

Materiais para a Indústria Química

LOM3022

Prof. Carlos A.R.P. Baptista

APRESENTAÇÃO DO PROFESSOR

- Engenheiro Civil (UFSCar, 1987)
- Mestre em Engenharia Mecânica (Unesp/FEG, 1993)
- Doutor em Engenharia de Materiais (Faenquil, 2000)
- Livre-Docente em Resistência dos Materiais (Unesp/FEG, 2009)

Atuação Docente: - 27 anos como professor-pesquisador.

- Área de atuação: Fadiga e Mecânica da Fratura

- Orientações/supervisões concluídas:

IC = 19; TCC = 7; Mestrado = 14; Doutorado = 4; Pós-Doutorado = 2

Contato: Prof. Dr. Carlos A. R. P. Baptista
Departamento de Engenharia de Materiais
email: carlos.baptista@usp.br
Fone: 3159.9914 (sala) ou 3159.9928 (Lab.)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

SUMÁRIO

1. Materiais e suas Propriedades

- Classificação dos Materiais
- Materiais para Equipamentos de Processo
- Características e Propriedades dos Materiais
- Propriedades Mecânicas e sua Determinação
- Tipos de Falha e Seleção de Materiais
- Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

2. Aços e Ferros Fundidos

- Definição e Importância
- Processos Siderúrgicos
- Processos de Fabricação
- Classificação das Ligas Ferrosas
- Tratamentos Térmicos e Termoquímicos

3. Metais Não Ferrosos

- Ligas de Alumínio
- Ligas de Titânio
- Cobre e Ligas
- Níquel e Ligas

4. Materiais Não Metálicos

- Cerâmicos
- Poliméricos
- Compósitos

5. Corrosão e seu Controle

- Generalidades sobre Corrosão
- Fatores que Influenciam e Meios de Controle
- Corrosão sob Tensão
- Revestimentos Anticorrosivos

6. Análise e Prevenção de Falhas

- Procedimentos para uma Análise de Falha
- Modos de Fratura
- Critérios de Falha
- Critério de Projeto para Vasos de Pressão
- Ensaio Não-Destrutivo



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Bibliografia

1. P.C.S. Telles. Materiais para Equipamentos de Processo. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 6ª ed. 2003.
2. A. Remy, M. Gay, R. Gonthier. Materiais. São Paulo: Hemus Editora, 2002.
3. K.G. Budinski, M.K. Budinski. Engineering Materials: Properties and Selection. Upper Saddle River: Pearson, 8th ed., 2005.
4. N.E. Dowling, S.L. Kampe, M.V. Kral. Mechanical Behavior of Materials. Hoboken, Pearson Education, 5th ed., 2018.
5. J.M. Freire. Materiais de Construção Mecânica. Rio de Janeiro: LTC, 1993.
6. M. Ferrante. Seleção de Materiais. São Carlos: Editora da UFSCar, 1996.
7. H.K.D.H. Bhadeshia, Sir R. Honeycombe. Steels: Microstructure and Properties. Oxford: Butterworth-Heinemann, 3rd ed., 2006.
8. L.P. Nunes. Materiais: Aplicações de Engenharia, Seleção e Integridade. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.



Avaliação

Método:

Duas provas

Critério:

Serão aplicadas duas avaliações (P1 e P2) que comporão a nota final (NF).
A nota final será calculada através da expressão: $NF = (P1 + P2) / 2$

Datas Previstas:

P1 – 30/04

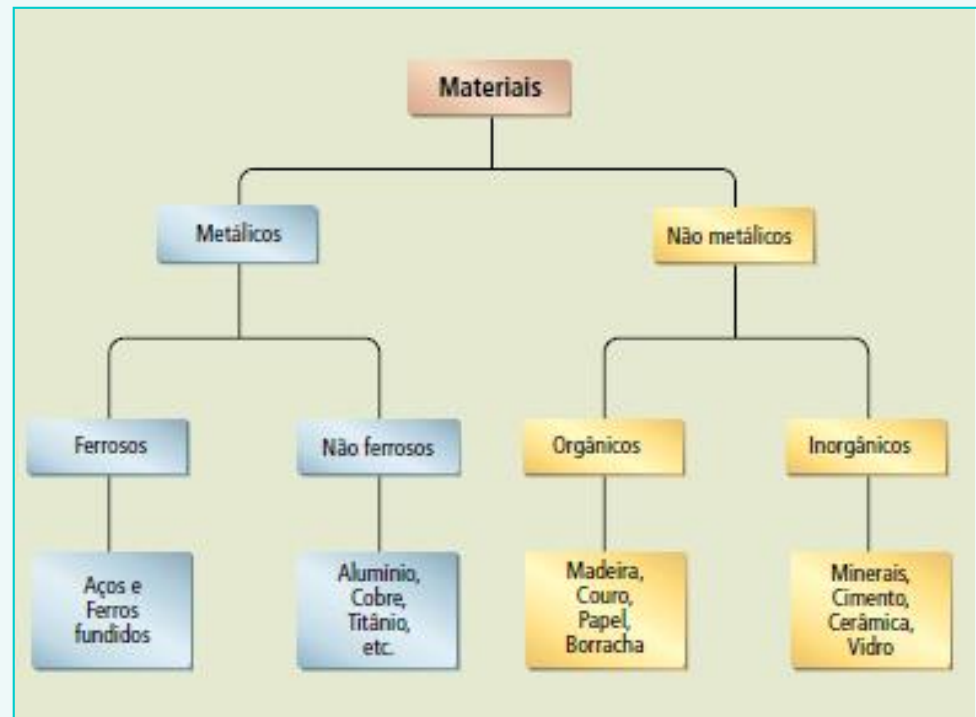
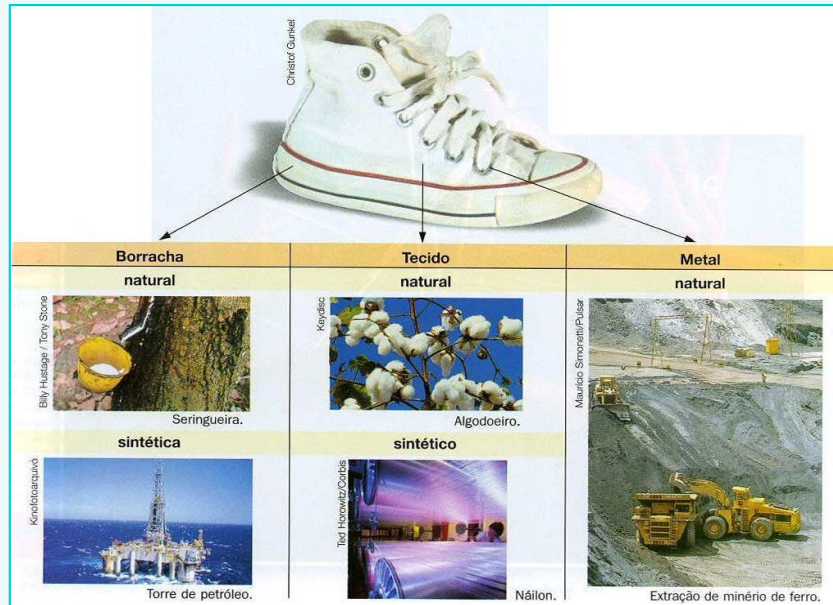
P2 – 18/06

Obs.: Proibido fazer prova em turma diferente da que está matriculado.

1. Materiais e suas Propriedades



Classificação dos Materiais

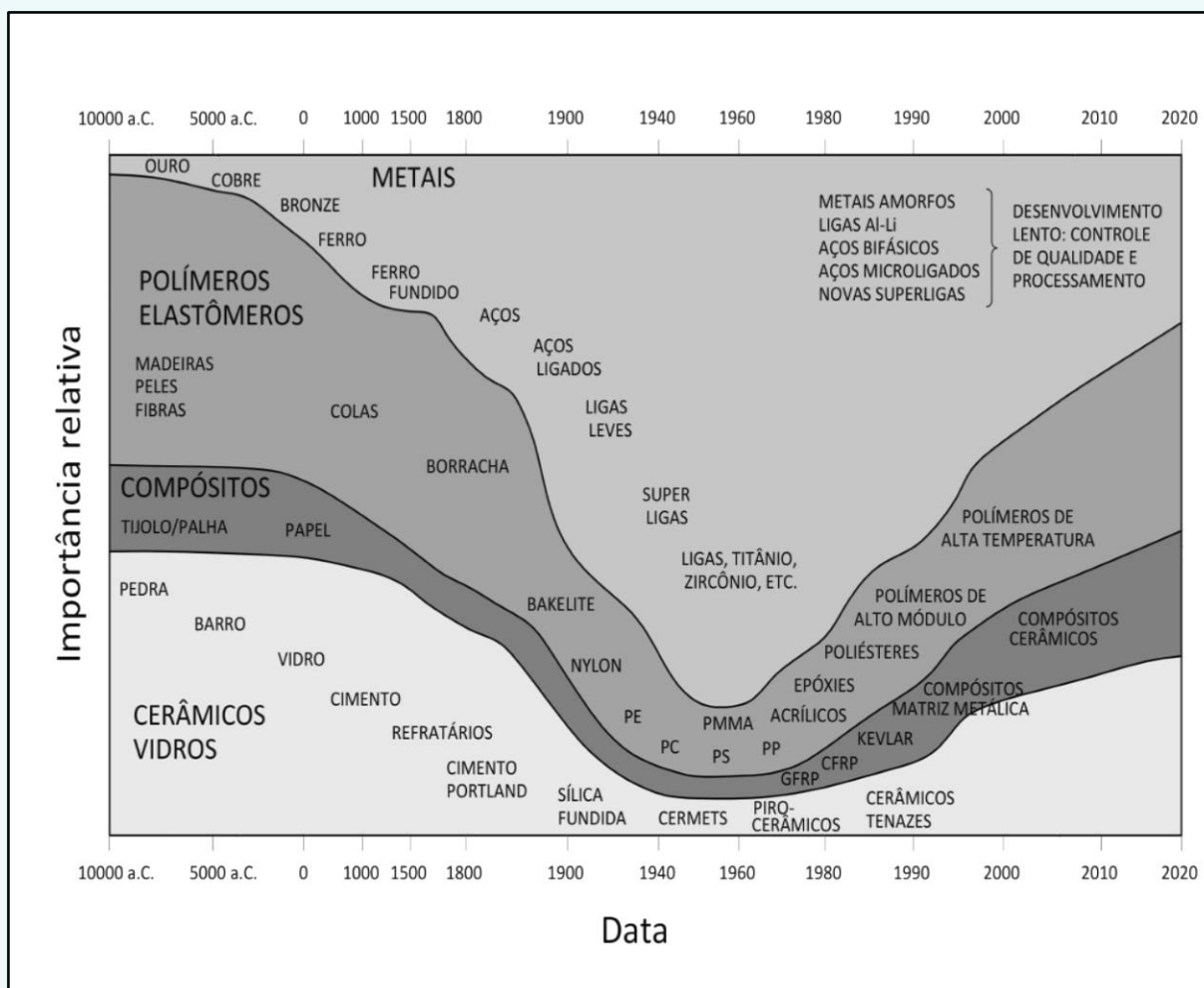


Grupos de Materiais:

	Bonding	Microstructure	Advantages	Disadvantages
METALS and ALLOYS	metallic	crystal grains	• strong, stiff • ductile • conductive	• fracture • fatigue
POLYMERS	covalent and secondary	chain molecules	• low cost • light weight • resist corrosion	• low strength • low stiffness • creep
CERAMICS and GLASSES	ionic-covalent	crystal grains amorphous	• strong, stiff, hard • resist temperature • resist corrosion	• brittleness
COMPOSITES	various	matrix and fiber, etc.	• strong, stiff • lightweight	• high cost • delamination



Evolução da Importância Relativa dos Materiais



Materiais para Equipamentos de Processo

Indústrias de Processo

- Definição: “Indústrias nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas ou químicas, ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio e distribuição de fluídos”. Exemplos: refinarias de petróleo, indústrias químicas, alimentares, farmacêuticas, a parte térmica das centrais termoelétricas, terminais de armazenagem e distribuição de derivados de petróleo.

- Nas indústrias de processo existem muitas vezes condições de grande risco, devido ao manuseio de fluídos inflamáveis, tóxicos, explosivos ou em elevadas pressões ou temperaturas, condições nas quais uma pequena falha ou vazamento pode resultar em um acidente grave.

Equipamentos de Processo

- Caldeiraria: vasos de pressão, tanques, torres, gasômetros, caldeiras, trocadores de calor, resfriadores etc.

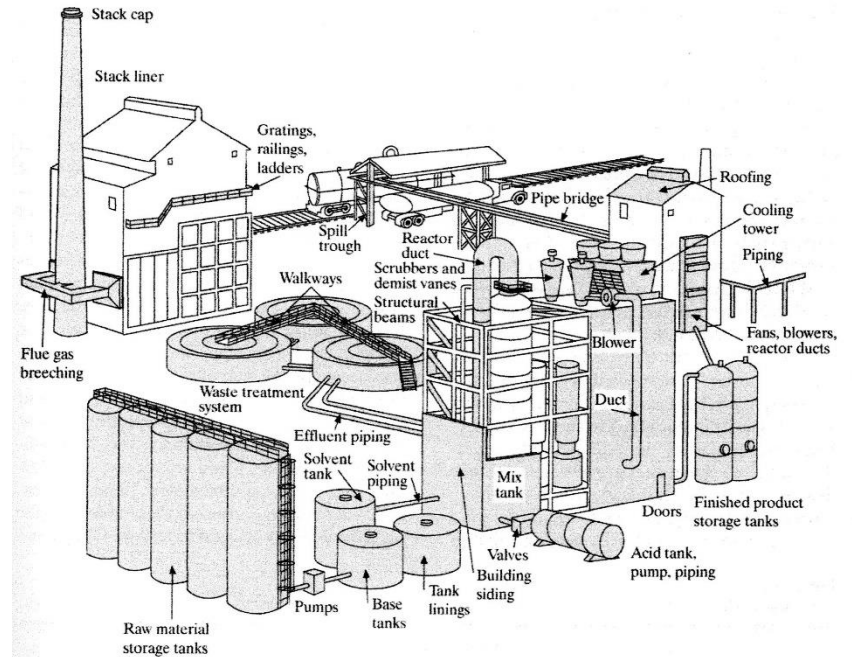
- Máquinas: bombas, compressores, sopradores, ejetores, centrifugadores e outras máquinas para movimentar fluidos.

- Tubulações: são os elementos de interligação entre equipamentos. Tubulações de processo, de transporte, drenagem etc.



Materiais para Equipamentos de Processo

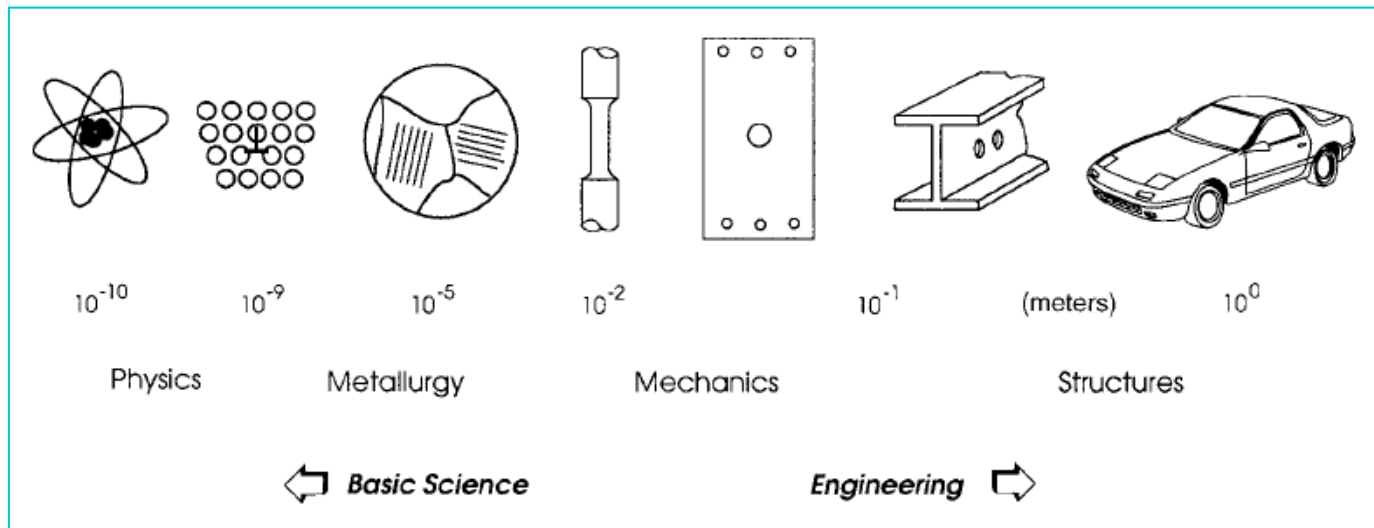
3. Materiais para tanque de armazenamento e outros reservatórios sem pressão*	Metais ferrosos	- Aços-carbono - Aços-liga - Aços-inoxidáveis	1. Materiais para vasos de pressão e para trocadores de calor (inclusive feixe tubular)*	Metais ferrosos	- Aços-carbono - Aços-liga - Aços inoxidáveis
	Metais não-ferrosos	- Cobre e ligas - Alumínios e ligas - Níquel e ligas		Metais não-ferrosos	- Alumínio e ligas - Cobre e ligas - Níquel e ligas - Titânio, zircônio e ligas
	Materiais não-metálicos	- Concreto armado - Materiais plásticos			
4. Materiais para tubulações (tubos, válvulas, conexões e acessórios de tubulação)	Metais ferrosos	- Aços-carbono - Aços-liga - Aços inoxidáveis - Ferros fundidos - Ferro maleável - Ferro forjado - Ferros-ligados	2. Materiais para caldeiras e fornos (inclusive tubos)	- Aços-carbono - Aços-liga - Aços inoxidáveis	
	Metais não-ferrosos	- Cobre e ligas - Alumínio e ligas - Chumbo e ligas - Níquel e ligas - Titânio, zircônio e ligas			
	Materiais não-metálicos	- Materiais plásticos - Concreto armado - Cimento-amianto - Barro vidrado - Vidro, cerâmica - Borrachas			
	Metálicos	- Aços inoxidáveis - Zinco - Níquel e ligas - Chumbo e ligas - Titânio, zircônio e ligas			
5. Materiais para revestimentos internos de vasos, tanques, trocadores de calor e tubulações	Não-metálicos	- Materiais plásticos - Concreto - Vidro, cerâmica - Borrachas - Grafita - Asfalto			



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Características e Propriedades dos Materiais

Escalas de tamanho e disciplinas envolvidas no estudo e utilização dos materiais de engenharia:



Características e Propriedades dos Materiais

TIPO			IMPORTÂNCIA/APLICAÇÃO
CARACTERÍSTICAS	Massa específica		Importante em equipamentos de transporte, principalmente na aeronáutica e em veículos automotores
	Estado físico e temperatura de fusão		Importante na seleção de materiais para altas temperaturas, inclusive para materiais refratários e isolantes térmicos
	Valência e eletronegatividade		Importante na formação de compostos em cerâmicos e intermetálicos
	Peso molecular		Importante nos materiais poliméricos. As propriedades estão diretamente relacionadas com o peso molecular
	Permeabilidade		Está intimamente relacionada com a existência de estrutura cristalina
PROPRIEDADES	Propriedades Mecânicas	Resistência mecânica	São importantes nos projetos mecânicos de vasos, tanques, dutos, permutadores de calor, tubulações, estruturas, equipamentos de transporte dentre outros
		Ductilidade	
		Resiliência	
		Tenacidade	A resistência à flexão é importante em materiais muito duros e frágeis e ainda na utilização de materiais plásticos
		Dureza	
		Resistência à flexão	
	Propriedades elétricas		São importantes nos projetos elétricos
	Propriedades térmicas		São importantes nos projetos de transmissão de calor
	Resistência à corrosão		É importante nos projetos de equipamentos e instalações em meios agressivos
	Resistência à fadiga		É importante nos projetos de equipamentos sujeitos a esforços cíclicos
	Resistência à fluência		É importante nos projetos de equipamentos que trabalham à alta temperatura, tais como fornos, caldeiras, turbinas, etc.



