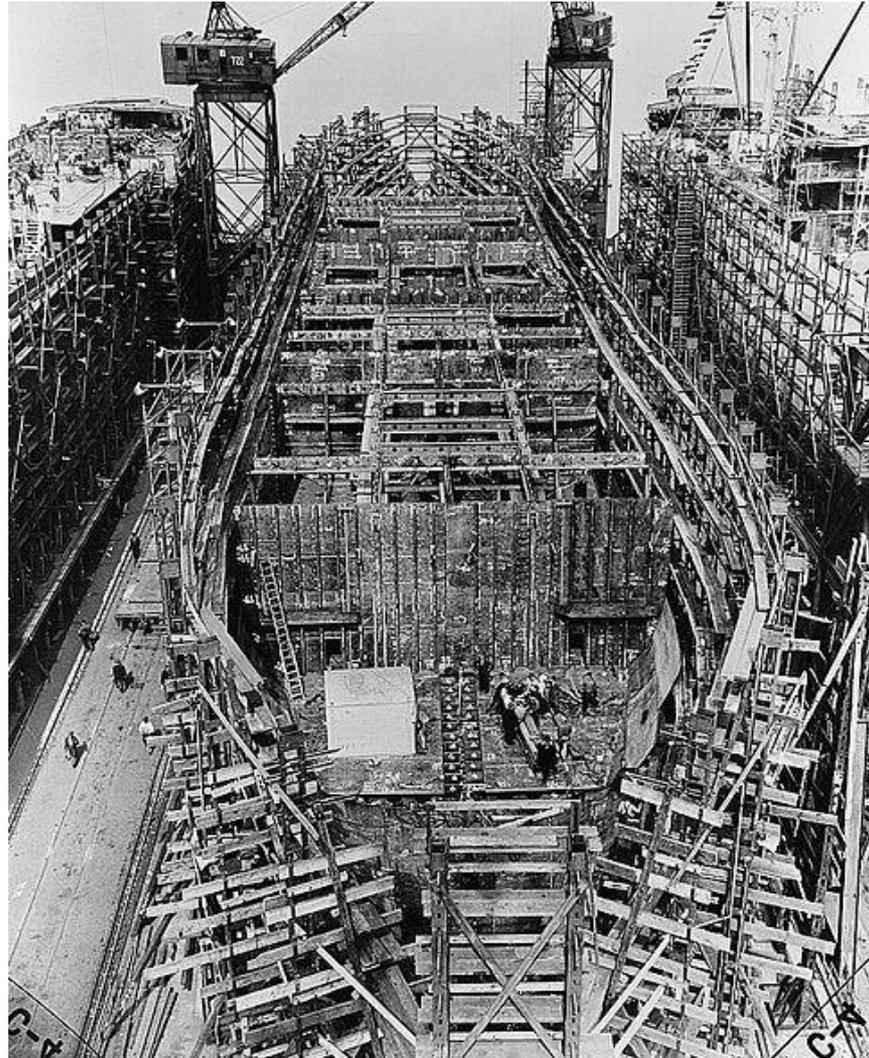


Qual o modo de fratura preferível ?

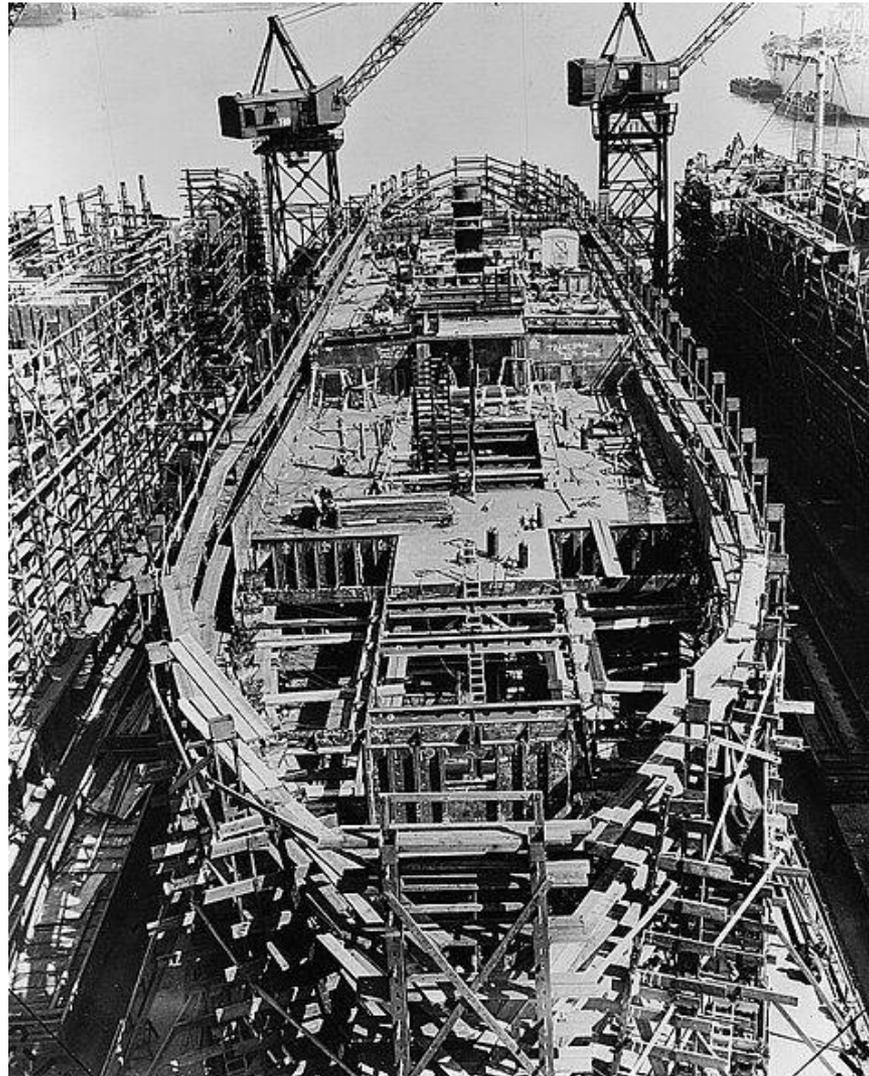
Liberty ships



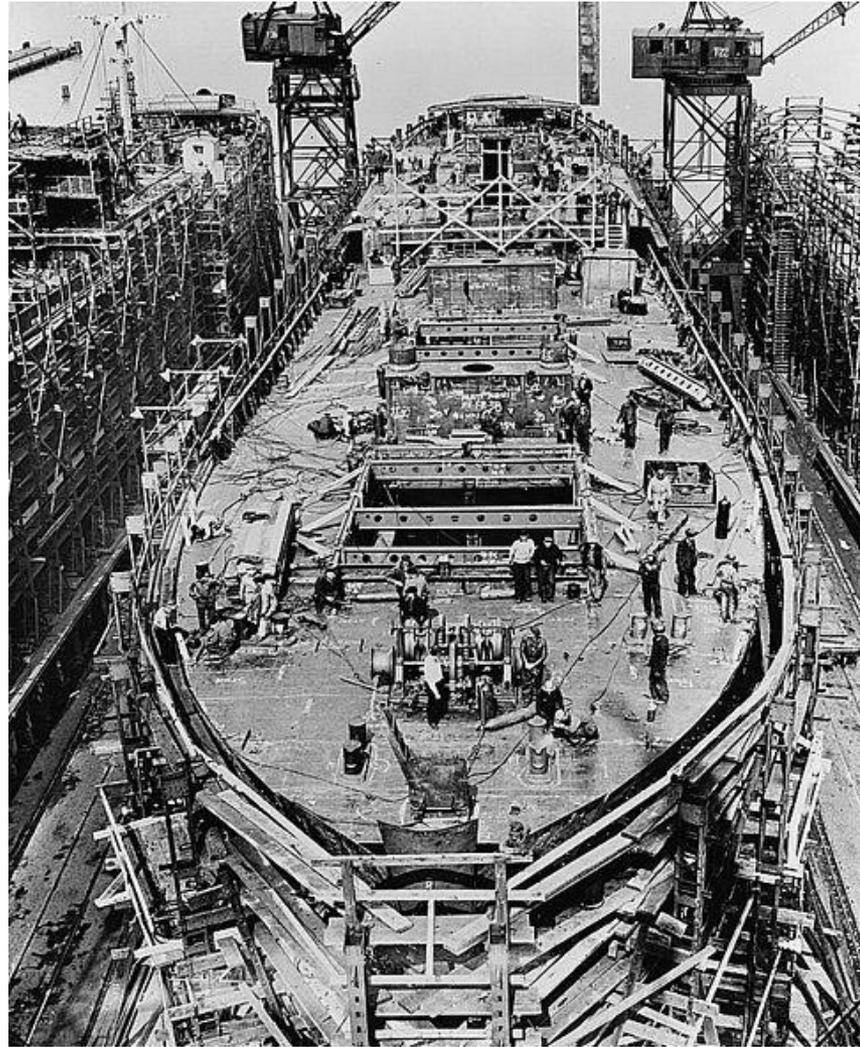
Liberty ships



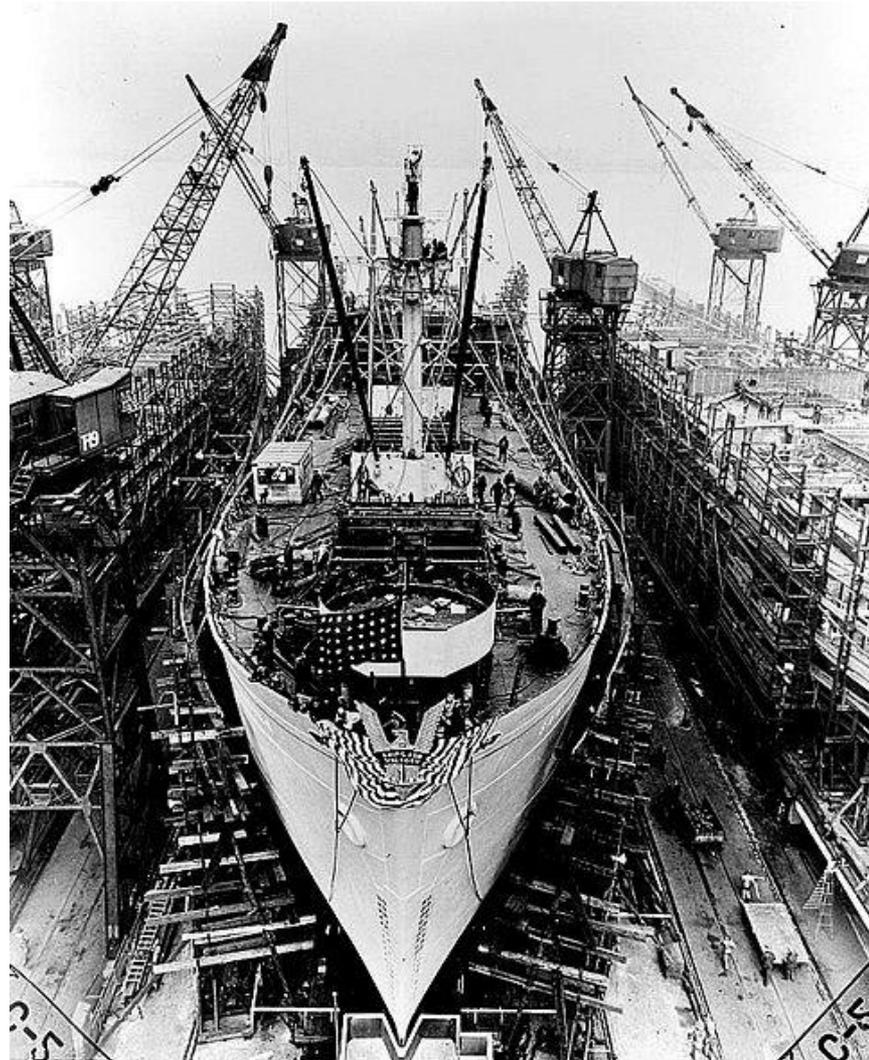
Liberty ships



Liberty ships



Liberty ships



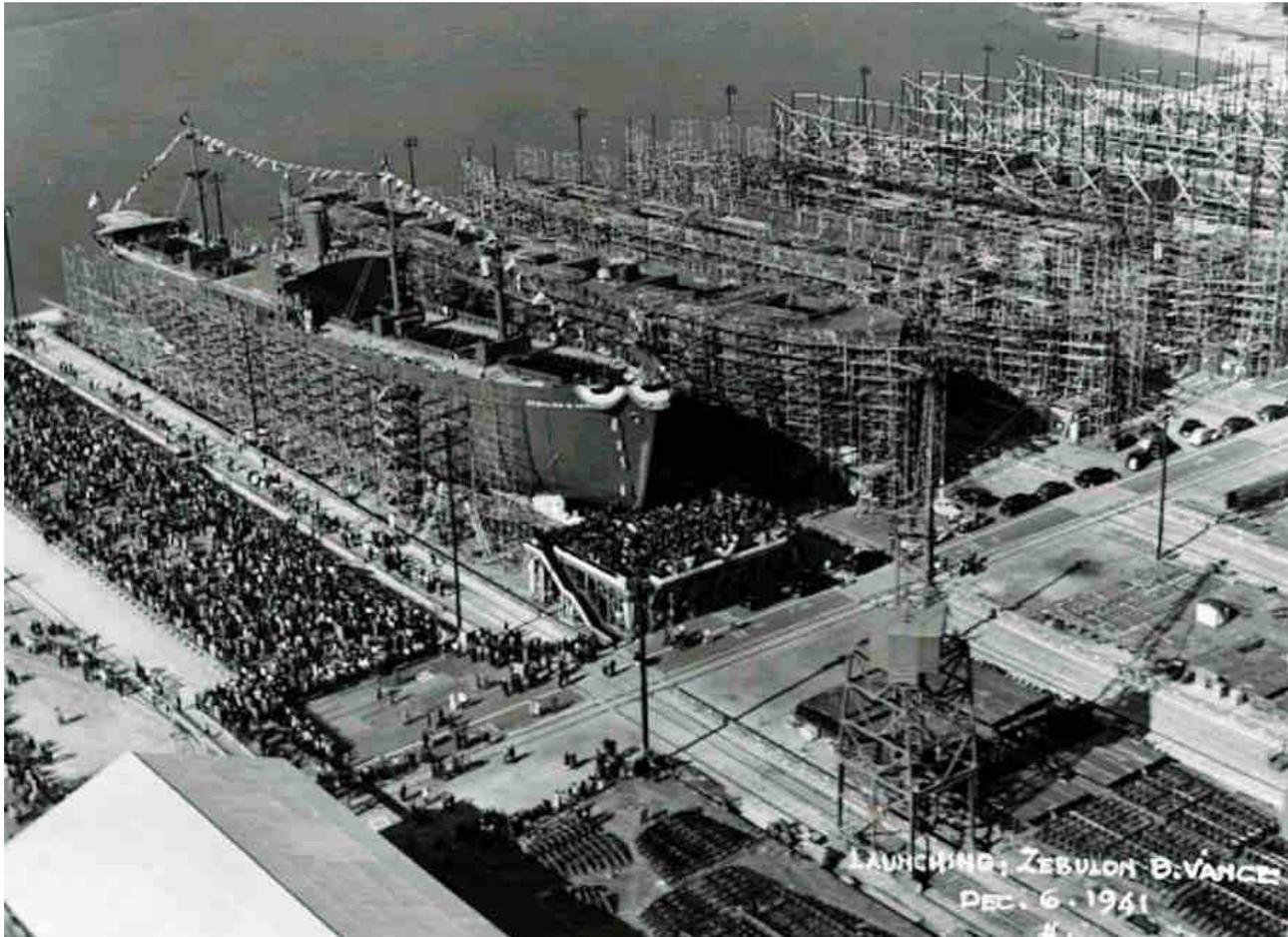
Liberty ships



Liberty ships



Liberty ships



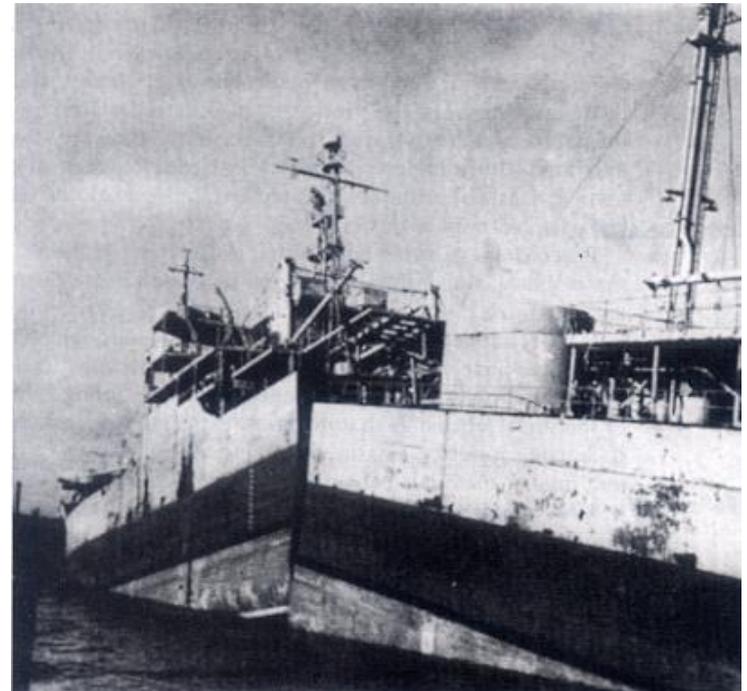
Liberty ships



Liberty Ships

Essa classe de navios foi a primeira a utilizar uma nova tecnologia de soldagem completa de casco.

- Foram construídos 2700 navios.
- 400 navios sofreram fraturas em “águas geladas”
- Em 90 navios as fraturas foram consideradas graves.
- 10 navios romperam por completo.



Fratura frágil e testes de impacto

Introdução

- O que é fragilidade ?
- Como avaliar ?
- Como quantificar ?
- O que é fratura frágil ?

Impacto: É o ensaio mais empregado para o estudo de fratura nos metais.

Normas técnicas: ABNT NBR 6157
ASTM E 23 e A 370

Três fatores contribuem para um fratura frágil:

1. Estado triaxial de tensões
2. Baixa temperatura
3. Velocidade de deformação elevada (taxa de carregamento rápida)

Ensaio de impacto

Permite determinar a energia absorvida (em Joule) pelo corpo de provas, o que é um indicativo de sua tenacidade.

Corpos de provas

Charpy

Quadrado de 10 x 10 x 55 mm

Tipos de entalhe:

- A: em forma de “V” (mais comum)
- B: em forma de fechadura (“buraco da chave”)
- C: em forma de “U” invertido

Ensaio: bi-apoiado

Izod

Quadrado de 10 x 10 x 70 mm

Entalhe: tipo A

Ensaio: engastado

Mais usado na Inglaterra

Ensaio de impacto

Equipamento

Pêndulo Charpy

Princípio: Energia absorvida pelo corpo de provas = $\Delta H \times$ peso do pêndulo.

- escala graduada na própria máquina
- energia por unidade de área
- maior valor de energia absorvida \Rightarrow maior tenacidade (ou menor fragilidade).

É um ensaio comparativo: não dá indicação segura do comportamento de peças reais.