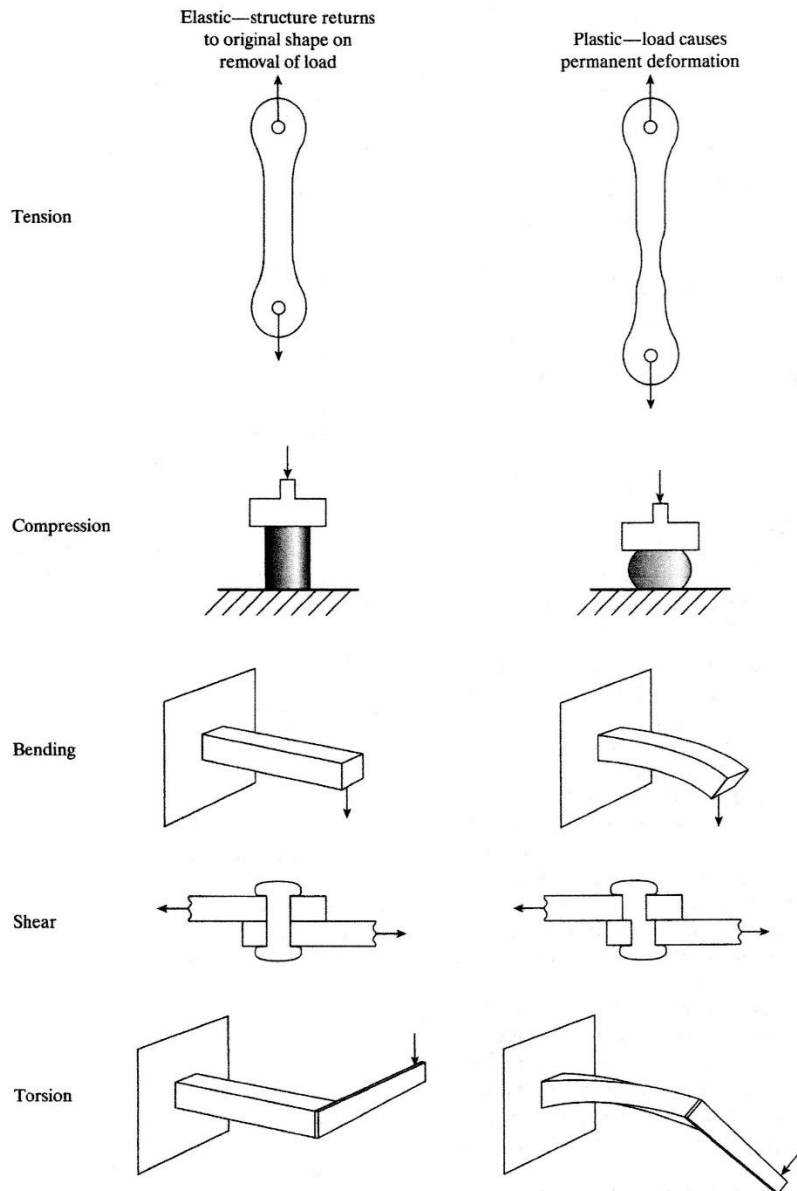
Características e Propriedades dos Materiais

TIPO		IMPORTÂNCIA/APLICAÇÃO
CARACTERÍSTICAS	Opacidade e cor	Característica importante nos metais nobres, nos materiais poliméricos, nos vidros e cerâmicas decorativas Nos materiais poliméricos é importante a transmitância como forma de caracterizar a cadeia polimérica
	Brilho	Trata-se de uma característica importante também nos metais nobres Os materiais poliméricos, cerâmicas e vidros podem ser foscos ou brilhantes Processos corrosivos nos metais e a ação radiação ultravioleta nos materiais poliméricos afetam a cor e o brilho

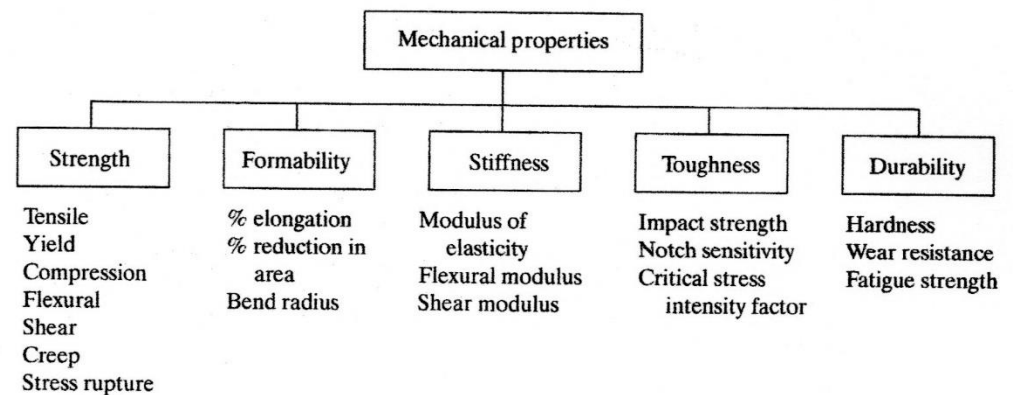
TIPO			IMPORTÂNCIA/APLICAÇÃO
PROPRIEDADES	Soldabilidade		É importante na fabricação de componentes e estruturas industriais
	Resistência à abrasão		É importante nos projetos de equipamentos e instalações em meios abrasivos, erosivos ou sujeitos a desgaste mecânico
	Resistência à fricção		É importante nos projetos onde se deseje deslizamento fácil, como, por exemplo, em mancais e rolamento ou ao contrário se deseje grande atrito como nos sistemas de frenagem
	Resistência de materiais poliméricos ao meio	Resistência à radiação ultravioleta	O material polimérico perde as propriedades mecânicas e sofre alteração de cor e de brilho
		Resistência a solventes	O material polimérico perde as propriedades mecânicas e químicas
		Resistência à água, ácidos e bases	O material polimérico perde as propriedades mecânicas e químicas



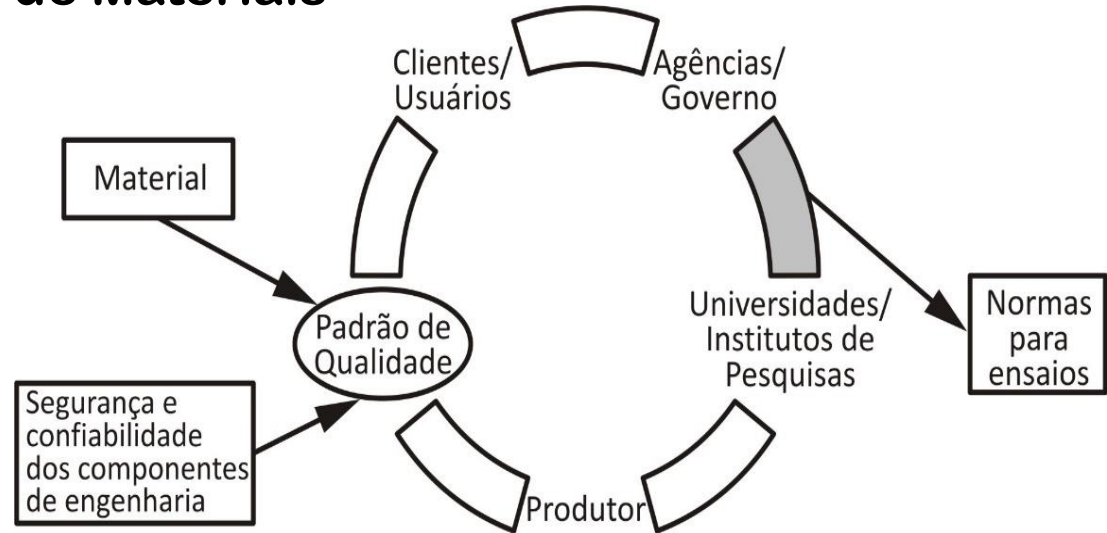
Propriedades Mecânicas e sua Determinação



- Descrevem o comportamento de um material quando submetido aos esforços mecânicos, e estão relacionadas à capacidade do material em resistir ou transmitir esses esforços sem se romper ou deformar excessivamente.



Ensaio e Especificações de Materiais



- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABENDI, Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção
- ABRACO, Associação Brasileira de Corrosão
- ISO, International Organization for Standardization
- ASTM International, American Society for Testing and Materials
- NIST, National Institute of Standards and Technology
- BSI, British Standards Institution
- DIN, Deutsche Institut für Normung e.V.
- JISC, Japanese Industrial Standards Committee
- ASME, American Society of Mechanical Engineers
- AISI, American Iron and Steel Institute
- API, American Petroleum Institute



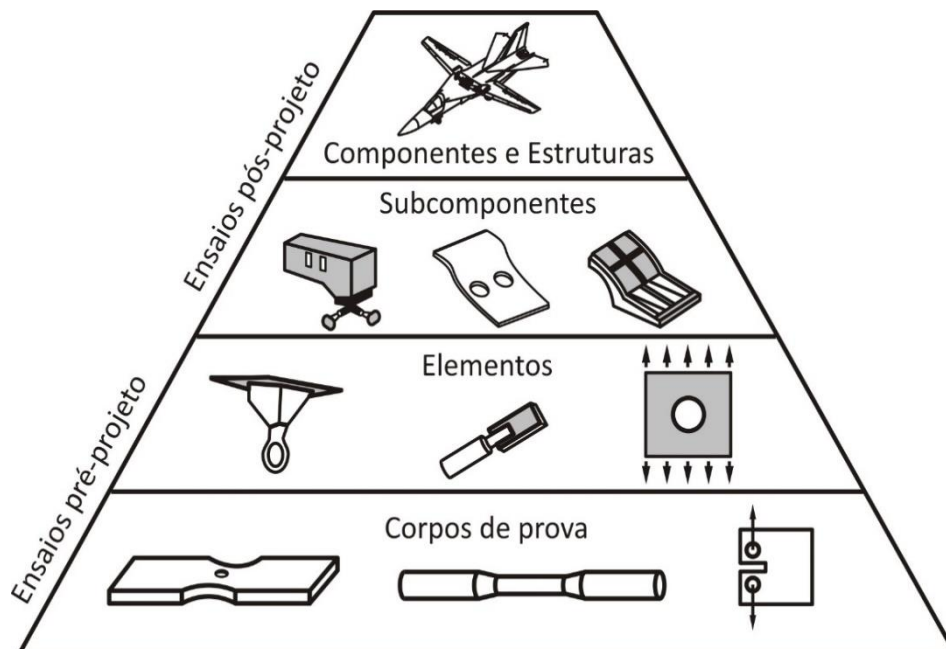
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Classificação dos Ensaios:

- Destrutivos
- Não Destrutivos (END)



Defeitos dos materiais ou produtos



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

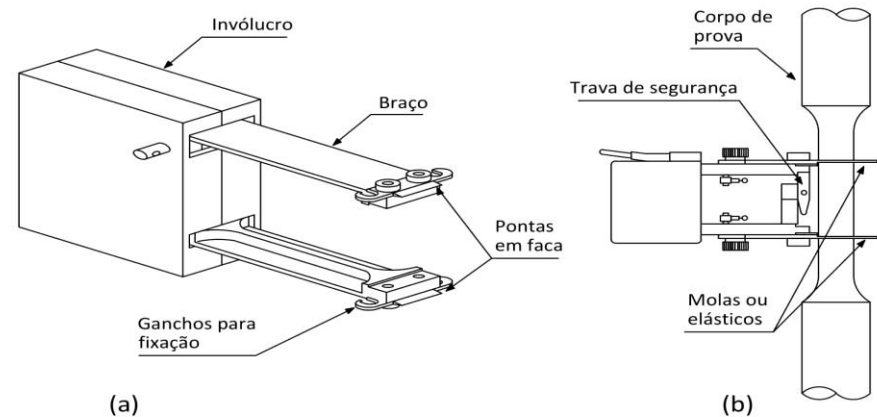
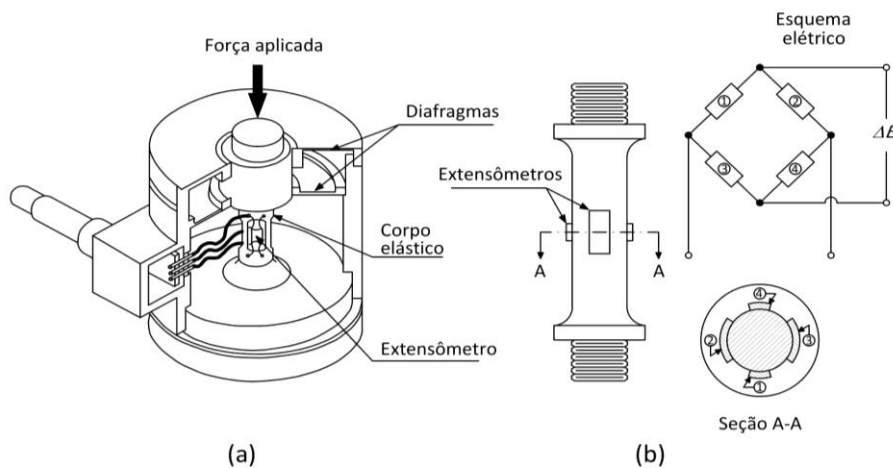
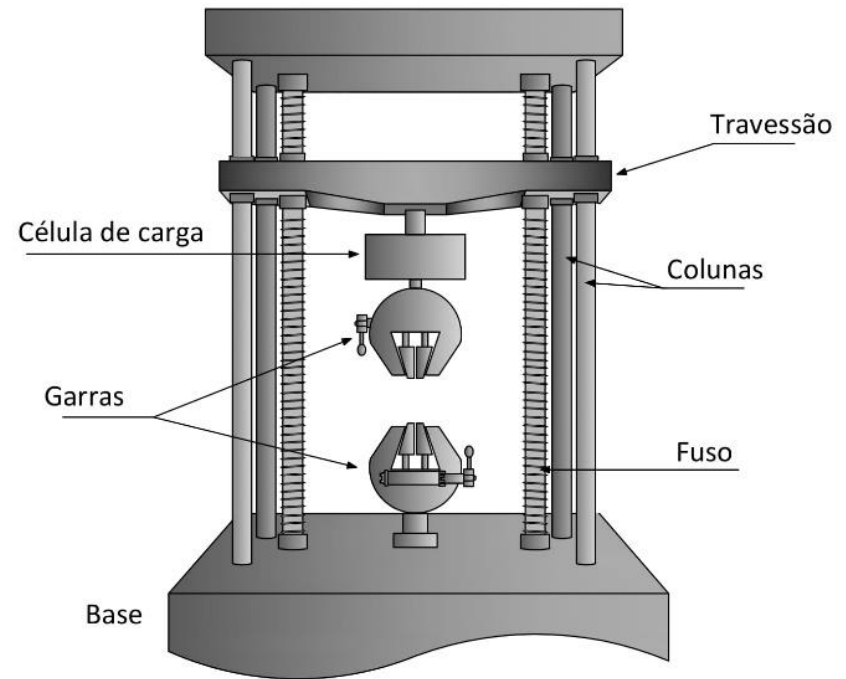
Ensaio de Tração

Avaliações de:

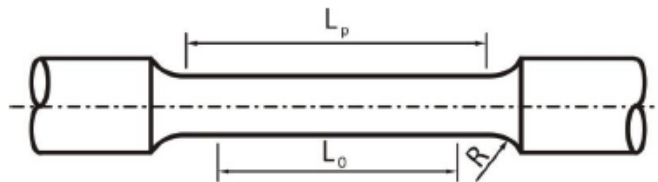
- Resistência Mecânica
- Ductilidade

Emprego do Ensaio:

- Informações para Projetos
- Seleção de Materiais
- Controle de Qualidade
- Desenvolvimento de Materiais



Ensaio de Tração

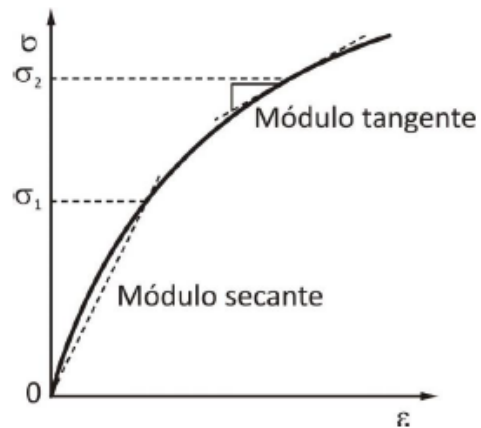
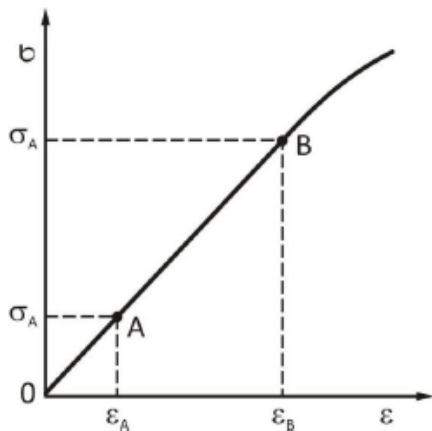


L_p - Comprimento paralelo

L_0 - Comprimento de medida inicial

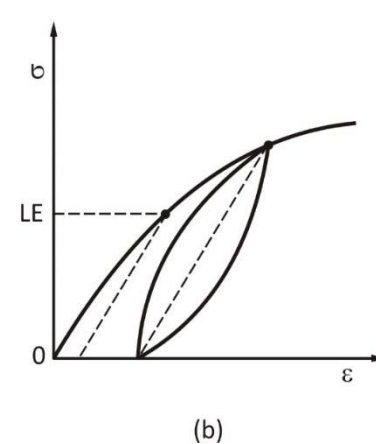
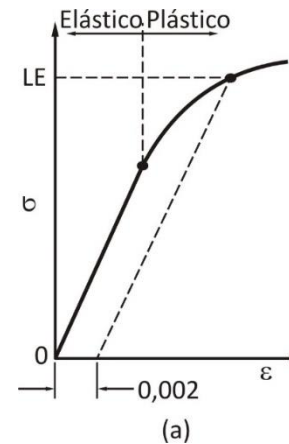
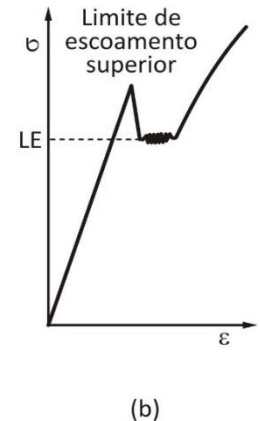
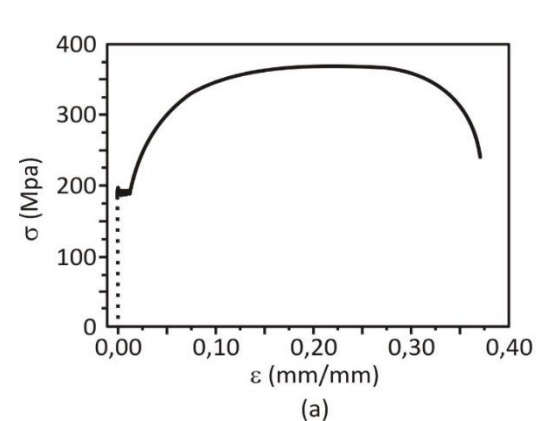
R - Raio de transição

DEFINIÇÕES: $\sigma = \frac{F}{S_0}$ $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ $\sigma = \varepsilon \cdot E$



Módulo de Young: $E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A}$

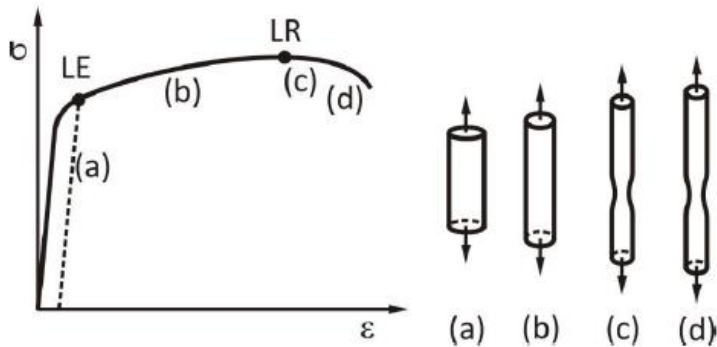
Limite de Escoamento:



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

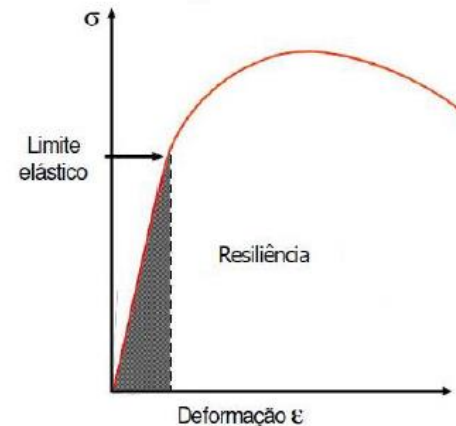
Ensaio de Tração

Resistência à tração e limite de ruptura:



(Obs.: Anexo A da norma NBR ISO 6892-1:2013 apresenta um critério para a definição da fratura do corpo de prova no caso de os dados obtidos no ensaio estarem na forma de um conjunto discreto de pontos).

Resiliência e tenacidade:



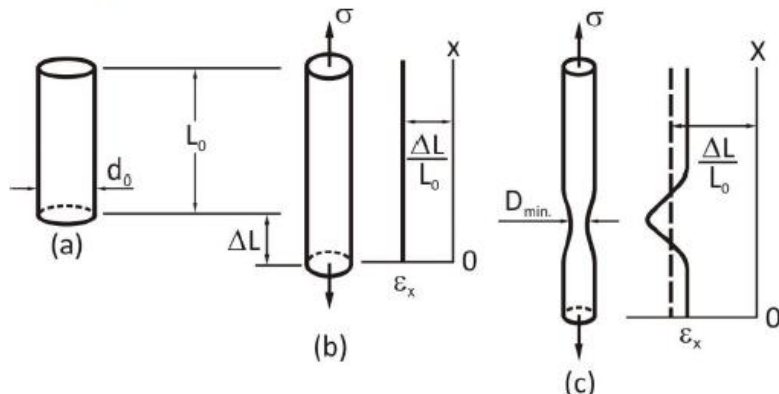
$$U_0 = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

$$U_R = \frac{LE^2}{2E}$$

$$U_T \approx \left(\frac{LE + LR}{2} \right) \epsilon_f$$

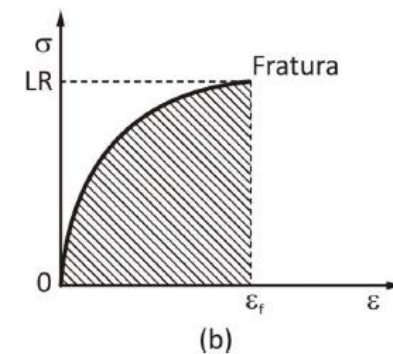
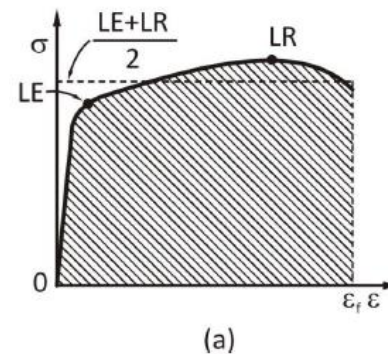
$$U_T \approx \frac{2}{3} LR \cdot \epsilon_f$$

Alongamento e redução de área:



$$A = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (k = 5,65 \text{ c.p.s proporcionais})$$

$$RS = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100$$



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Ensaio de Tração

Curva tensão-deformação verdadeira

Tensão real e deformação logarítmica:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{S} \rightarrow \tilde{\sigma} = \sigma \left(\frac{S_0}{S} \right)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \rightarrow \tilde{\varepsilon} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

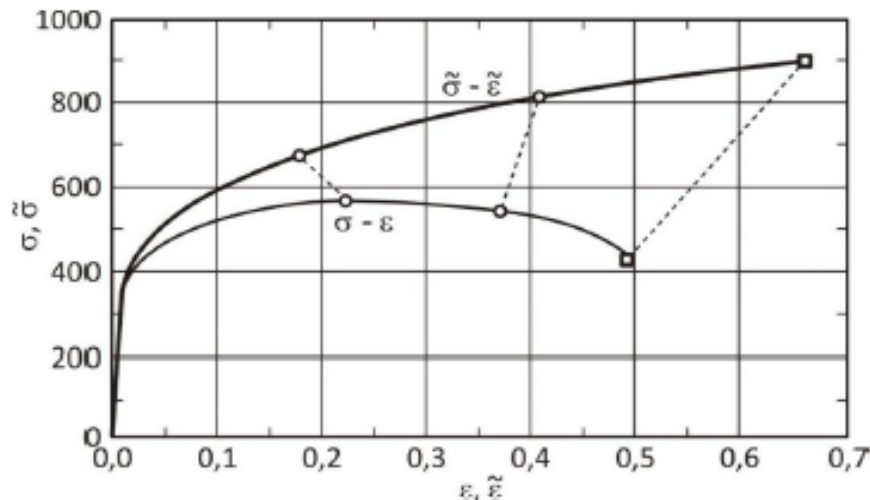
Volume constante:

$$V = S \cdot L = S_0 \cdot L_0 \rightarrow \frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} = (1 + \varepsilon)$$

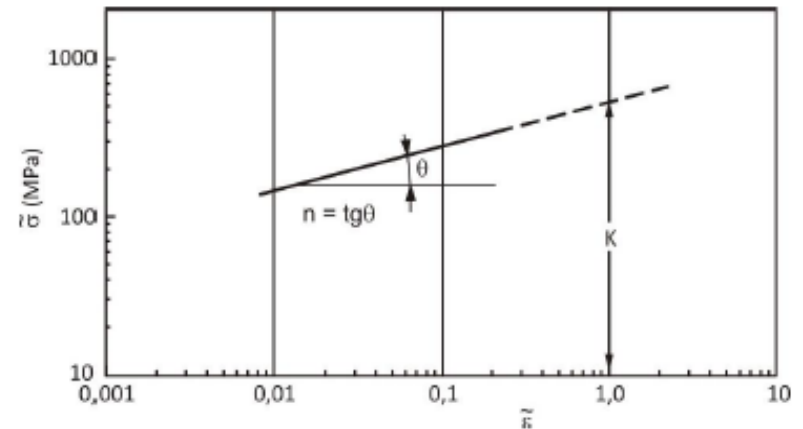
Ficamos com

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \left(\frac{S_0}{S} \right)$$



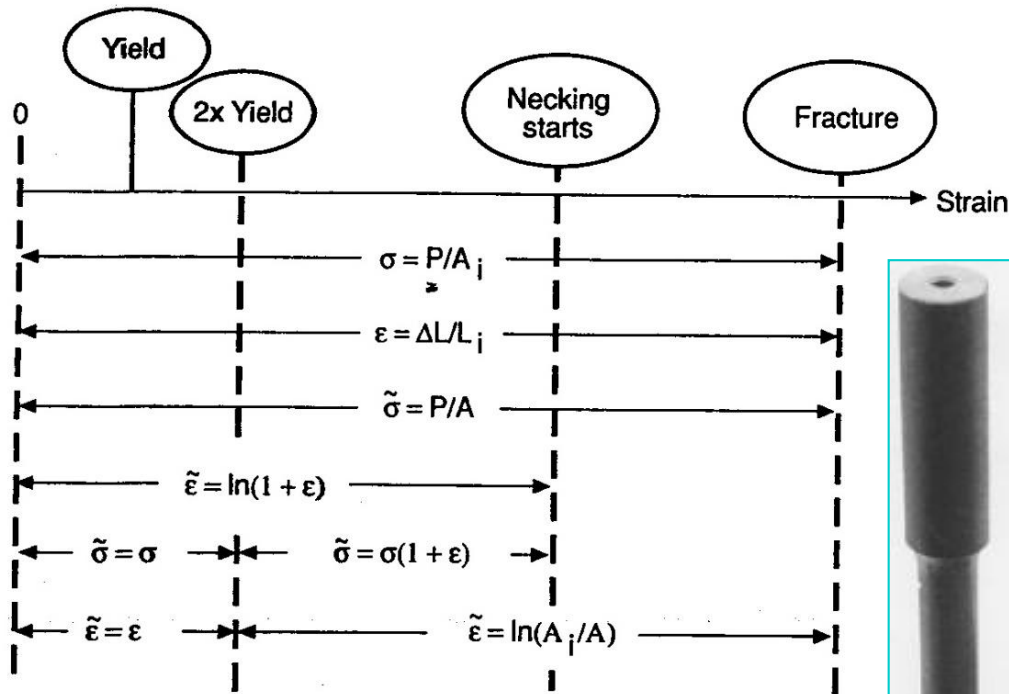
$$\tilde{\sigma} = K \tilde{\varepsilon}^n \rightarrow \log \tilde{\sigma} = \log K + n \cdot \log \tilde{\varepsilon}$$



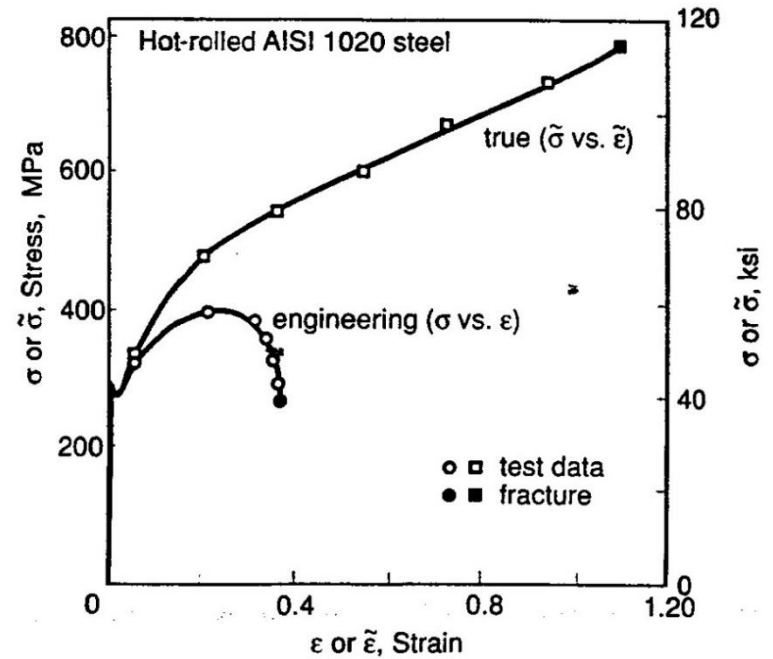
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Ensaio de Tração

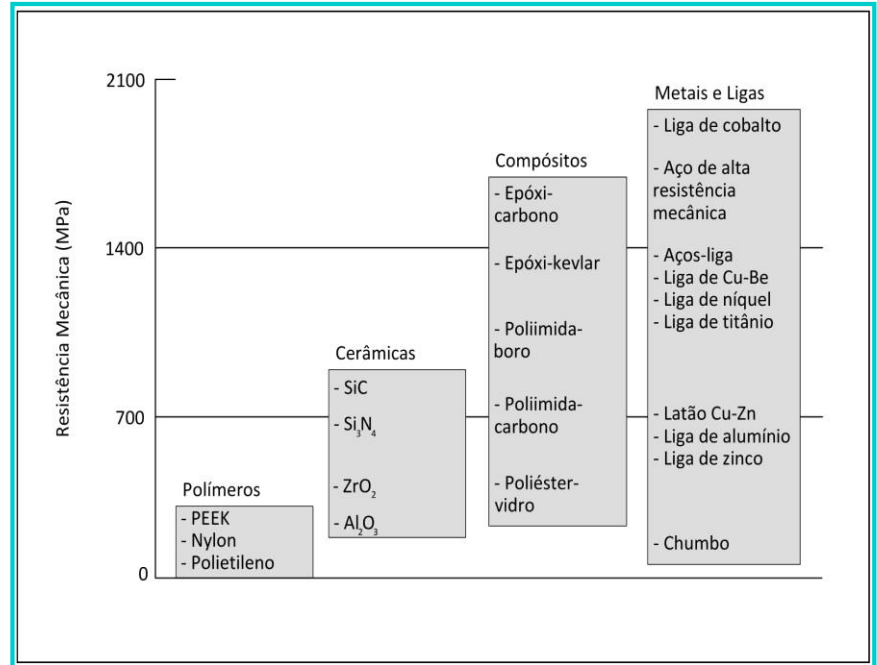
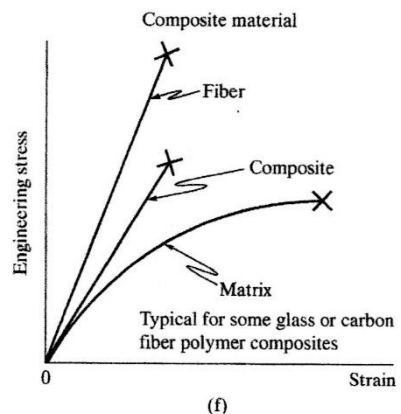
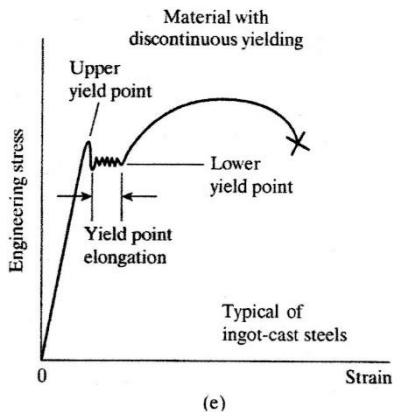
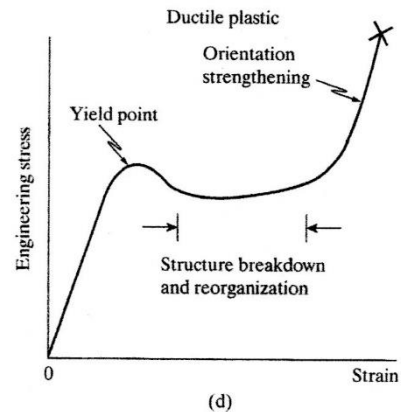
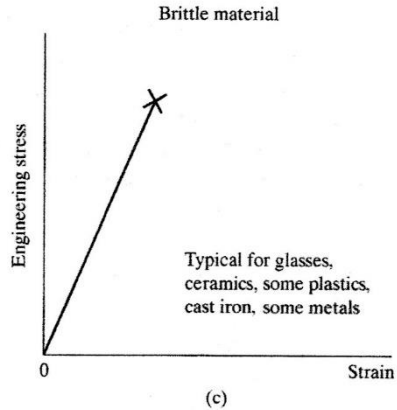
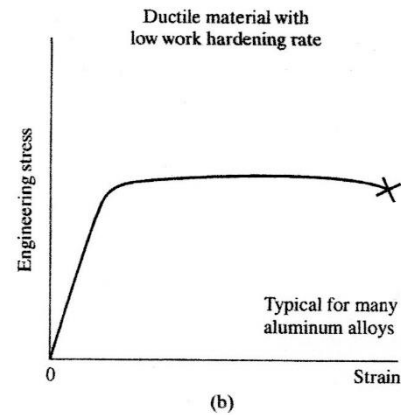
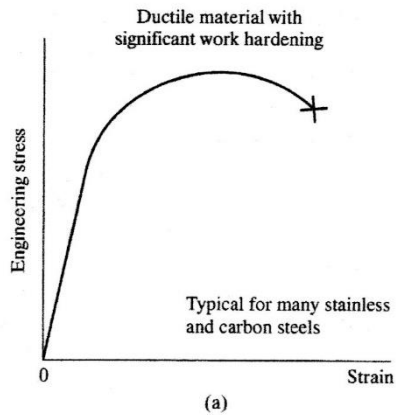
Validade e Limitações das Equações de cálculo de Tensão e Deformação



Curvas de tração para o aço 1020



Propriedades em Tração



Propriedades em Tração

Table 4.2 Tensile Properties for Some Engineering Metals

Material	Elastic Modulus E	0.2% Yield Strength σ_o	Ultimate Strength σ_u	Elongation ¹ $100\epsilon_f$	Reduction in Area $\%RA$
	GPa (10^3 ksi)	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	%
Ductile cast iron A536 (65-45-12)	159 (23)	334 (49)	448 (65)	15	19.8
AISI 1020 steel as rolled	203 (29.4)	260 (37.7)	441 (64)	36	61
ASTM A514, T1 structural steel	208 (30.2)	724 (105)	807 (117)	20	66
AISI 4142 steel as quenched	200 (29)	1619 (235)	2450 (355)	6	6
AISI 4142 steel 205°C temper	207 (30)	1688 (245)	2240 (325)	8	27
AISI 4142 steel 370°C temper	207 (30)	1584 (230)	1757 (255)	11	42
AISI 4142 steel 450°C temper	207 (30)	1378 (200)	1413 (205)	14	48
18 Ni maraging steel (250)	186 (27)	1791 (260)	1860 (270)	8	56
SAE 308 cast aluminum	70 (10.2)	169 (25)	229 (33)	0.9	1.5
2024-T4 aluminum	73.1 (10.6)	303 (44)	476 (69)	20	35
7075-T6 aluminum	71 (10.3)	469 (68)	578 (84)	11	33
AZ91C-T6 cast magnesium	40 (5.87)	113 (16)	137 (20)	0.4	0.4