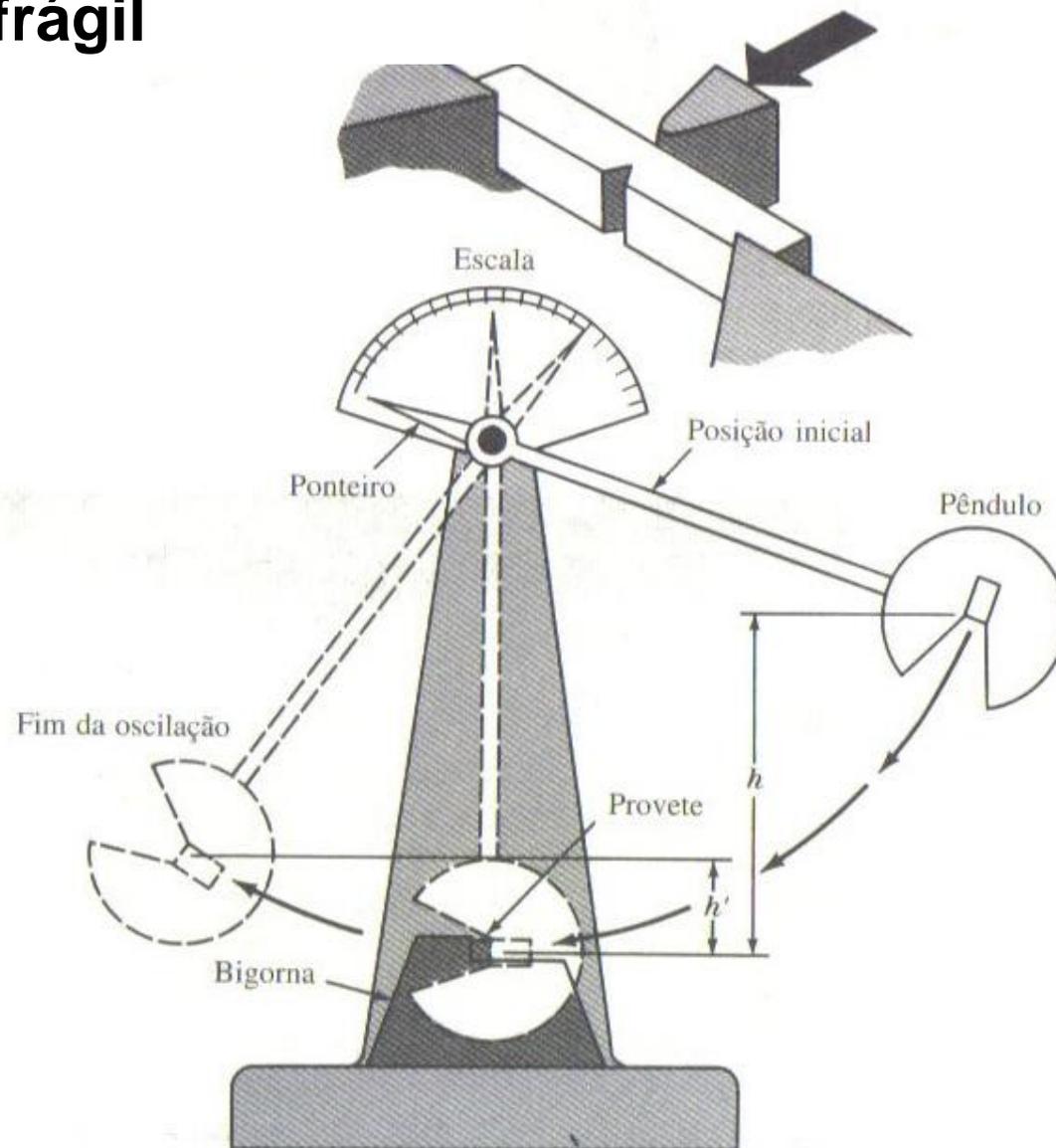
Ensaio com peça real

Roda de automóvel fundida com liga de alumínio: queda de um peso sobre a mesma.

Amortecedor

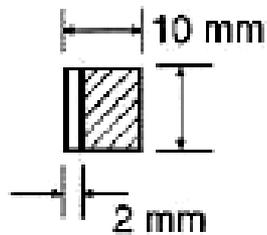
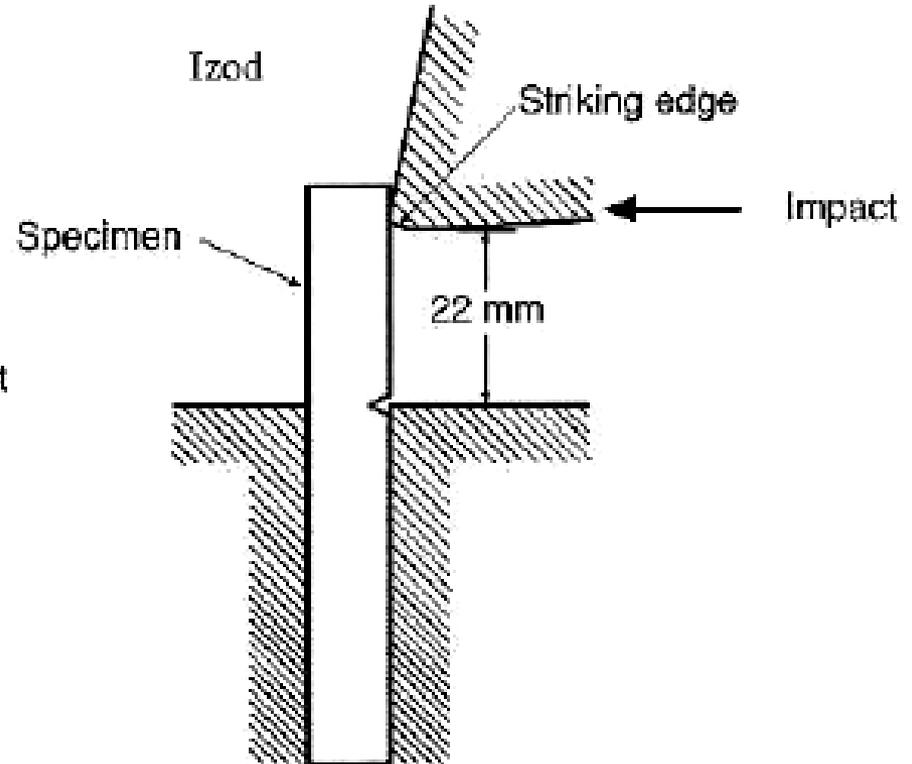
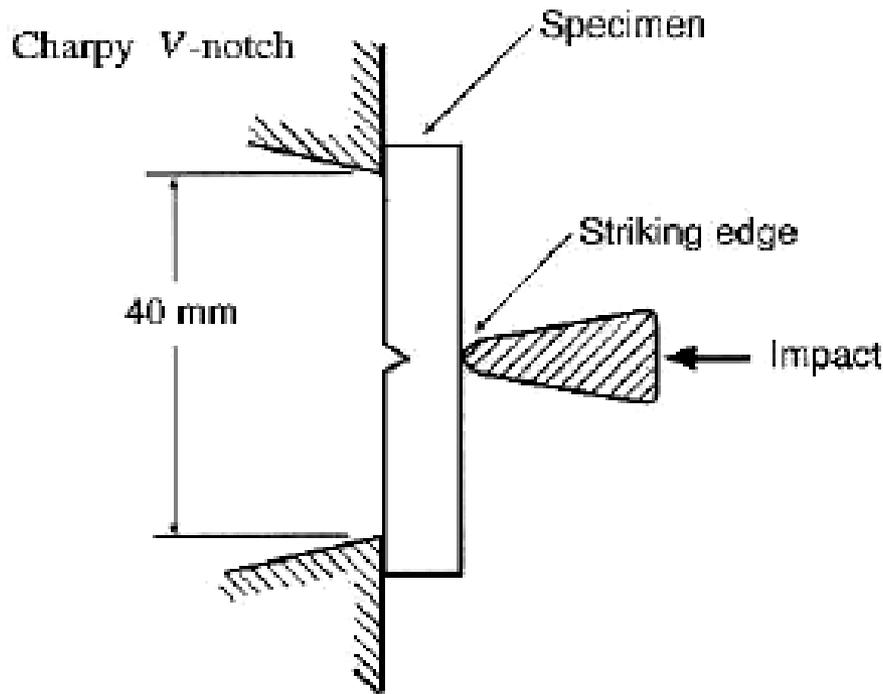
Cinto de segurança