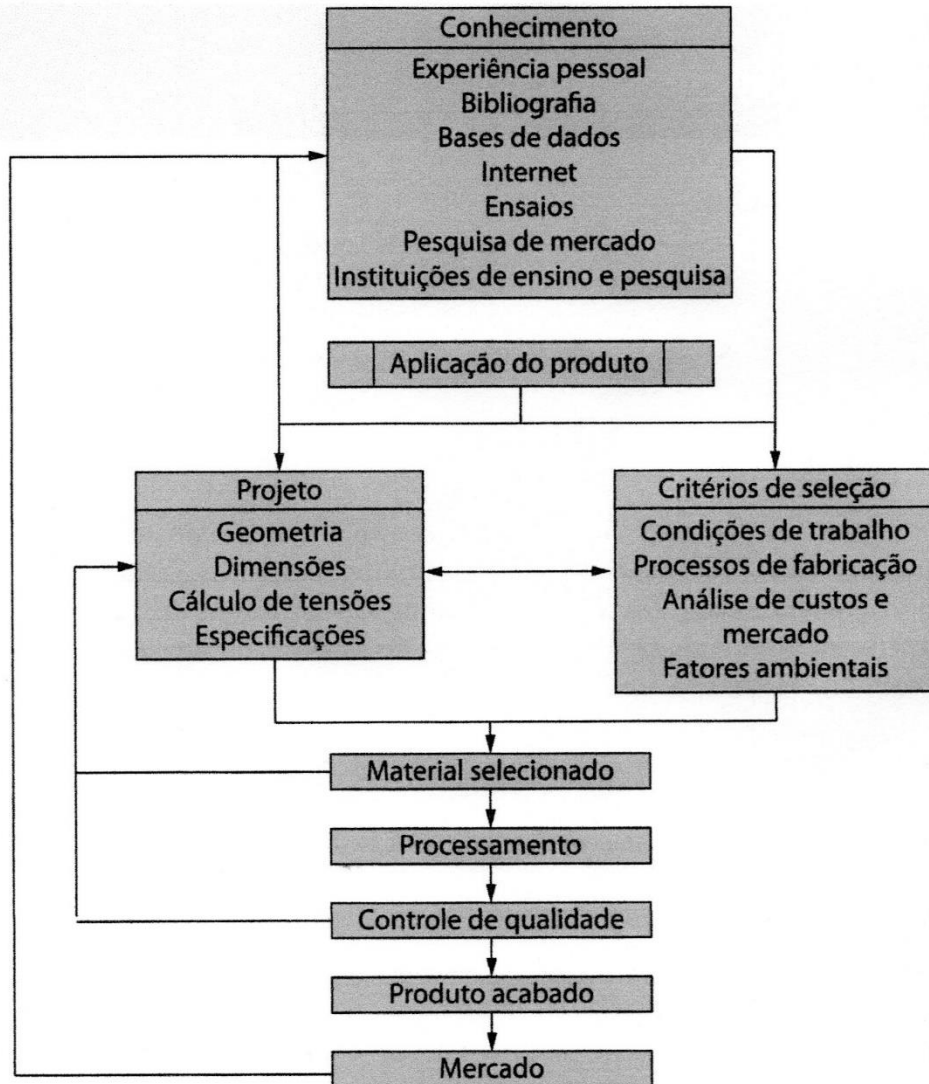
Propriedades em Tração

Table 4.3 Mechanical Properties for Polymers at Room Temperature¹

Material	Tensile properties ²				Izod Energy ³
	Modulus E	Yield σ_o	Fracture σ_f	Elong. $100\varepsilon_f$	
	GPa (10^3 ksi)	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	
ABS, medium impact	2.1–2.8 (0.3–0.4)	34–50 (5–7.2)	38–52 (5.5–7.5)	5–60	160–510 (3–9.6)
ABS, 30% glass fibers	6.9–8.3 (1–1.2)	—	90–110 (13–16)	1.5–1.8	64–69 (1.2–1.3)
Acrylic, PMMA	2.3–3.2 (0.33–0.47)	54–73 (7.8–10.6)	48–72 (7–10.5)	2–5.5	11–21 (0.2–0.4)
Epoxy, cast	2.4 (0.35)	—	28–90 (4–13)	3–6	11–53 (0.2–1)
Phenolic, cast	2.8–4.8 (0.4–0.7)	—	34–62 (5–9)	1.5–2	13–21 (0.24–0.4)
Nylon 6, dry	2.6–3.2 (0.38–0.46)	90 (13)	41–165 (6–24)	30–100	32–120 (0.6–2.2)
Nylon 6, 33% glass fibers	8.6–11 (1.25–1.6)	—	165–193 (24–28)	2.2–3.6	110–180 (2.1–3.4)
Polycarbonate PC	2.4 (0.345)	62 (9)	63–72 (9.1–10.5)	110–150	110–960 (2–18)
Polyethylene LDPE	0.17–0.28 (0.025–0.041)	9–14.5 (1.3–2.1)	8.3–32 (1.2–4.6)	100–650	No break
Polyethylene HDPE	1.08 (0.157)	26–33 (3.8–4.8)	22–31 (3.2–4.5)	10–1200	21–210 (0.4–4)
Polystyrene PS	2.3–3.3 (0.33–0.48)	—	36–52 (5.2–7.5)	1.2–2.5	19–24 (0.35–0.45)
Polystyrene HIPS	1.1–2.6 (0.16–0.37)	14.5–41 (2.1–6)	13–43 (1.9–6.2)	20–65	53–370 (1–7)
Rigid PVC	2.4–4.1 (0.35–0.6)	41–45 (5.9–6.5)	41–52 (5.9–7.5)	40–80	21–1200 (0.4–22)



Seleção de Materiais e Análise de Falhas



A seleção de materiais envolve uma gama de conhecimentos técnicos cuja amplitude dificilmente é abrangida por um só tipo de profissional.

Critérios:

- Requisitos do projeto (resistência mecânica, à oxidação, ao desgaste, à fadiga e fluência, peso específico ...).
- Disponibilidade (processos de fabricação, grau de normalização, quantidade, fornecedores ...).
- Mercado (custo, funcionalidade, estética, satisfação ao comprador, viabilidade de reciclagem, valor da sucata).



Seleção de Materiais e Análise de Falhas

TABELA 2.3 Critérios de tensões admissíveis para algumas aplicações

EQUIPAMENTO/ INSTALAÇÃO	CÓDIGO/NORMA DE PROJETO	TENSÃO ADMISSÍVEL PARA TEMPERATURAS FORA DA FAIXA DE FLUÊNCIA	OBSERVAÇÕES
Vasos de pressão permutadores de calor	ASME – Seção VIII – Divisão 1	Limite de Resistência/3,5 Limite de Escoamento/1,6	Considerar a fluên- cia para tempera- turas na faixa de fluência
	ASME – Seção VIII – Divisão 2	Limite de Resistência/3,5 Limite de Escoamento/1,5	
Caldeiras	ASME – Seção I	Limite de Resistência/3,5 Limite de Escoamento/1,6	
Tanques de armazenamento	API – 650 –	145 MPa (14,70 kg/mm ²)	Para aço com quali- dade estrutural
	API API – 650 – Apêndice D	170 MPa (17,20 kg/mm ²)	
Tubulações em unidades de processo (Indústria de Petróleo, Petroquímica e Química)	ASME B 31.3	Limite de Resistência/3,0 Limite de Escoamento/1,6	Considerar a fluên- cia para tempera- turas na faixa de fluência
Tubulações de vapor	ASME B 31.1	Limite de Resistência/3,0 Limite de Escoamento/1,6	
Tubulações de ar e de gases	ASME B 31.2	Limite de Resistência/2,66	



Seleção de Materiais e Análise de Falhas

Custo Relativo dos Materiais

Materiais	Custo relativo	Materiais	Custo relativo
Aço-carbono estrutural	1,00	Aço inoxidável tipo 321	13,7
Aço-carbono qualificado	1,15	Aço inoxidável tipo 410	6,0
Aço-carbono acalmado (com Si)	1,25	Ferro fundido	0,95
Aço-liga ½ Mo	2,3	Latão de alumínio	7,6
Aço-liga 1 ¼ Cr - ½ Mo	3,1	Latão almirantado	7,8
Aço-liga 5 Cr - ½ Mo	4,5	Cobre-níquel 90-10	22,0
Aço-liga 3 ½ Ni	3,0	Cobre-níquel 70-30	27,0
Aço inoxidável tipo 304	8,6	Alumínio	2,5
Aço inoxidável tipo 304L	13,3	Metal Monel	31,8
Aço inoxidável tipo 310	13,5	Titânio	41,0
Aço inoxidável tipo 316	11,1	Incoloy	48,5



Seleção de Materiais e Análise de Falhas

Table 3.1 Properties and Uses for Selected Engineering Metals and their Alloys

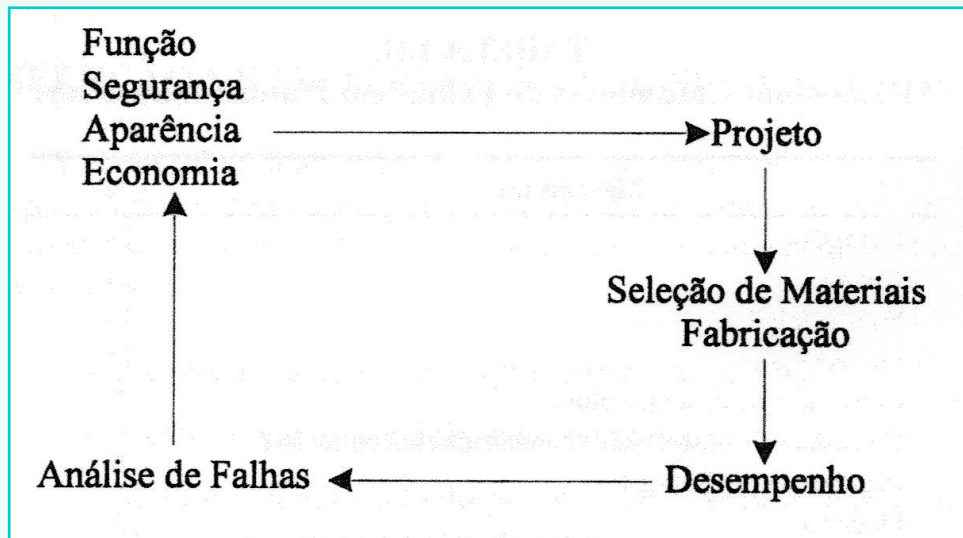
Metal	Melting Temp.	Density	Elastic Modulus	Typical Strength	Uses; Comments
	T_m °C (°F)	ρ g/cm ³ (lb/ft ³)	E GPa (10 ³ ksi)	σ_u MPa (ksi)	
Iron (Fe) and steel	1538 (2800)	7.87 (491)	212 (30.7)	200 to 2500 (30 to 360)	Diverse: structures, machine and vehicle parts, tools. Most widely used engineering metal.
Aluminum (Al)	660 (1220)	2.70 (168)	70 (10.2)	140 to 550 (20 to 80)	Aircraft and other lightweight structure and parts.
Titanium (Ti)	1670 (3040)	4.51 (281)	120 (17.4)	340 to 1200 (50 to 170)	Aircraft structure and engines; industrial machine parts; surgical implants.
Copper (Cu)	1085 (1985)	8.93 (557)	130 (18.8)	170 to 1400 (25 to 200)	Electrical conductors; corrosion-resistant parts, valves, pipes. Alloyed to make bronze and brass.
Magnesium (Mg)	650 (1200)	1.74 (108)	45 (6.5)	170 to 340 (25 to 50)	Parts for high-speed machinery; aerospace parts.
Nickel (Ni)	1455 (2650)	8.90 (556)	210 (30.5)	340 to 1400 (50 to 200)	Jet engine parts; alloying addition for steels.
Cobalt (Co)	1495 (2720)	8.83 (551)	211 (30.6)	650 to 2000 (95 to 300)	Jet engine parts; wear resistant coatings; surgical implants.
Tungsten (W)	3422 (6190)	19.3 (1200)	411 (59.6)	120 to 650 (17 to 94)	Electrodes, light bulb filaments, flywheels, gyroscopes.
Lead (Pb)	328 (620)	11.3 (708)	16 (2.3)	12 to 80 (2 to 12)	Corrosion resistant piping; weights, shot. Alloyed with tin in solders.

Notes: The values of T_m , ρ , and E are only moderately sensitive to alloying. Ranges for σ_u and uses include alloys based on these metals. Properties ρ , E , and σ_u are at room temperature, except σ_u is at 1650°C for tungsten.



Falhas em Serviço

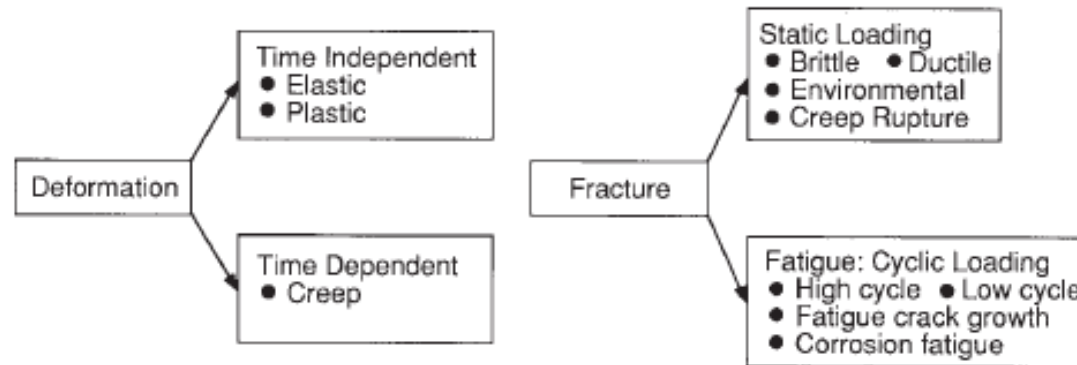
- A análise de falhas de componentes é um aspecto extremamente importante da Engenharia
- Conhecendo-se as causas de falhas, pode-se melhorar:
 - Projeto
 - Condições de operação
 - Seleção do material
- As causas de falhas podem ser divididas em 3 categorias:
 - Uso incompatível com as premissas do projeto (mau uso)
 - Erros de fabricação, montagem e manutenção
 - Erros de projeto, que podem incluir:
 - Forma e dimensões do componente
 - Propriedades do material (seleção)



Processos que conduzem a Falhas em Serviço:

- Processos mecânicos:
 - deformação permanente, ou ruptura, por carregamento excessivo;
 - fratura frágil;
 - deformação permanente, ou ruptura, por fluência;
 - fratura por fadiga mecânica;
 - distorção por colapso incremental (*racheting*) – fadiga térmica.
- Processos mecânico-químicos:
 - fadiga associado à corrosão;
 - fragilização e outros danos causados pelo hidrogênio;
 - fragilização por metal líquido;
 - corrosão sob tensão;
 - corrosão-erosão.
- Processos químicos e eletroquímicos:
 - corrosão generalizada;
 - oxidação, carbonetação, sulfetação e outros processos corrosivos em altas temperaturas;
 - corrosão por pites, em frestas, intergranular, seletiva ou outras formas de corrosão localizada.

Tipos básicos de deformação e fratura:



Falhas em Serviço

Frequência de Causas de Falhas em Componentes Industriais:

(Fonte: Brooks & Choudhury, "Metallurgical Failure Analysis", 1993.)

• Seleção de Material	38%
• Defeito de Fabricação	15%
• Erro em Tratamento Térmico	15%
• Erro em Projeto Mecânico	11%
• Condições de Operação Imprevistas	8%
• Controle Inadequado das Condições Ambientais	6%
• Inspeção e Controle de Qualidade impróprios	5%
• Outras	2%

Mecanismos de falha em Plantas Industriais devido à deterioração em condições de serviço:

• Corrosão	29%
• Fadiga	25%
• Fratura Frágil	16%
• Sobrecarga	11%
• Corrosão/Alta Temper.	7%
• Corrosão/Fadiga	6%
• Fluência	3%
• Desgaste/Abrasão/Erosão	3%



Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

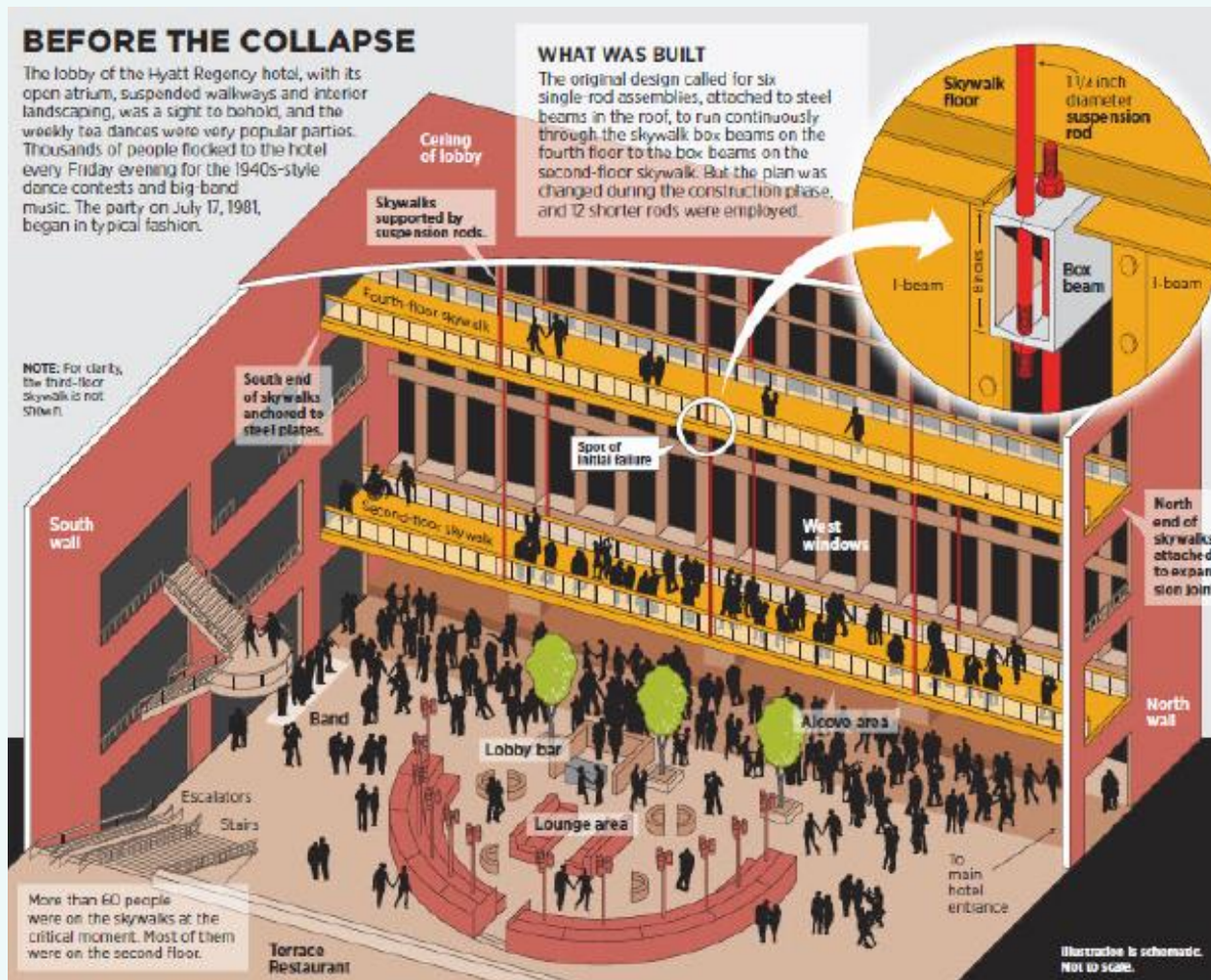


Edifício mais alto da cidade, com 40 andares.