Tenacidade e fratura frágil

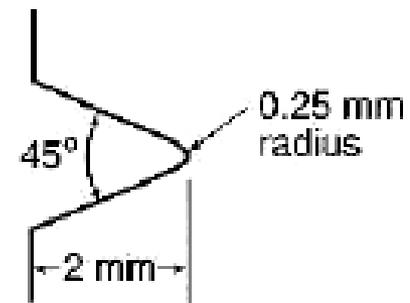




Tenacidade e fratura frágil

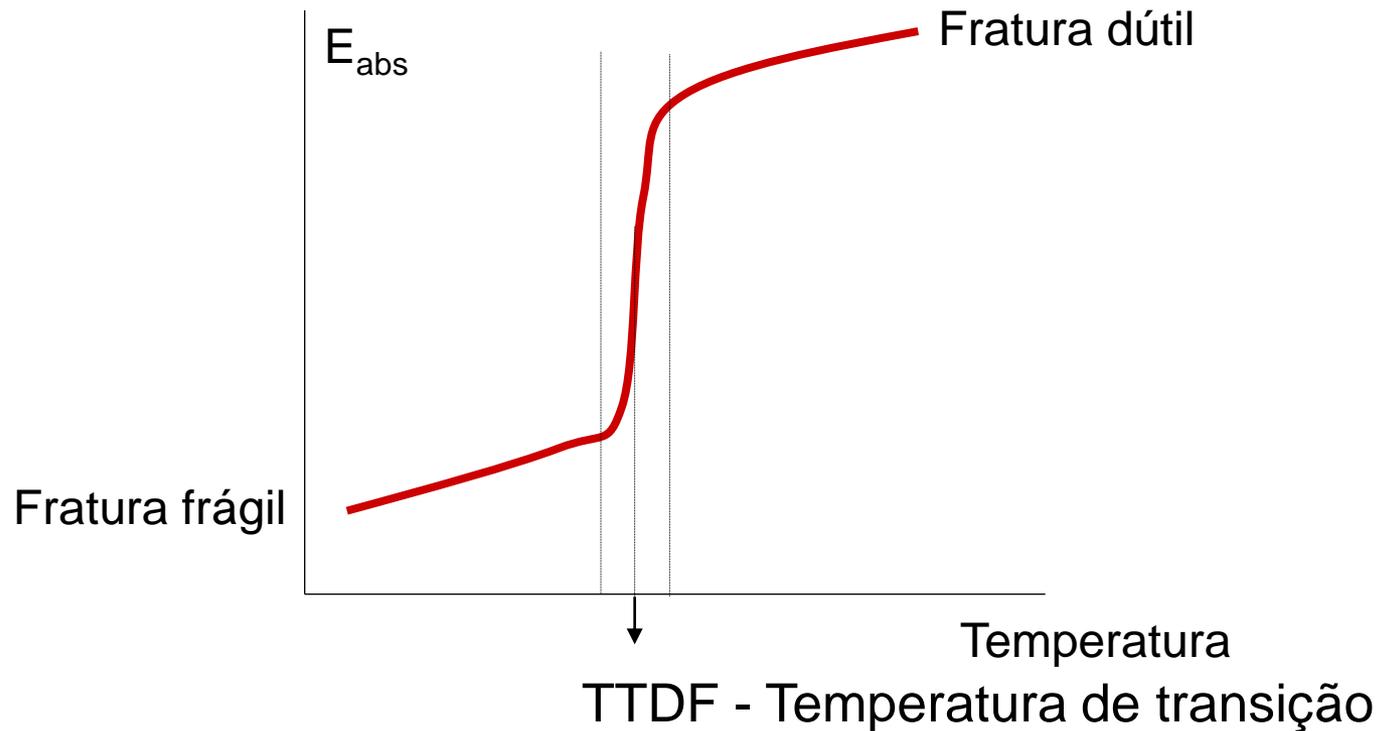


Cross section at notch (both types)



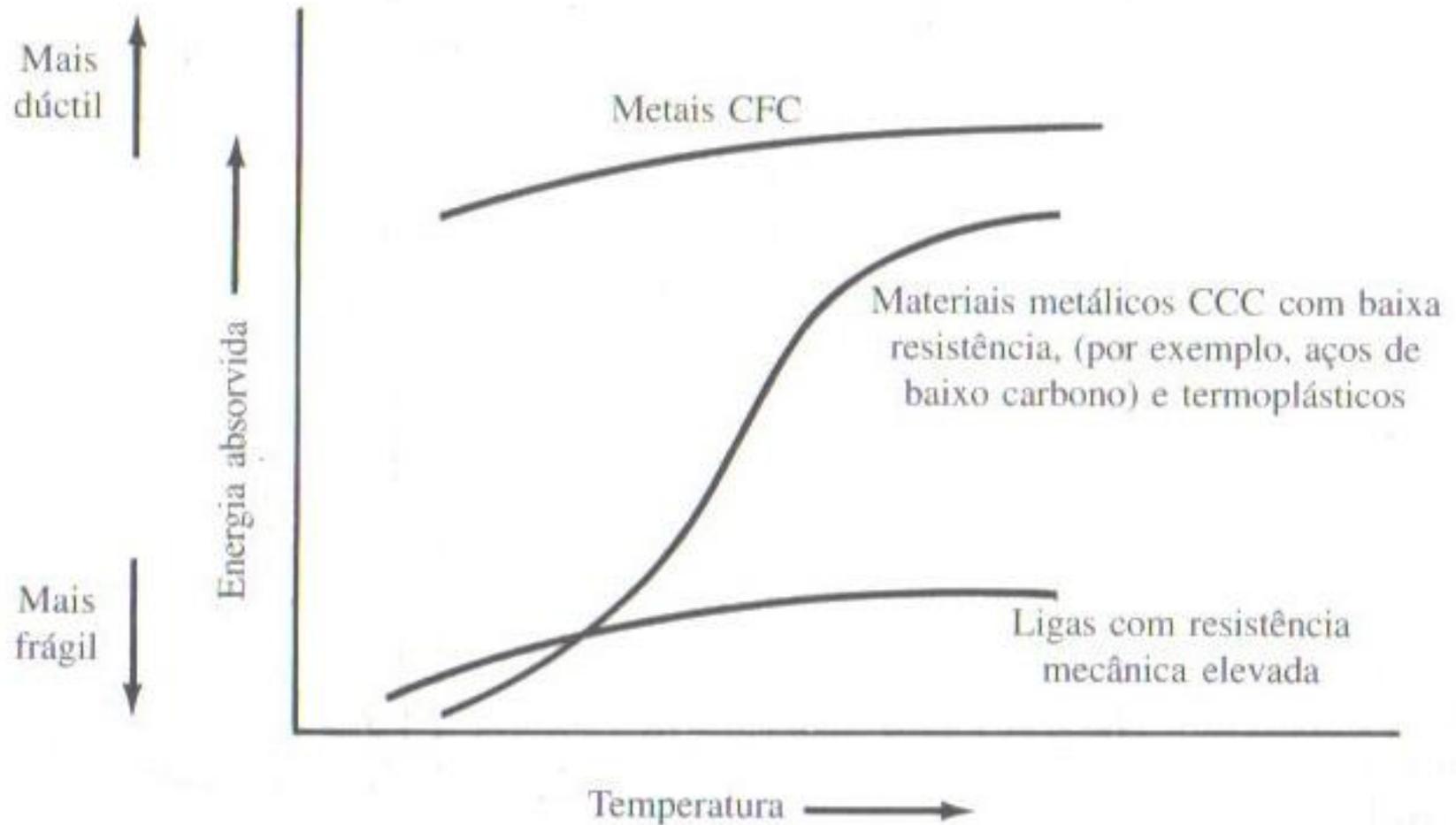
Notch detail (both types)

Temperatura de Transição Dútil - Frágil



Quanto mais baixa a temperatura de transição, menor é o risco de fratura frágil do componente em uso.