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City



Átrio: obra contratada em dezembro de 1978.
Inauguração do hotel: Julho de 1980.

- Junto à lateral do átrio havia duas passarelas suspensas, uma na altura do segundo andar e outra no quarto andar.
- O projeto original previa que as passarelas fossem suspensas por tirantes contínuos.
- Para facilitar montagem, o fabricante da estrutura pediu para alterar essas barras, dividindo em dois segmentos; a equipe de projeto não fez objeção.



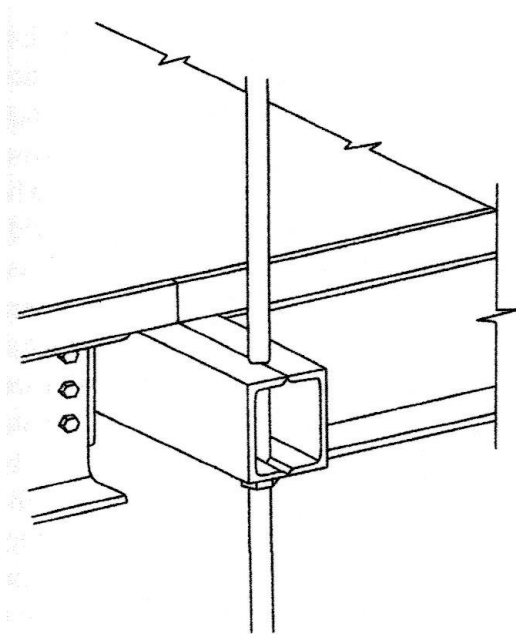
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

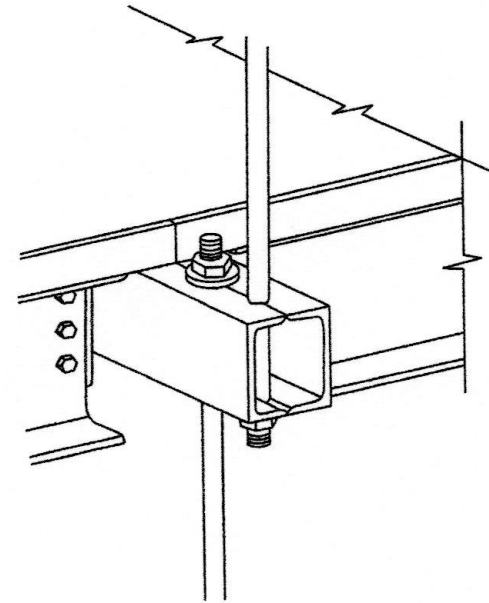
Cada passarela era suportada por 3 vigas transversais suspensas.
Vigas fabricadas em perfil duplo “U” soldado.

Tirantes de sustentação das vigas da passarela do quarto andar:

Projeto original



Como foi fabricado



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

Em 17 de julho de 1981, às 19h05 ...



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

- As passarelas caíram uma sobre a outra, e as duas sobre o lobby.
- Total de mortos: 114.
- Feridos: mais de 200.
- O pior acidente por falha estrutural na história dos Estados Unidos.
- Várias teorias propunham explicar as causas do acidente, incluindo a alegação de que havia muitas pessoas dançando nas passarelas.
- O engenheiro de estruturas Wayne Lischka, contratado pelo jornal *The Kansas City Star* para uma análise independente, descobriu a real causa.
- A falta de comunicação adequada entre a empresa *Jack D. Gillum and Associates* (autora do projeto) e a *Havens Steel* (fabricante da estrutura) foi crucial para a falha.
- A *Jack D. Gillum* falhou em rever cuidadosamente o projeto inicial e aceitou as alterações propostas pela *Havens* sem executar cálculos básicos que revelariam a duplicação do carregamento nas conexões.



Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

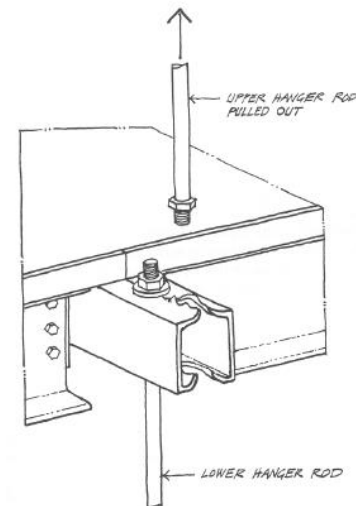
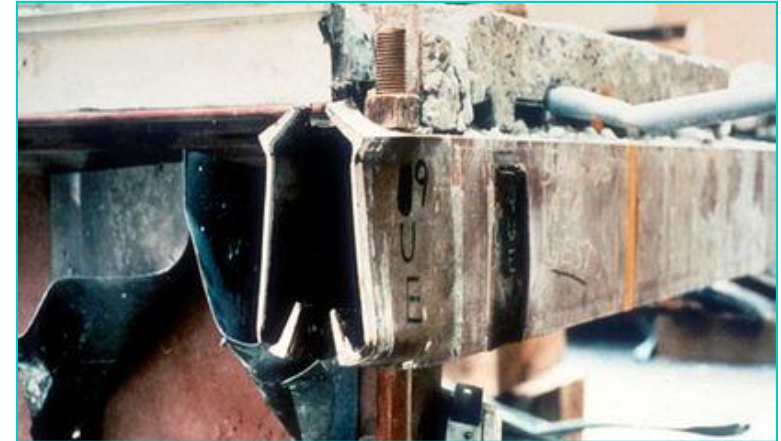
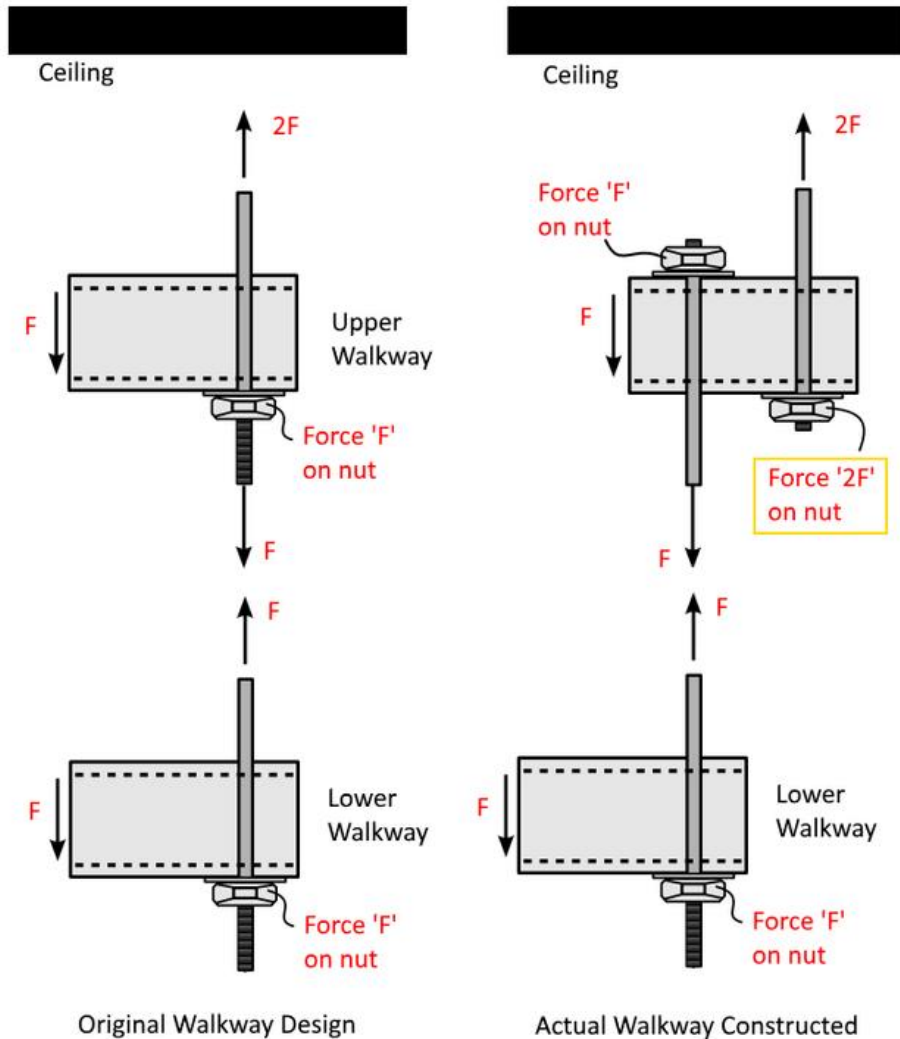


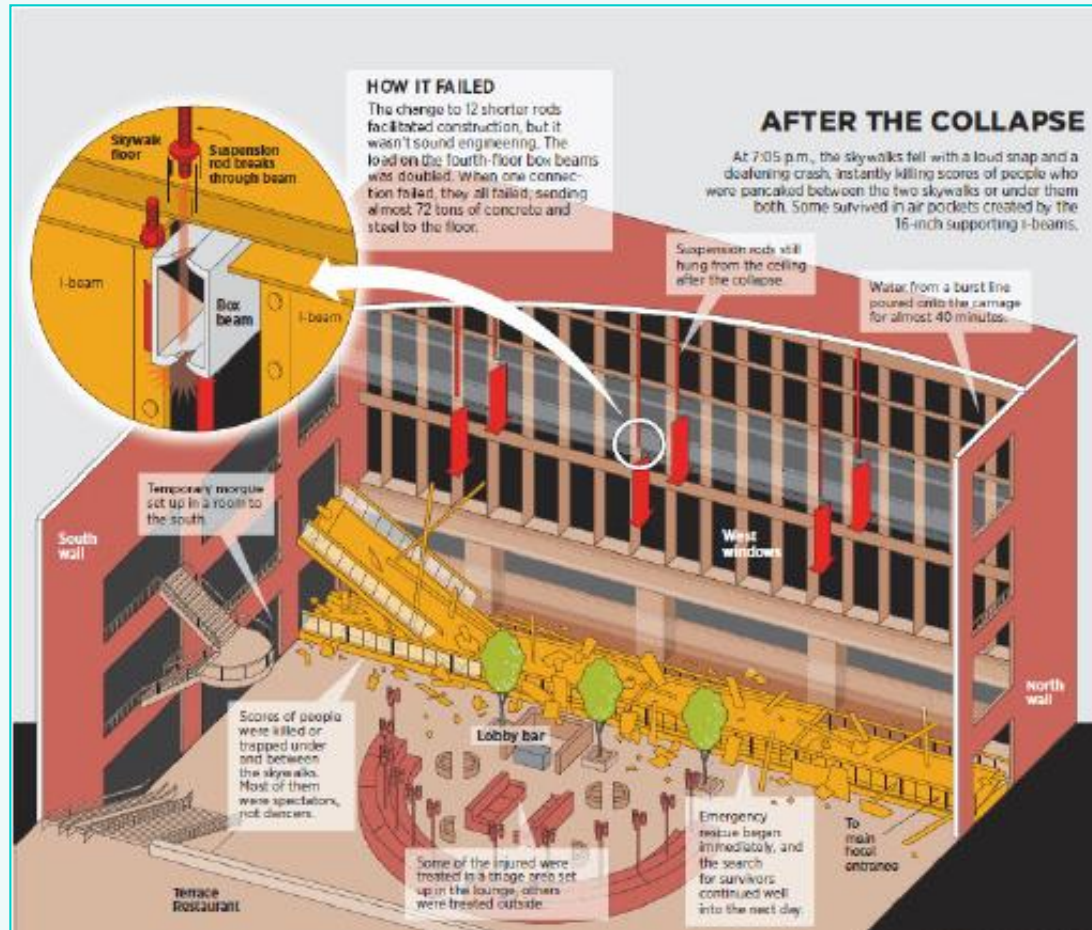
Image credit: DTR via Wikipedia, Public domain.

Image modified by Procrastilearner (Steemit) to improve clarity.



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City



Exemplo: Passarelas do Hyatt Regency Hotel em Kansas City

- Os engenheiros empregados pela *Jack D. Gillum and Associates* que assinaram os desenhos finais foram condenados por negligência, conduta irregular e conduta não profissional na prática da engenharia; todos perderam sua licença profissional e sua afiliação à ASCE (Sociedade Americana de Engenheiros Civis).
- A *Jack D. Gillum and Associates* foi inocentada de negligência criminal, mas perdeu sua licença como empresa de engenharia.
- Mais de 140 milhões de dólares foram pagos em indenizações às vítimas e seus familiares por meio de acordos e julgamentos.
- O hotel reabriu posteriormente, renomeado Hyatt Regency Crown Center.
- A tragédia do Hyatt Hotel permanece como um modelo clássico para o estudo da ética e dos erros de engenharia.



Responsabilidade Profissional

“A grande responsabilidade do engenheiro em comparação aos outros profissionais é que o resultado do seu trabalho está a céu aberto, onde todos podem ver. Ele não pode enterrar seus erros em uma sepultura como os médicos, não pode fazê-los desaparecer ou culpar o juiz como os advogados, não pode disfarçar-os com árvores e trepadeiras como os arquitetos, e não pode, como os políticos, esconder seus deslizes culpando a oposição e esperando que o povo esqueça. O engenheiro simplesmente não pode negar o que fez. Se seu projeto falha, ele está perdido. É isso que o assombra dia e noite. Ele chega do trabalho ao final do dia decidido a recalcular tudo. Acorda no meio da noite suando frio e põe algo no papel que parece ridículo na manhã seguinte. Todos os dias ele estremece ao pensar nas falhas que inevitavelmente aparecem no desenvolvimento de um projeto”

H. Hoover. The Memoirs of Herbert Hoover – Years of Adventure. New York: The McMillan Company, 1951, 496p.



Herbert C. Hoover
(1874 – 1964)

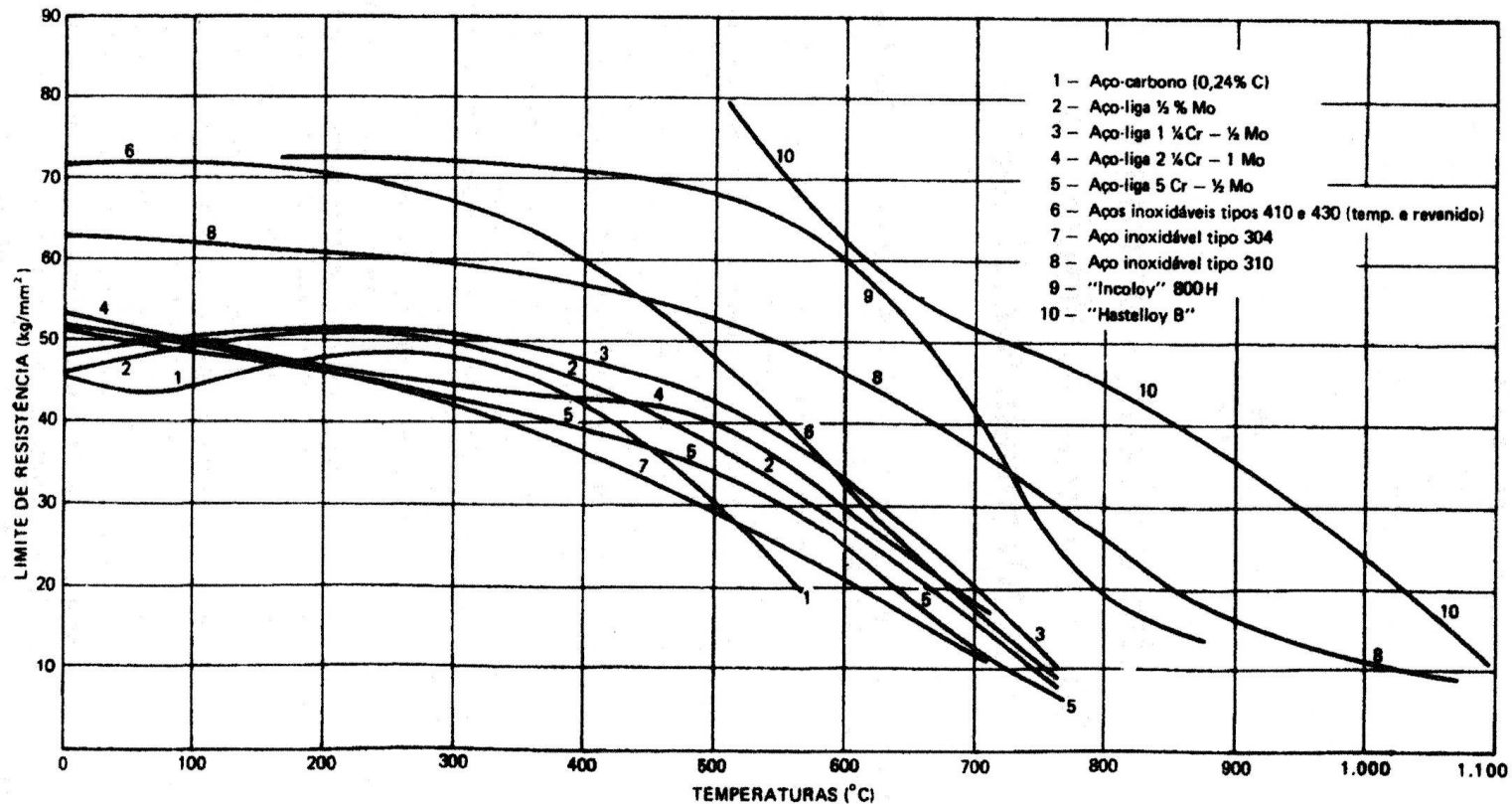


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Propriedades dos metais e ligas em temperaturas elevadas

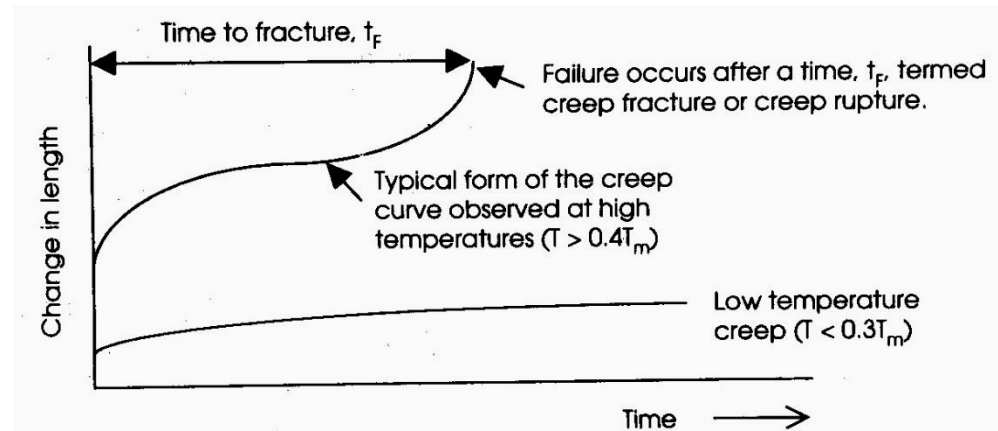
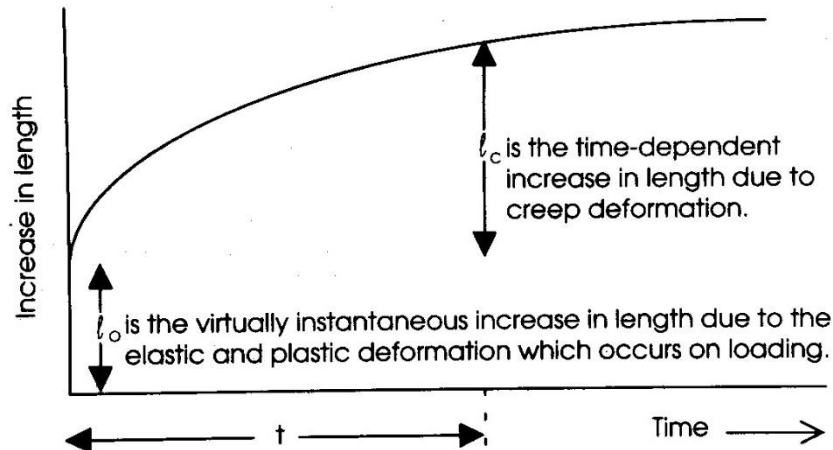
Aumento da temperatura diminui a dureza, resistência à tração e módulo de Young, e aumenta a ductilidade (*short-time properties*).



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Comportamento Mecânico Dependente do Tempo:

- Deformações elástica e plástica idealizadas como instantâneas.
- Um sólido pode sofrer deformações que dependem do tempo, mesmo se a tensão for mantida constante.
- **Fluência** é a deformação plástica que ocorre gradualmente no tempo.



Faixa de temperaturas em que o fenômeno da fluência passa a ser significativo (*creep range*). A temperatura em que se inicia a faixa de fluência depende do material. Temperaturas-limite aproximadas:

Alumínio e ligas 205°C

Titânio e ligas 315°C

Aços carbono e baixa liga 370°C



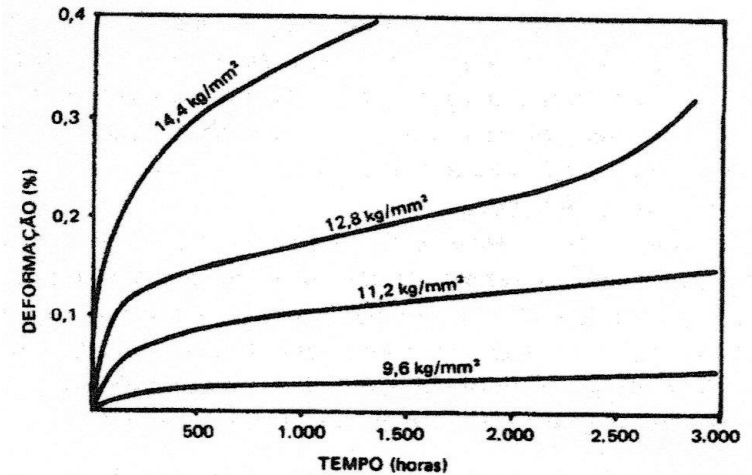
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

O comportamento em fluência depende da tensão e da temperatura.

Exemplo: Considere uma barra de aço inoxidável 304 com 12mm de diâmetro e comprimento 10m. Num ensaio de tração a 650°C, o material ainda está na região elástica sob uma carga de 5 ton. Note na tabela que essa mesma barra sofre fluência sob cargas bem menores:

Carga de tração (kg)	Temperatura (°C)	Tempo necessário para	
		deformação de 25 mm	ruptura
1.500	650	04 meses	4 anos
3.000	650	20 horas	5 dias
1.500	730	20 horas	5 dias



Curvas de fluência para aço-carbono a 450°C

Ensaio de fluência:

- Procedimentos de ensaio padronizados por norma, por exemplo ASTM E139
- Usualmente empregam-se corpos-de-prova cilíndricos submetidos a carga axial.
- Classificação dos ensaios:
 - Ensaio de ruptura por fluência
 - Ensaio de fluência à carga constante
 - Ensaio de fluência à tensão constante
 - Ensaio de relaxação

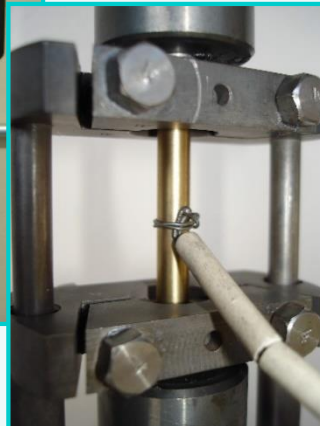
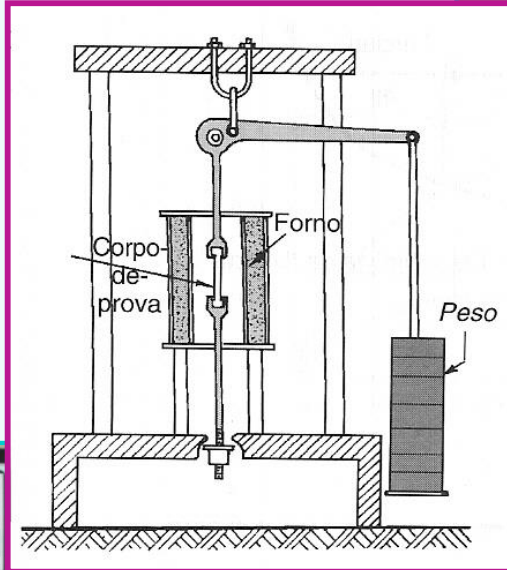


Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Resultados de um ensaio de fluência

São fornecidos os valores de:

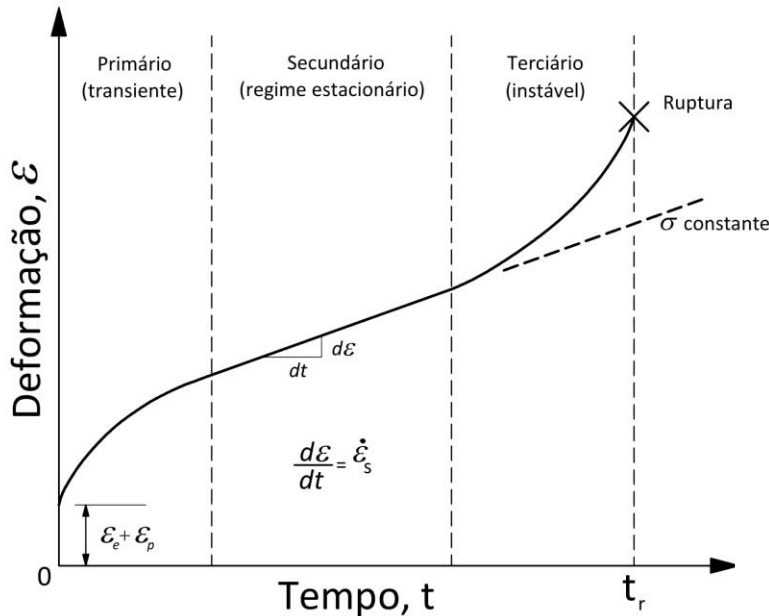
- Tensão, σ
- Temperatura, T
- Tempo de ruptura, t_R
- Taxa de fluência estacionária



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Curva típica de fluência:



Taxa de fluência estacionária

$$\dot{\varepsilon}_s = u(\sigma) \cdot v(T)$$

Funções u e v independentes

Para obter v :

Mesmo σ e diferentes T .

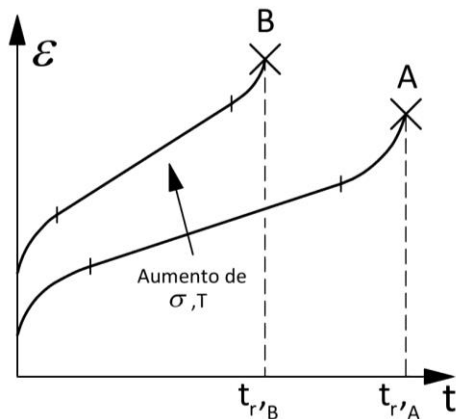
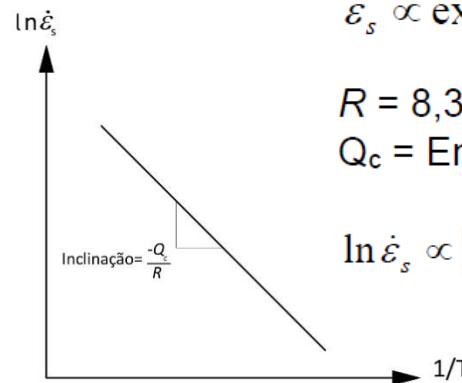
Processo termicamente ativado:

$$\dot{\varepsilon}_s \propto \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

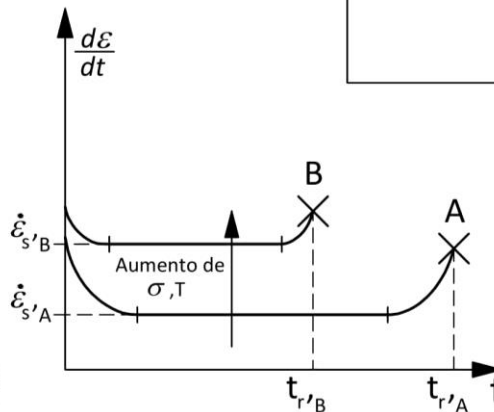
$$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Q_c = Energia de ativação aparente

$$\ln \dot{\varepsilon}_s \propto \left(-\frac{Q_c}{R}\right) \cdot \frac{1}{T}$$



(a)



(b)

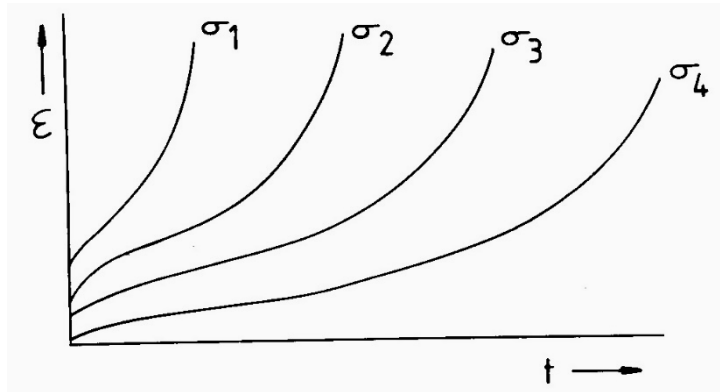


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

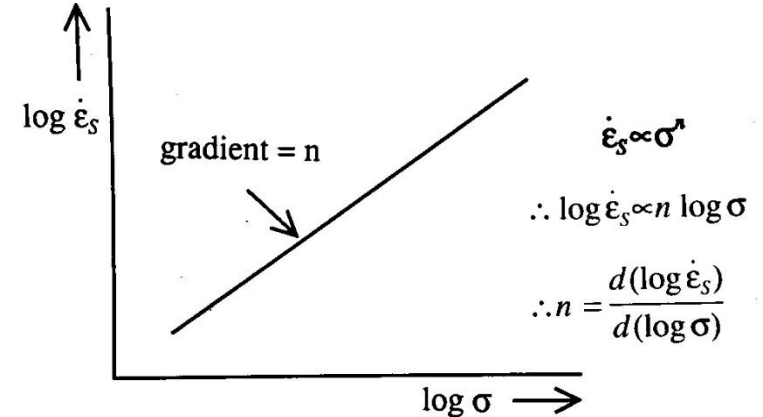
- Dependência de $\dot{\epsilon}_s$ com σ (função n) : Ensaio com mesmo T
- Não se observa uma relação única; correlação satisfatória é dada por uma relação potencial:

✓ $\dot{\epsilon}_s \propto \sigma^n$ (dependência de σ : Lei de Norton)

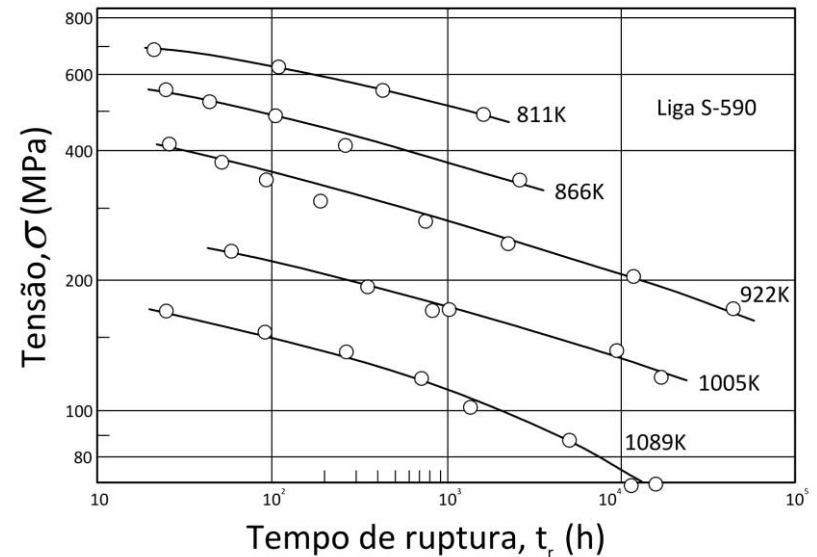


- Representação do comportamento em altas temperaturas:

✓ $\dot{\epsilon}_s = A \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$



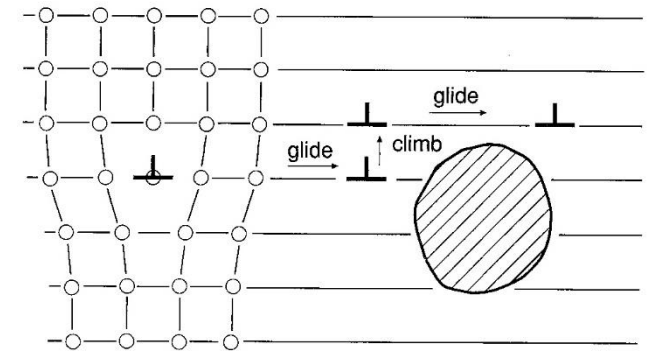
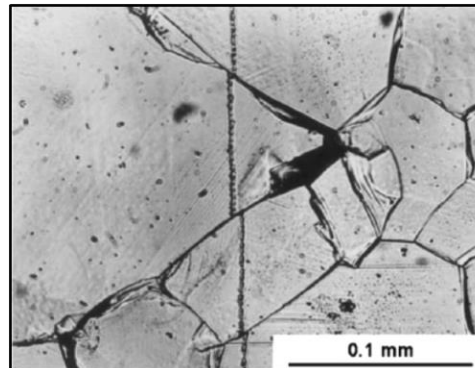
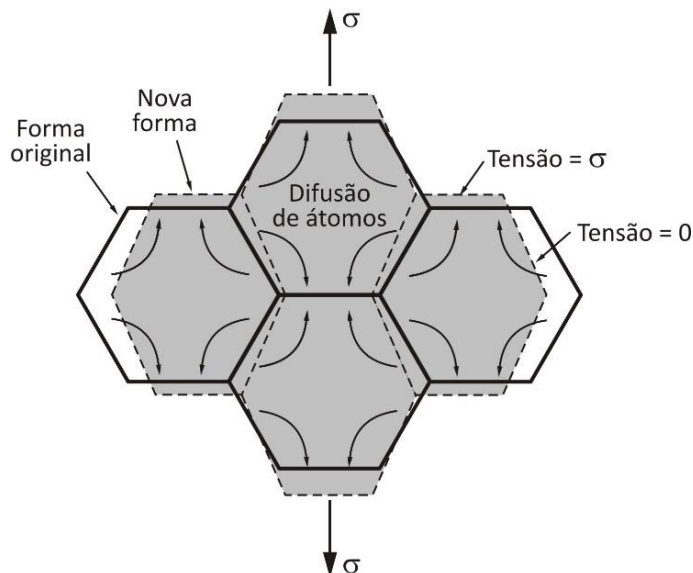
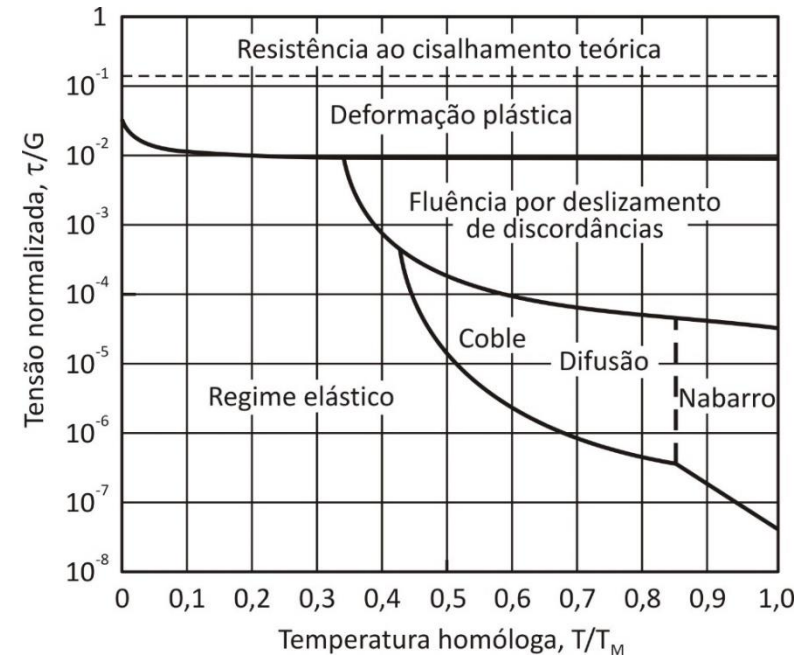
Curvas de tempo de ruptura por fluência:



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

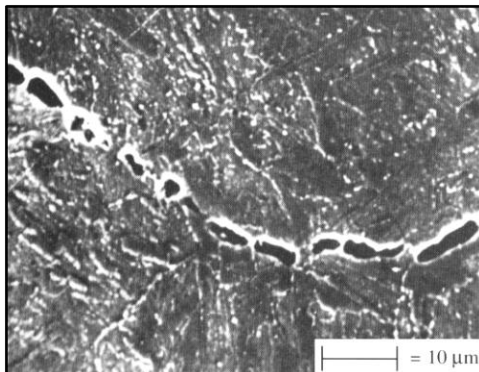
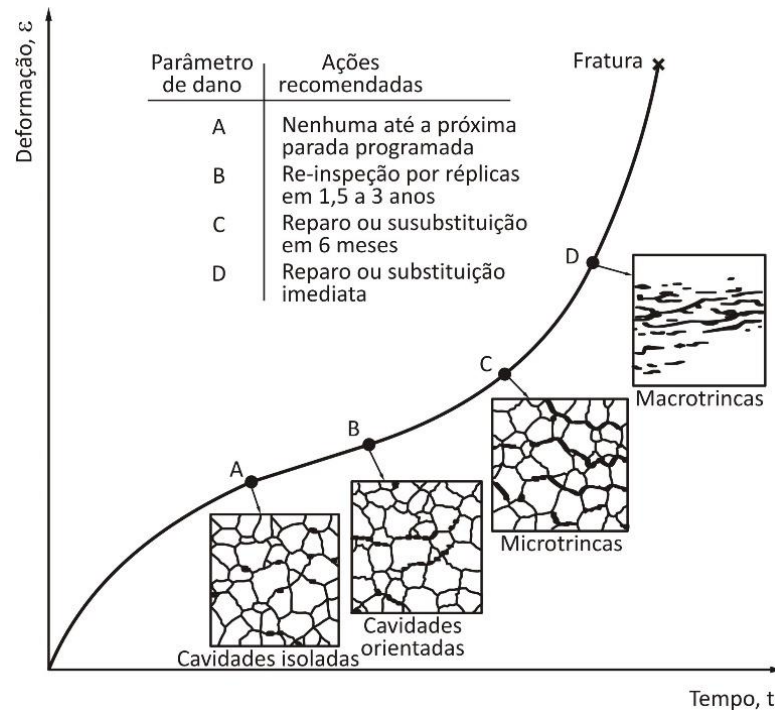
Mecanismos de Deformação em Fluência:

- Transporte de átomos por difusão
 - ✓ Ao longo dos contornos de grão (Coble)
 - ✓ Através da lática (Nabarro-Herring)
- Escalagem e deslizamento de discordâncias
- Deslizamento de contornos de grão
- Múltiplos mecanismos: podem atuar de modo independente ou cooperativo



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Falha por Fluência:



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Fluência e o Projeto de Equipamentos:

Melhores propriedades em fluência

- Estrutura cristalina: CFC melhor que CCC (aços austeníticos resistem mais à fluência que os ferríticos ou martensíticos).
- Estrutura granular: granulação grossa (*coarse grains*) é mais resistente.
- Composição química: adição de elementos de liga que causam precipitação nos contornos de grão. Para aços, o principal elemento é o molibdênio (Mo).