Quanto mais baixa a temperatura de transição, maior é a energia absorvida no ensaio de impacto numa determinada temperatura.



Fadiga

Falha que ocorre em peças e estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas .

As falhas podem ocorrer em um nível de tensão bem abaixo do limite de resistência de um material sob tensão estática.

Fadiga

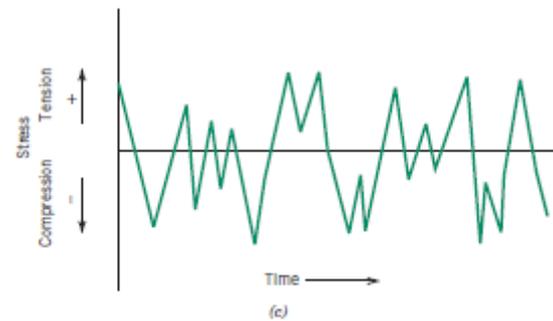
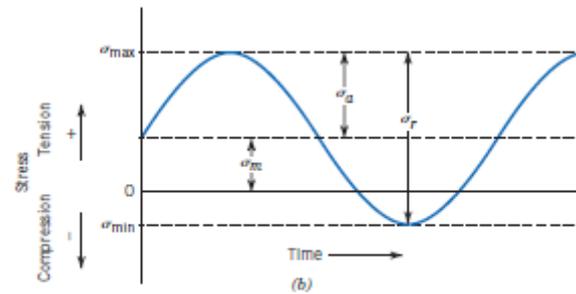
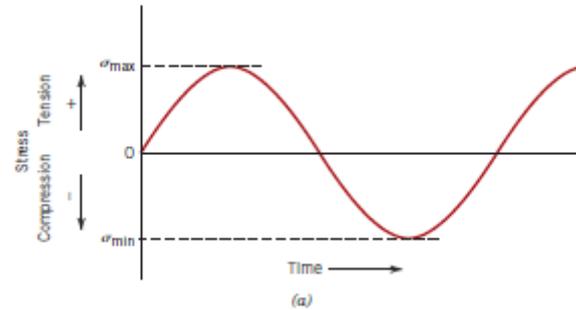
Maior causa de falha em metais.

(estima-se que 90 % das falhas em metais ocorram por fadiga – ref. Callister)

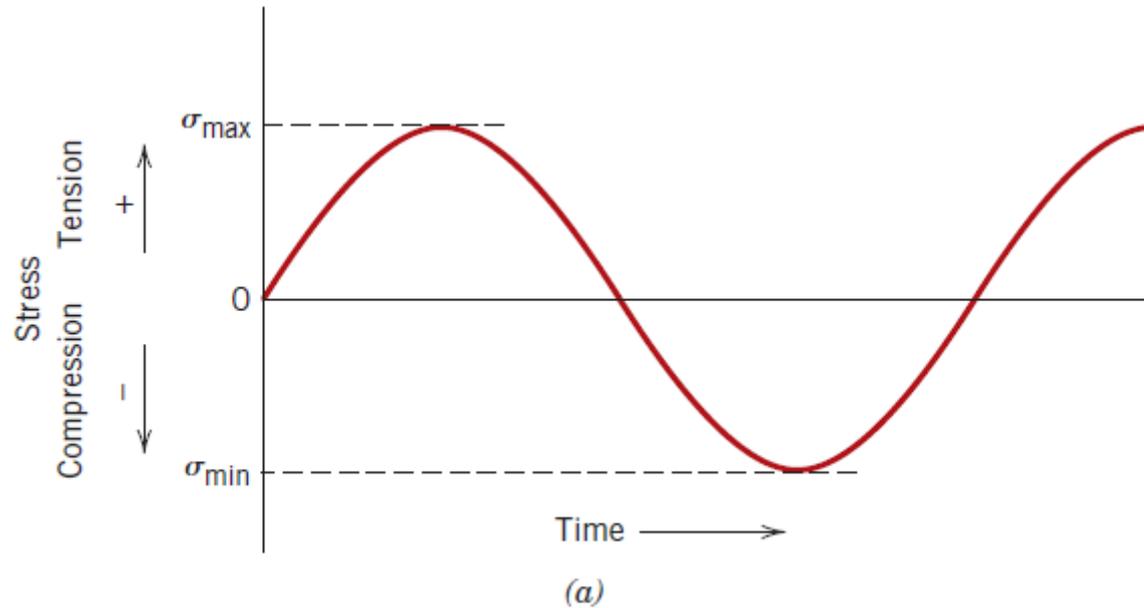
Fratura associada a pouca ou nenhuma deformação plástica, com a superfície de fratura normalmente perpendicular direção de tensão de tração aplicada.

Axial (tração / compressão), flexão ou dobramento.