Técnicas de Extrapolação

Impossibilidade prática de realizar ensaios de fluência com o tempo de vida útil dos equipamentos.

Extrapolção dos resultados de ensaios em tempo mais curto; são soluções aproximadas (erros).

Norma API 530 recomenda o

Parâmetro de Larson-Miller (PLM):

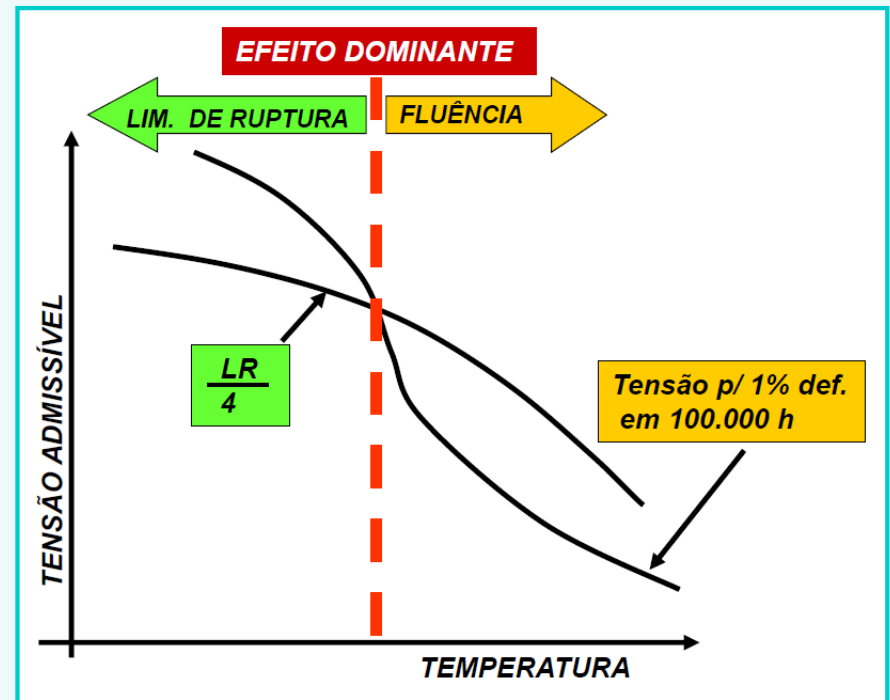
$P_{LM} = T \cdot (C + \log t_r)$, onde C é uma constante do material.

Danos em condições variáveis,
“regra da fração da vida”:

$$\sum \frac{t_i}{tr_i} = 1$$

Resistência à fluência

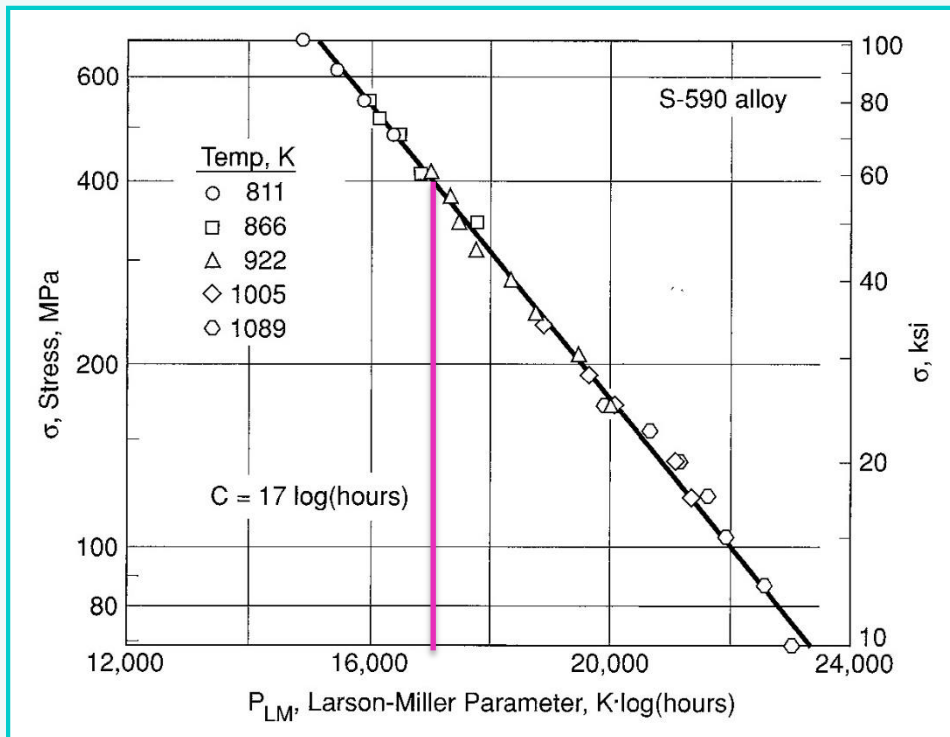
- Exemplo: Tensão que causa deformação em fluência de 1% após 100.000 horas, à determinada temperatura de operação.



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Fluência e o Projeto de Equipamentos:

Exemplo: Para fabricar um componente que deve operar por 20 anos a 500°C, será empregada a liga ferrosa S-590 (C ≤ 0,43% ; Cr = 21% ; Ni = 20% ; Mo = 4% - em peso). Sabendo que para esta liga, a constante $C = 17 \log(h)$ e considerando o tempo de ruptura pelo parâmetro de Larson-Miller dado no gráfico, estime a máxima tensão que pode ser aplicada no componente.



Solução: O parâmetro de Larson-Miller é dado por:

$$P_{LM} = 773 [17 + \log (20 \times 365 \times 24)] = 17.194.$$

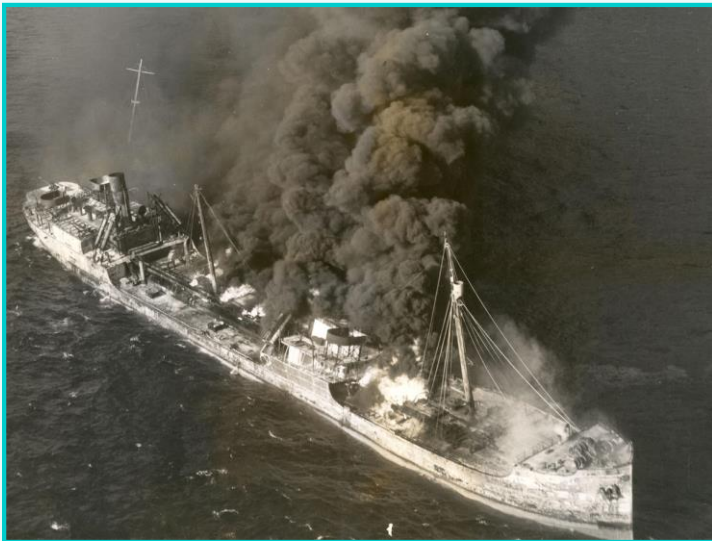
Do gráfico, obtemos $\sigma \approx 400$ MPa.



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Fragilidade em baixas temperaturas

- Um evento marcante para o estudo da fratura frágil e sua associação com as baixas temperaturas ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial.
- Com grande parte da Europa ocupada pela Alemanha nazista, a Inglaterra dependia dos suprimentos enviados pelos Estados Unidos. Porém, a Alemanha tinha o domínio do Atlântico norte e seus submarinos afundavam os navios cargueiros americanos a uma taxa devastadora. Era preciso repor os navios a uma taxa maior que as perdas.
- Esforço de guerra exigiu que o tempo de fabricação dos navios fosse dramaticamente reduzido. Nova técnica construtiva com uso intensivo de solda.



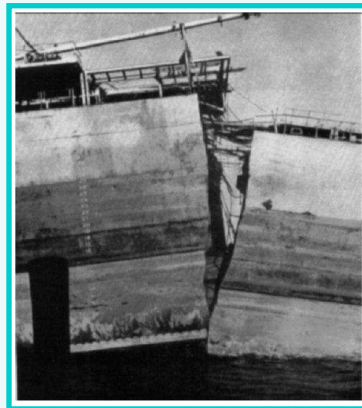
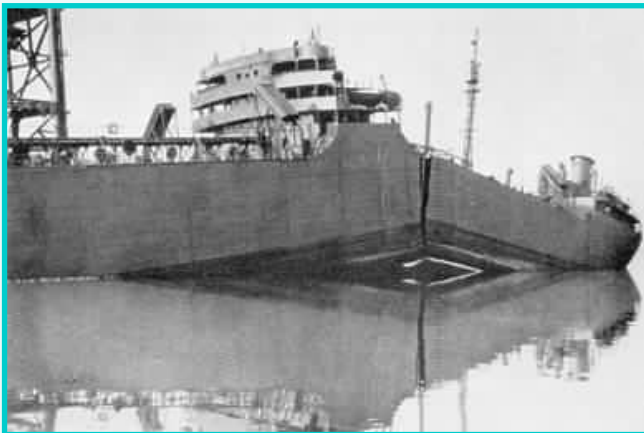
Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

- Os cargueiros *Liberty* passaram a ser fabricados em grande número, por diversos estaleiros. Navios muito simples, com baixo tempo de vida útil (5 anos).
- No entanto, falhas começaram a ocorrer... Verificou-se que as falhas nos *Liberty* e nos navios-tanque T2 ocorriam com mais frequência nos meses de inverno.
- Fatores: Baixa soldabilidade do aço e treinamento deficiente de soldadores (defeitos em juntas soldadas); Projeto deficiente (caminho preferencial para as trincas); Tensões residuais (contribuíram para a progressão da fratura).
- Ensaios de impacto já existiam desde o final do século XIX, mas não eram considerados requisito de especificação de materiais até o reconhecimento de sua capacidade de detectar a transição dúctil-frágil em aços.



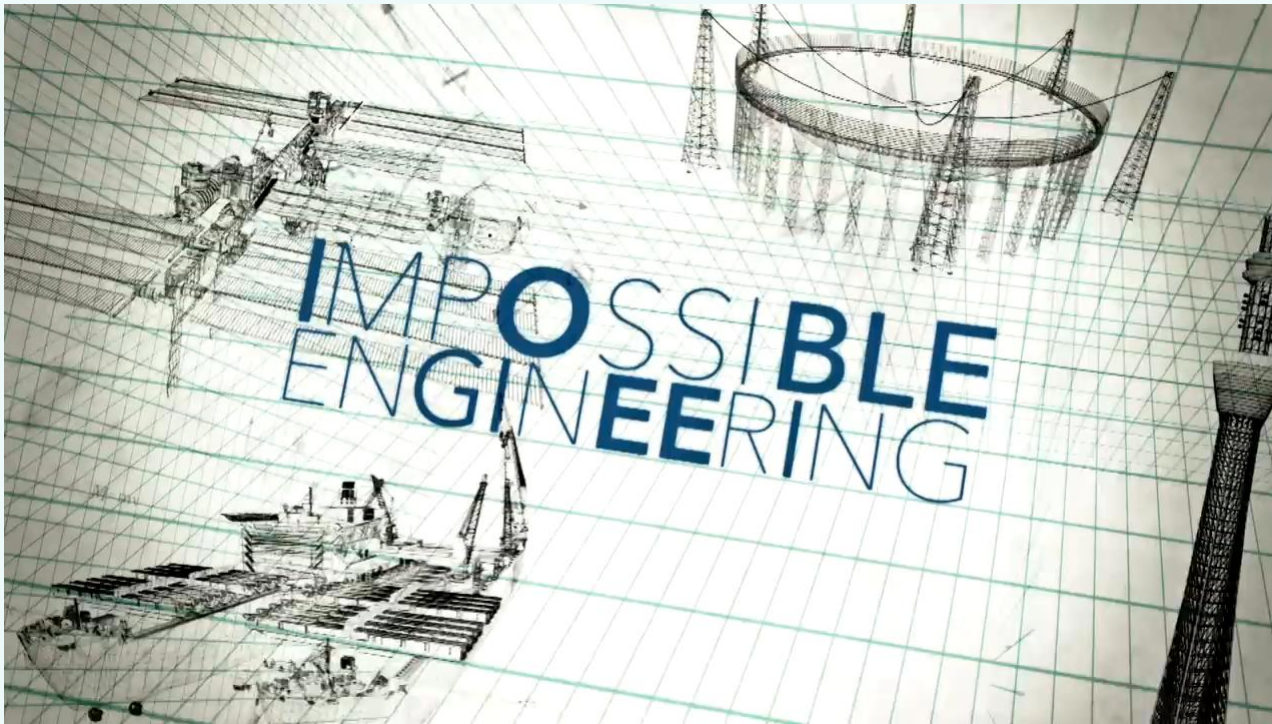
Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

- O problema foi tão grave que a Marinha dos Estados Unidos instalou um Comitê de Investigação para determinar suas causas e formas de corrigi-lo. No relatório final desta comissão consta que, de 4.694 navios avaliados de fevereiro/1942 a março/1946, houve 1.441 casos de dano reportados em 970 navios (mais de 20%), que exigiram reparos ou resultaram na perda do navio. Alguns sofreram falha repentina no inverno, mesmo estando descarregados e em águas calmas.
- **Nunca houve o registro de um número tão grande de falhas em um mesmo tipo de estrutura na história da engenharia.**
- Para o conhecimento da época, as causas eram um mistério. Investigou-se o papel da soldagem, do projeto, dos materiais, etc. Desenvolveu-se um critério de qualidade baseado na energia absorvida pela amostra em um ensaio de impacto.



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Os cargueiros “Liberty” e sua importância para o esforço de guerra (vídeo):



Dos mais de 2.700 *Liberty* produzidos, apenas 2 sobrevivem nos dias atuais.

Um deles, o *Jeremiah O'Brien*, navegou dos Estados Unidos até a França em 1994, pilotado por uma tripulação de cadetes e veteranos de guerra.

Foi o único grande navio participante da operação *Overlord* a retornar, depois de 50 anos, para o aniversário do “dia D”.