Tensões cíclicas

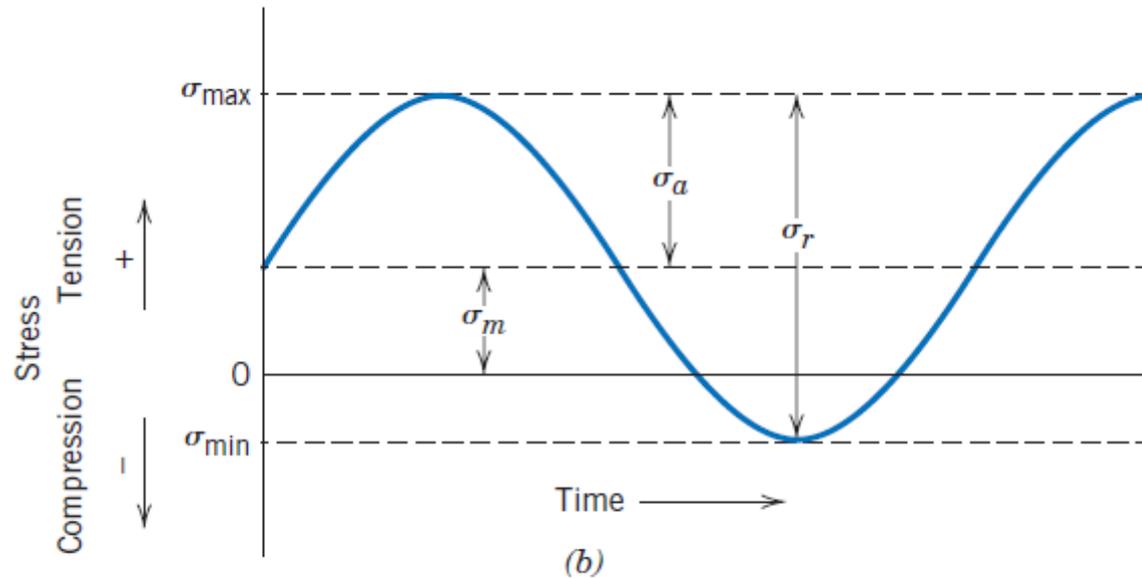


Tensões cíclicas



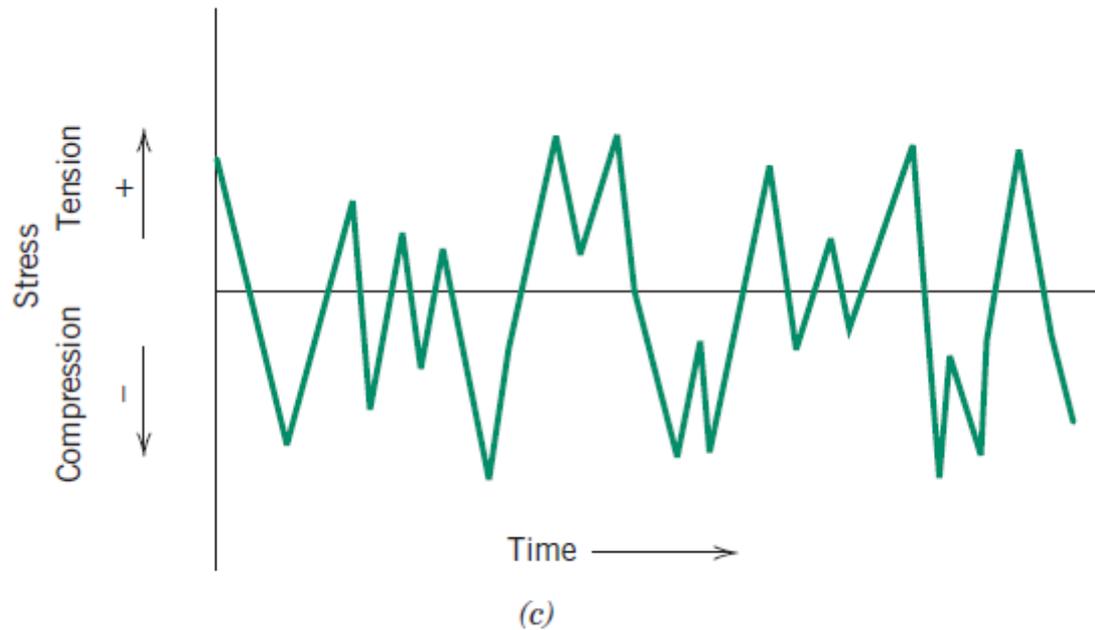
ciclo de tensões alternadas

Tensões cíclicas



ciclo de tensões repetidas

Tensões cíclicas



ciclo de tensões aleatórias

Tensões cíclicas

tensão média :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

intervalo de tensões :

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

amplitude da tensão :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

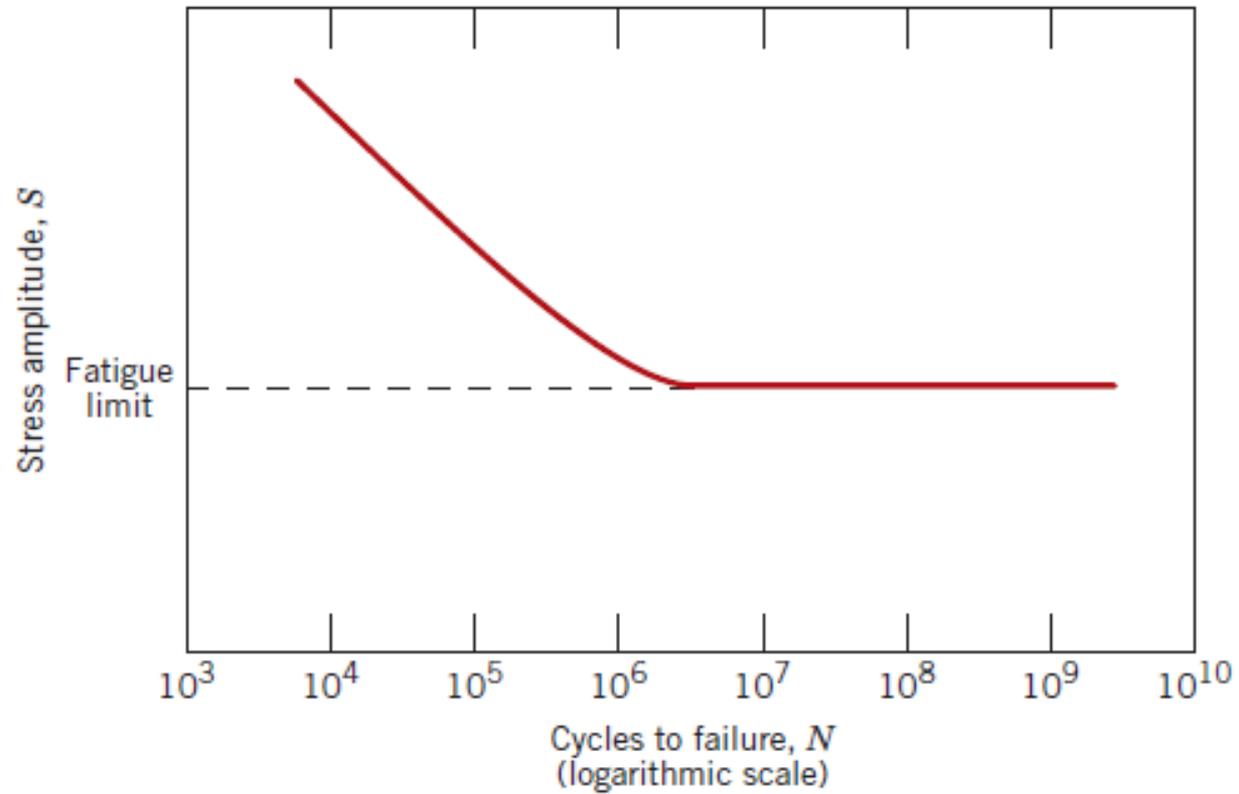
razão de tensões :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Teste de fadiga

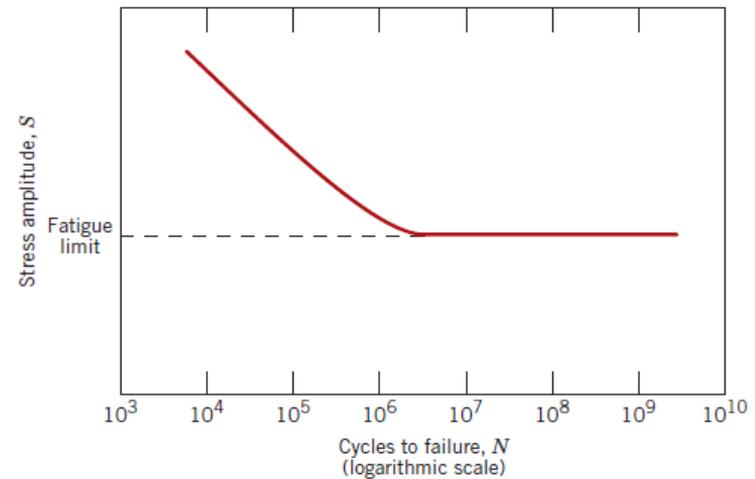


Curva $\sigma \times N$

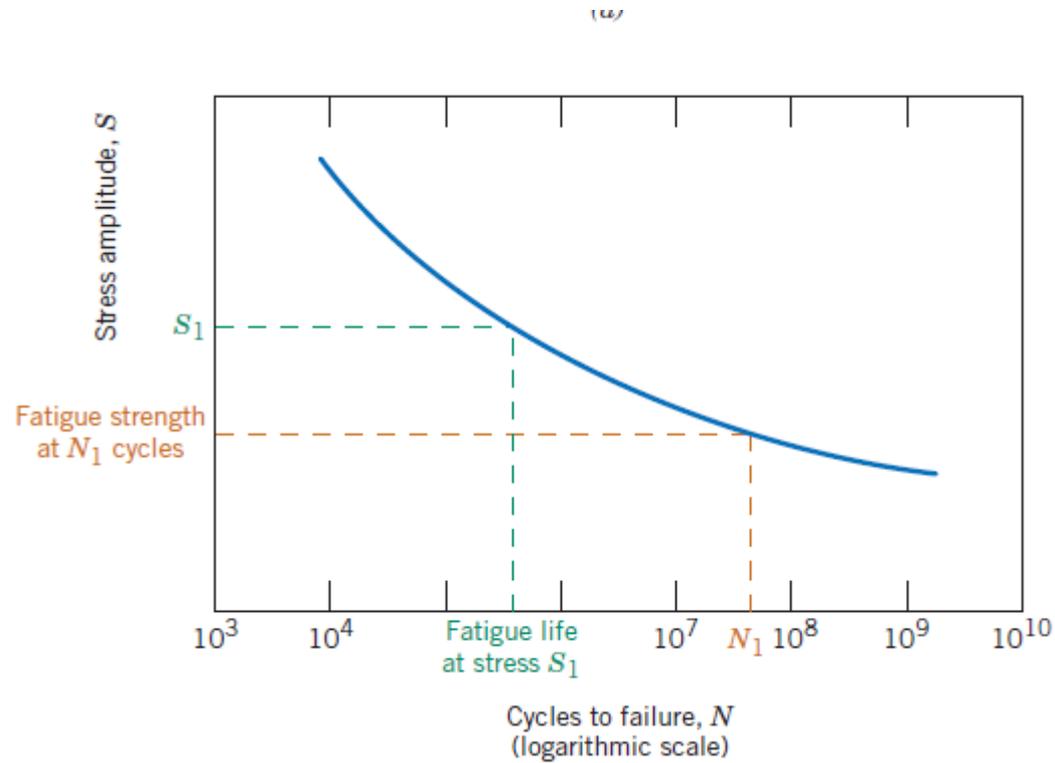


Curva $\sigma \times N$

Limite de resistência à fadiga: ocorre para ligas ferrosas e ligas de titânio



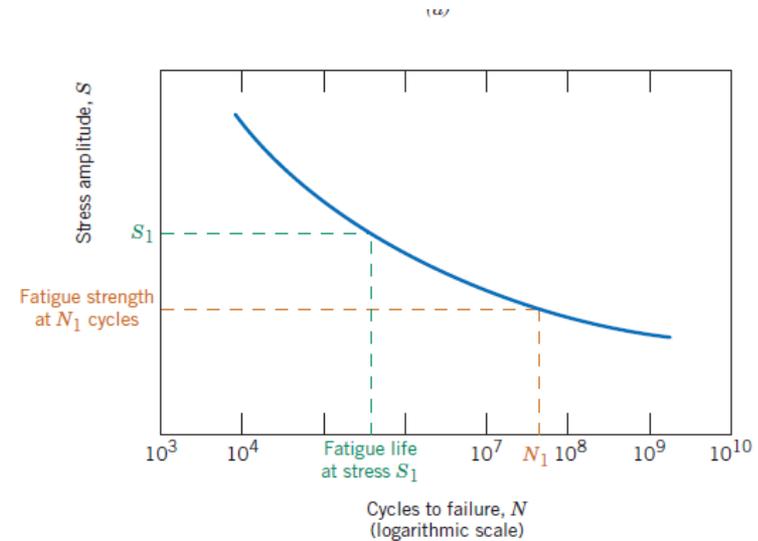
Curva $\sigma \times N$



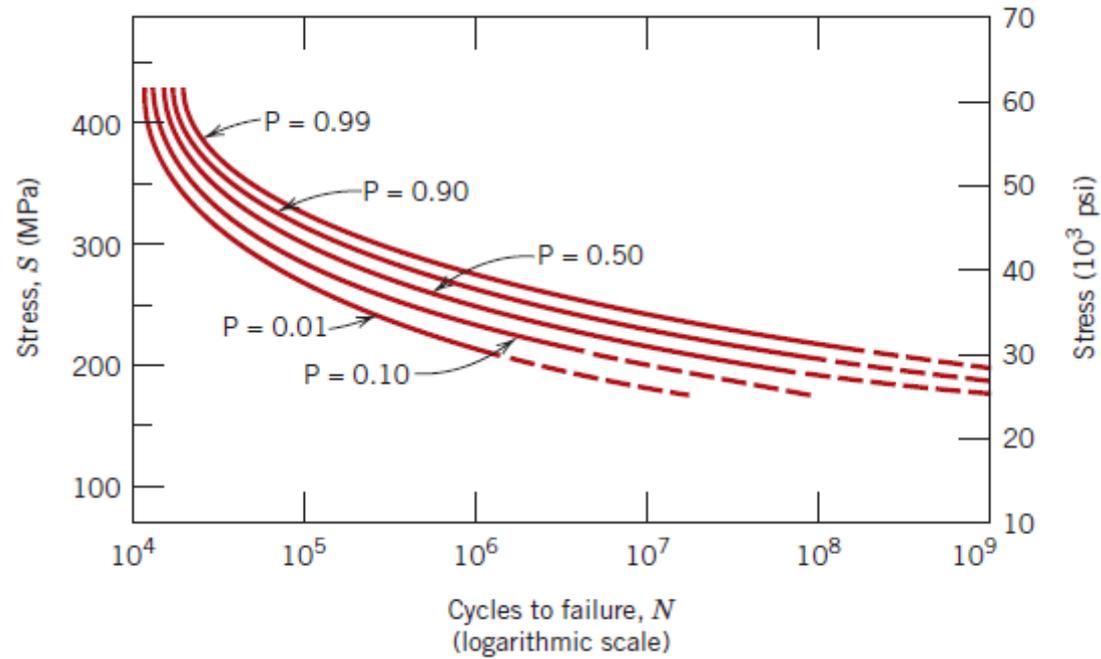
Curva $\sigma \times N$

ligas não ferrosas, como alumínio, cobre, magnésio não apresentam limite de resistência à fadiga.

Resistência à fadiga: nível de tensão no qual irá ocorrer falha após dado número de ciclos



Curva $\sigma \times N$



Fadiga