Links para vídeos sobre o Liberty e o esforço de guerra:

<https://www.youtube.com/watch?v=CODDizM6ke0>

<https://www.youtube.com/watch?v=8qDxqBvK3NA> (vídeo legendado)

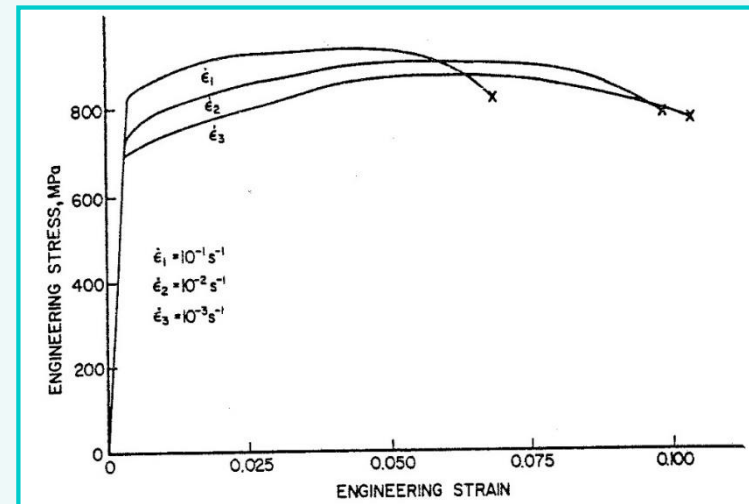
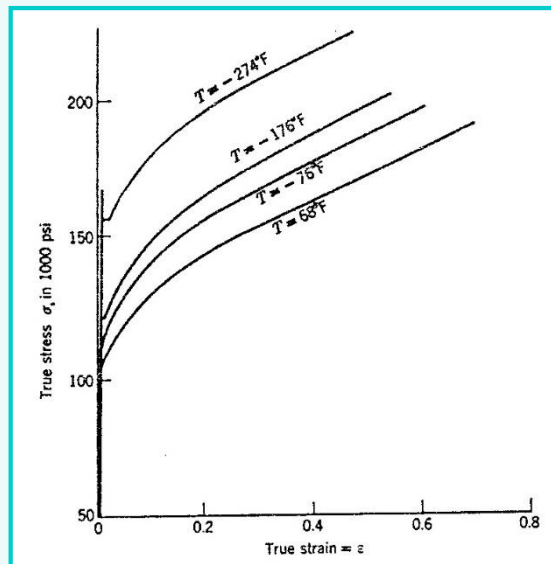


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

- Condições que reduzem a capacidade do material se deformar plasticamente:
 - Temperatura suficientemente baixa
 - Alta taxa de carregamento
 - Estado de tensão triaxial
- Essas condições podem ser obtidas em Ensaio de Impacto de amostras entalhadas

Efeitos da Temperatura e Taxa de Deformação:



(Ensaio de tração em aço-carbono)

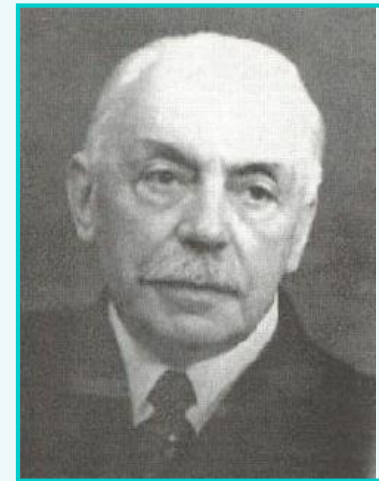
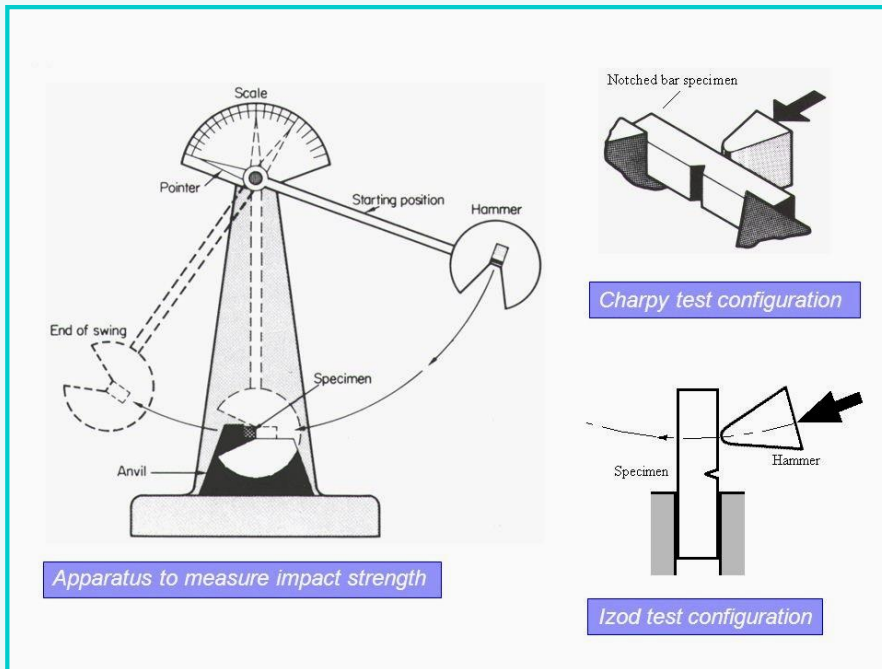


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Ensaaios com Pêndulo Circular:

- Dentre os vários ensaios dinâmicos para estudar a fratura frágil, os ensaios de impacto com pêndulo são mais empregados.
- Dois principais tipos: Charpy com entalhe em V e Izod (Norma ASTM E23).
- Augustin Charpy sugeriu o ensaio de impacto (em formato próximo ao que é empregado atualmente) em junho de 1901, na França. O inglês Edwin Izod apresentou sua proposta para ensaio de impacto com pêndulo em 1903.



Augustin Charpy (1865 - 1945)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Transição Dúctil-Frágil:

- Apresentam temperatura de transição bem definida: Aços ferríticos usados em aplicações estruturais como Navios, Vasos de pressão e Tubulações, Pontes. Além de outros metais CCC, como os metais refratários (Nb, Ta, Mo, W).
- Transição no Modo de Fratura:

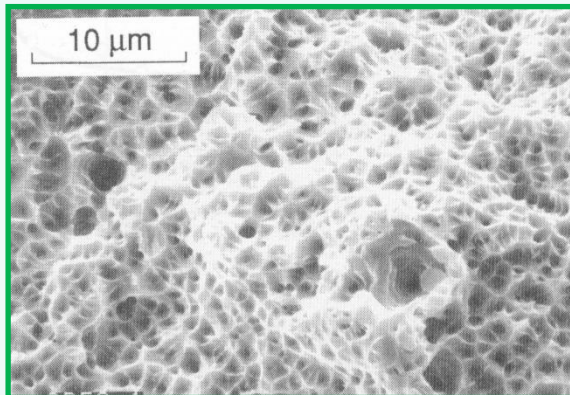
Coalescência de Microcavidades



Dúctil



Alta Temperatura



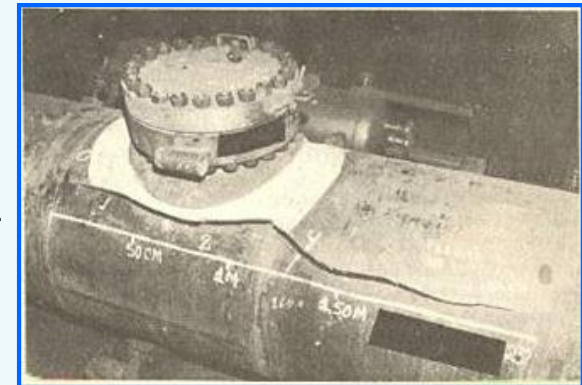
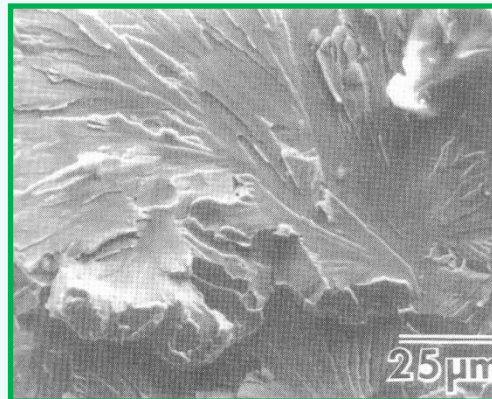
Clivagem



Frágil



Baixa Temperatura



VASO DE PRESSÃO
ROMPIDO POR
FRATURA FRÁGIL

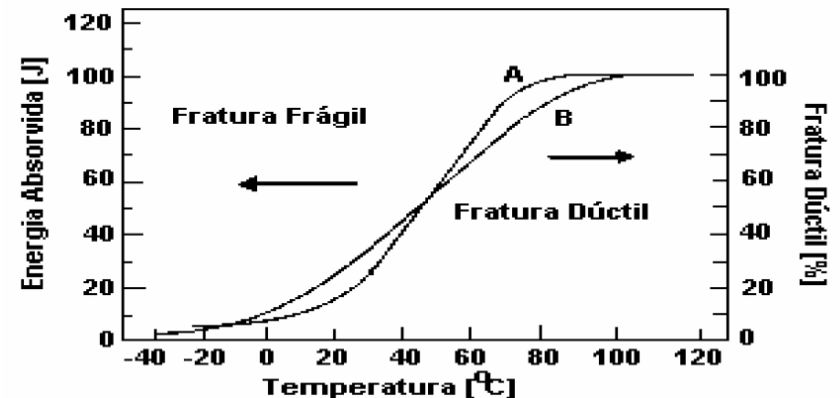
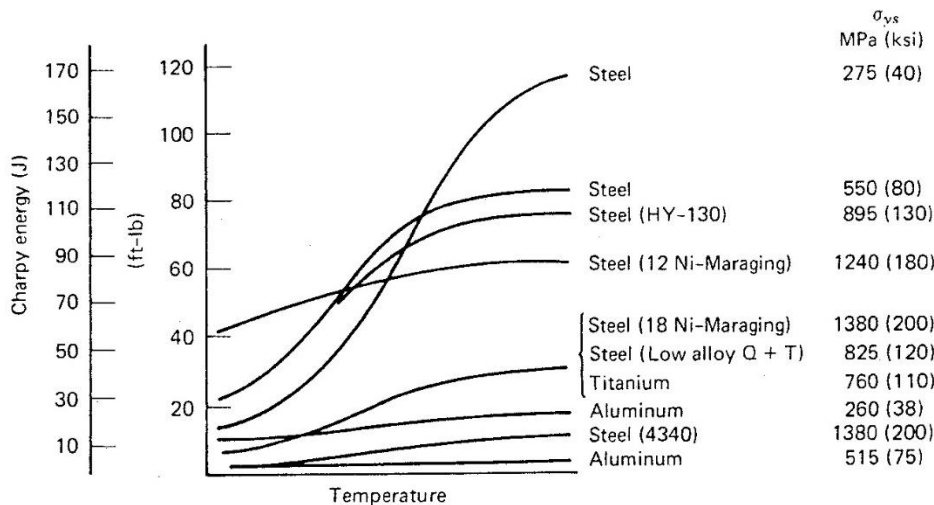


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

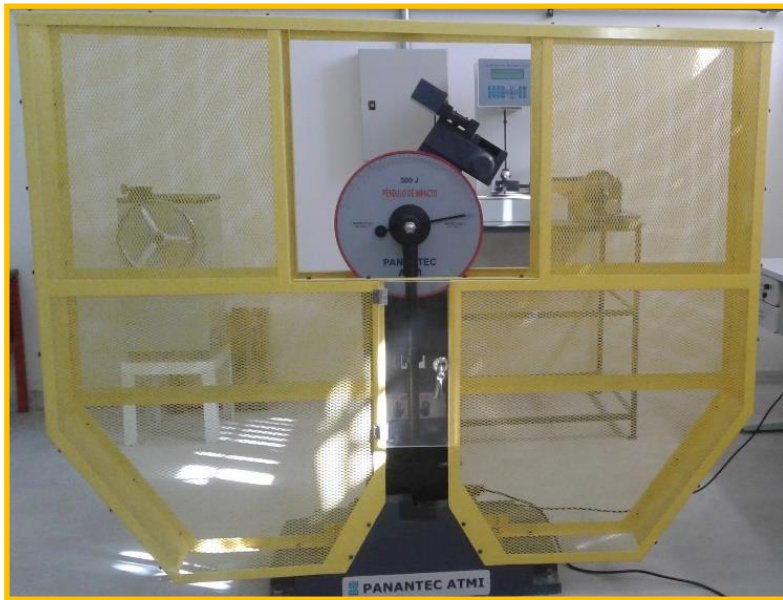
Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Resultados dos Ensaios de Impacto:

- Realizam-se ensaios a diferentes temperaturas.
- Avalia-se:
 - i) Energia Absorvida na Fratura;
 - ii) Aparência da Fratura;
 - iii) Deformação (expansão lateral ou contração da raiz do entalhe).
- A transição usualmente é gradual: Dificuldade de definir com precisão uma temperatura de transição dúctil-frágil. Critérios arbitrários.



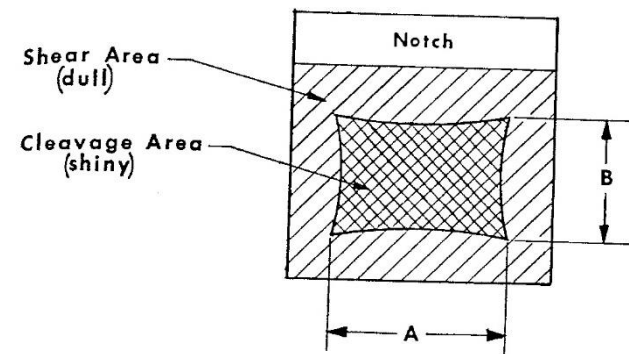
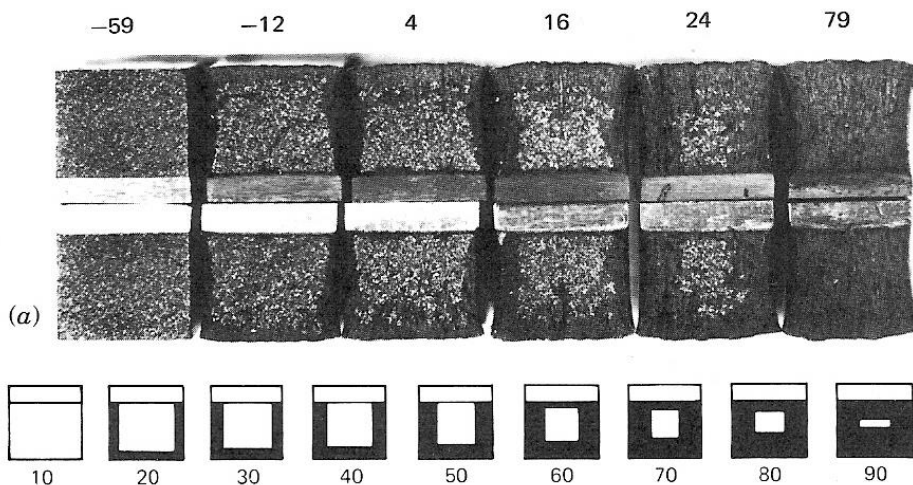
Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico



A baixa temperatura em si não causa dano permanente ao material.

A resistência ao impacto e a ductilidade são recuperadas com o aumento da temperatura.

No entanto, quanto maior a espessura, menor será a resistência à fratura frágil.



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

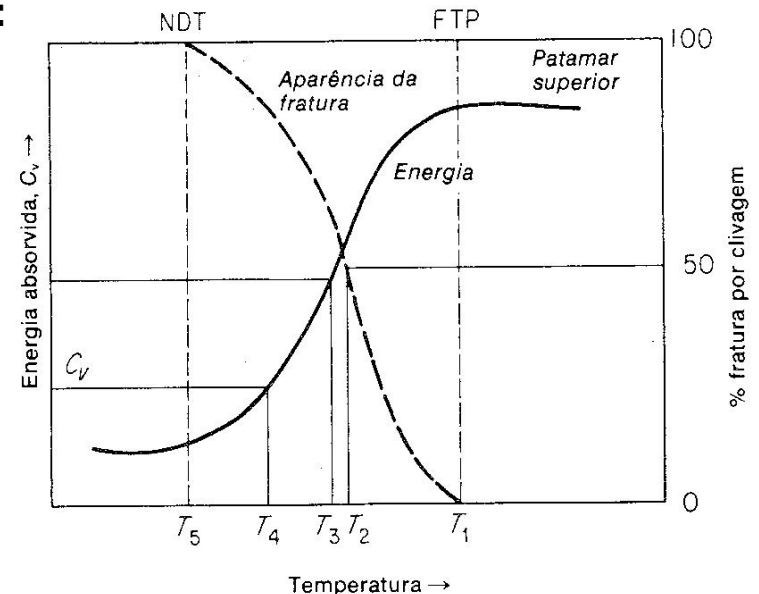
Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

CrITÉRIOS para determinação da transição frágil-dúctil:

- Critérios para determinar a Temperatura de Transição: NDT, FTP, 50%D-50%F, $(E_{\text{máx}} + E_{\text{mín}})/2$, E arbitrário (ex. 20 J).
- O desenvolvimento do critério “15-ft-lb” (20 J):

Análises feitas nos navios falhados:

- Amostras de aço foram coletadas de aproximadamente 100 navios fraturados e submetidas a análises, incluindo ensaios de impacto.
- As chapas foram classificadas em 3 grupos: Source, Through, End.
- Ensaios de impacto evidenciaram diferenças nos resultados para esses grupos, quanto à transição para fratura frágil.
- Análises estatísticas indicaram que as diferenças entre os grupos, no que diz respeito à temperatura de transição e à energia absorvida em determinada temperatura não foram por mero acaso.
- Uma constatação foi que somente 10% das amostras Source absorveu mais de 10-ft-lb no ensaio CVN à temperatura de fratura frágil, enquanto que 73% das amostras End absorveu mais que 10-ft-lb. Concluiu-se que uma fratura frágil não é esperada ocorrer na estrutura do casco de navios se as chapas absorvem mais que 10-ft-lb no ensaio CVN realizado no limite inferior da temperatura de operação.
- Por razões de segurança, estabeleceu-se um nível maior, ou seja, o valor de 15-ft-lb (20J) como critério para determinação da temperatura de transição em aços para construção naval.

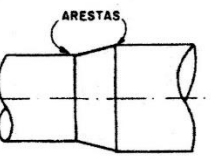
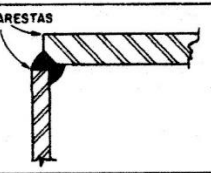
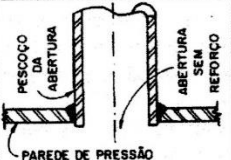
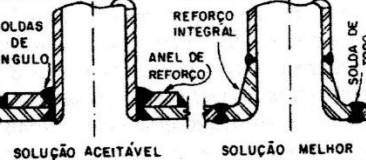
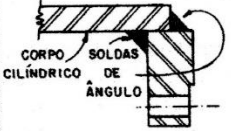
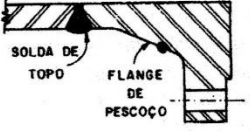


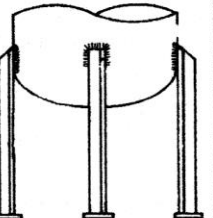
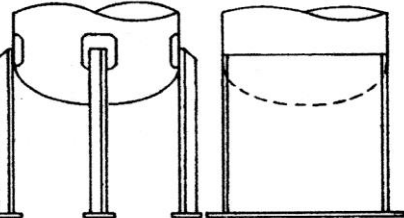
- T_1 - FTP
- T_2 - 50%D-50%F
- T_3 - $(E_{\text{máx}} + E_{\text{mín}})/2$
- T_4 - CV15
- T_5 - NDT



Efeitos da Temperatura no Comportamento Mecânico

Detalhes e cuidados de projeto e fabricação:

TIPO DE DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA	EXEMPLOS DE FORTES DESCONTINUIDADE	EXEMPLOS DE DESCONTINUIDADES ATENUADAS
MUDANÇA DE ESPESSURA	 MUDANÇA BRUSCA	 TRANSIÇÃO DE ESPESSURA
MUDANÇA DE FORMATO	 ARESTAS	 CURVAS DE CONCORDÂNCIA
CANTOS VIVOS	 ARESTAS	 ARREDONDADO
ÂNGULOS	 ÂNGULO VIVO	 ARREDONDAMENTO
ABERTURAS	 PESCOÇO DA ABERTURA ABERTURA SEM REFORÇO PAREDE DE PRESSÃO	 SOLDAS DE ÂNGULO REFORÇO INTEGRAL ANEL DE REFORÇO SOLDA DE TOPO SOLUÇÃO ACEITÁVEL SOLUÇÃO MELHOR
LIGAÇÃO FLANGE-CORPO CILÍNDRICO	 CORPO CILÍNDRICO SOLDAS DE ÂNGULO	 SOLDA DE TOPO FLANGE DE PESCOÇO

TIPO DE DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA	EXEMPLOS DE FORTES DESCONTINUIDADE	EXEMPLOS DE DESCONTINUIDADES ATENUADAS
SOLDAS DE TOPO	 DESALINHAMENTO	
CARGAS CONCENTRADAS	 SUPORTES EM COLONAS SEM REFORÇO	 CHAPAS DE REFORÇO COLONAS COM CHAPAS DE REFORÇO SUORTE CONTÍNUO DE CHAPA (SAIA) SOLUÇÃO ACEITÁVEL SOLUÇÃO MELHOR

FIM do Capítulo 1



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena