

TM373

Seleção de Materiais Metálicos

Seleção por propriedades mecânicas:
Solicitações estáticas

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

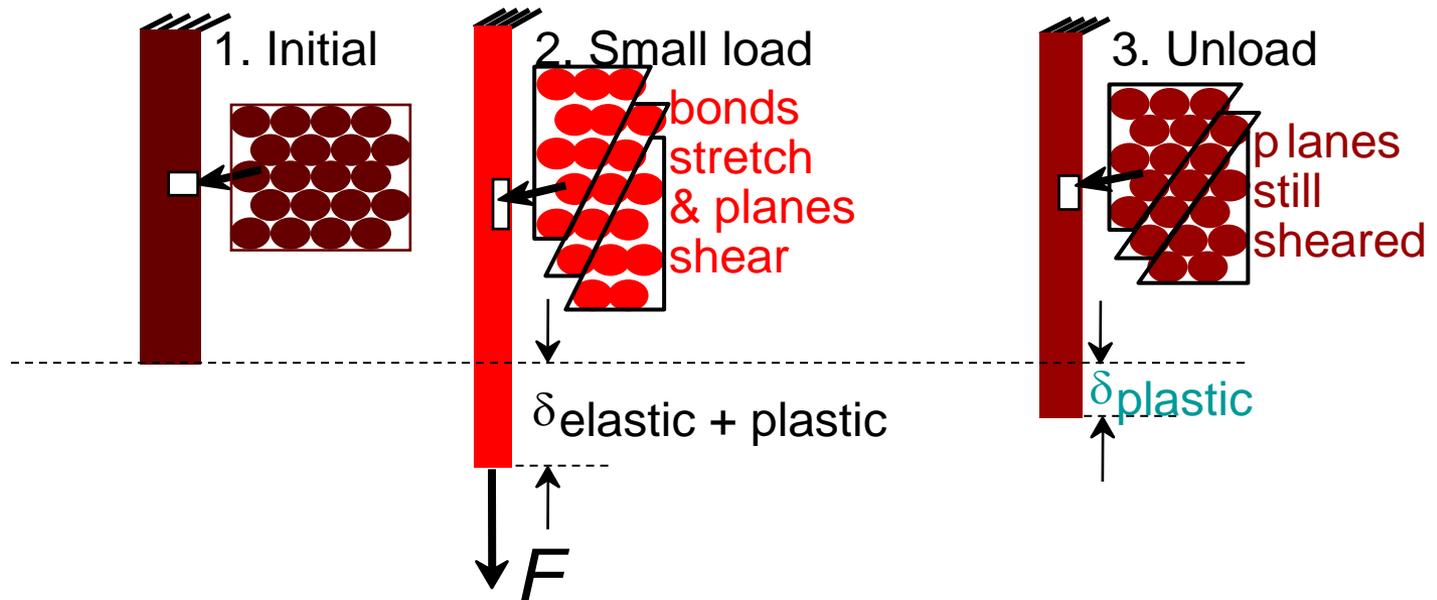
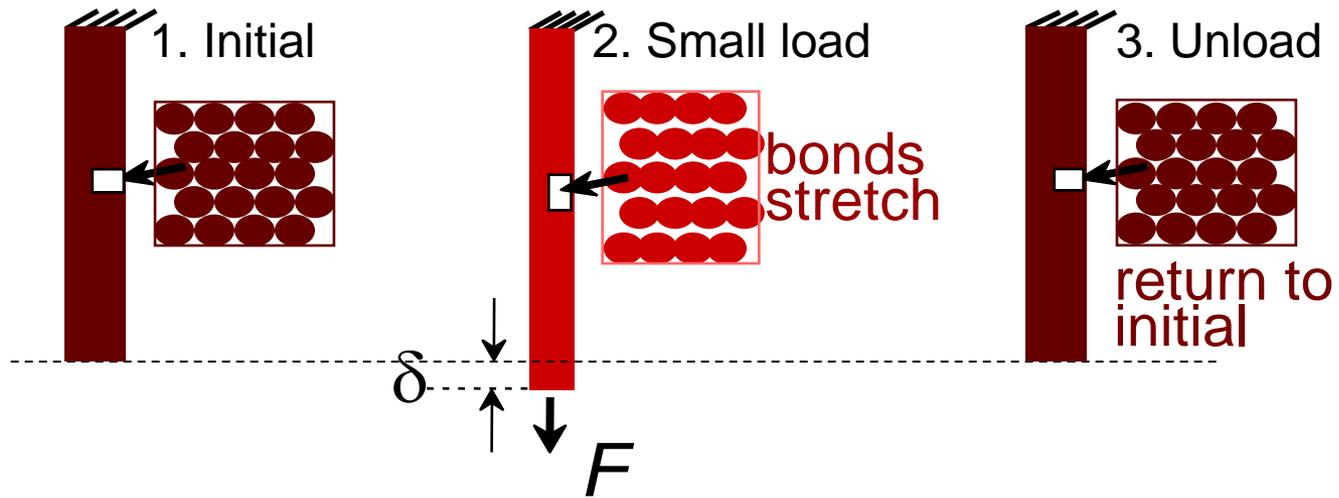


Favor desligar o celular ou passá-lo para o modo silencioso

Em caso de ligação favor não atender durante a aula

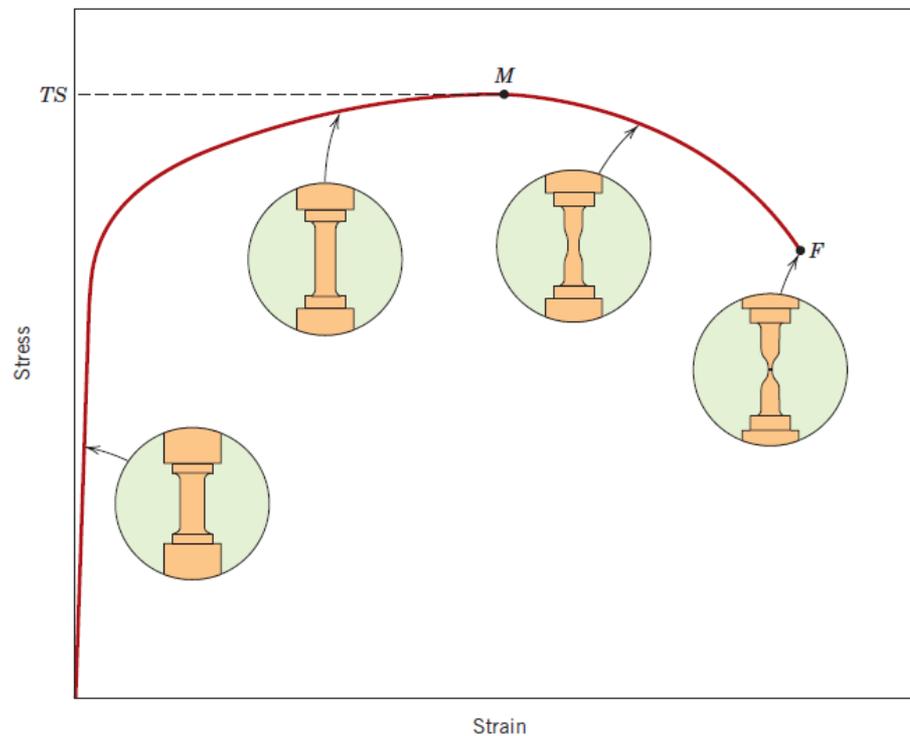
De introdução aos materiais:

- O que lembram de propriedade de materiais metálicos?
- Como são obtidas?
- E os não metálicos? Mesmo comportamentos? Mesmos mecanismos?



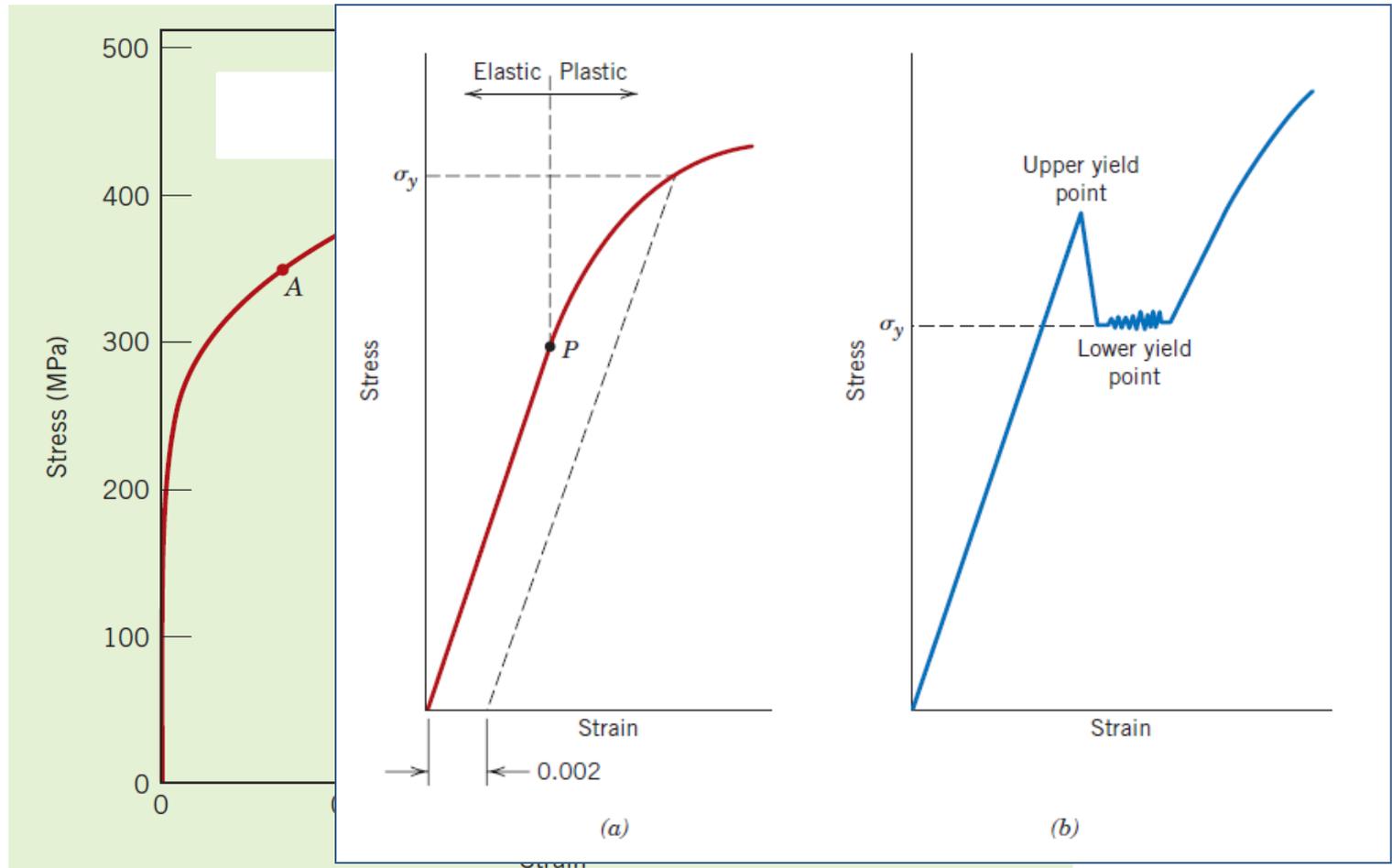
Ensaio de tração

- Comportamento do corpo de prova



Exercício

Extrair as propriedades do diagrama tensão deformação de um ensaio de tração



Introdução

O que se espera de um material?

- Resistência estática: habilidade de resistir a uma carga estável à temperatura ambiente
- Resistência à fadiga: Habilidade de resistir a uma carga flutuante
- Resistência à fluência: Habilidade de resistir a uma carga por longos períodos a uma temperatura suficientemente elevada para produzir deformação dependente do tempo

Introdução

Para entender corretamente a resistência de um material geralmente é necessário a determinação de uma curva tensão deformação (seja em tração, compressão ou cisalhamento) -> obtenção de parâmetros de resistência de acordo com o modo de falha relevante

Dada a facilidade de obtenção destas curvas em tração para metais, este tipo de dado é predominante (para cerâmicos e concreto -> compressão -> pq?)

Introdução

Em geral, para metais dúcteis as propriedades obtidas por ensaio de tração são similares às obtidas por ensaio de compressão. O que não é válido para outros materiais

Material	Resistência em tração (MPa)	Resistência em compressão (MPa)
Ferro fundido cinzento de baixa resistência	155	620
Ferro fundido cinzento de alta resistência	400	1200
Cimento Portland	4	40
Concreto	3	40
Madeira	100	27

Materiais frágeis são mais sensíveis a defeitos

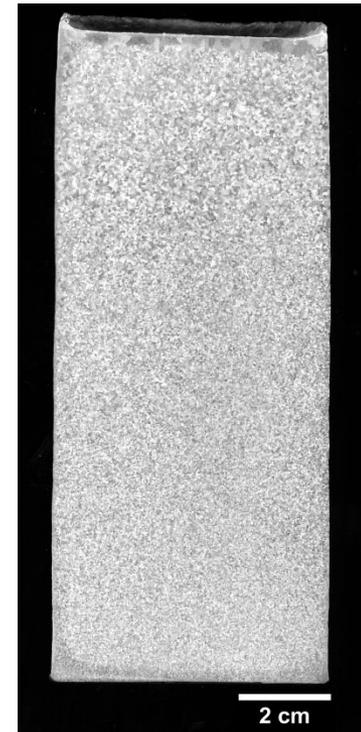
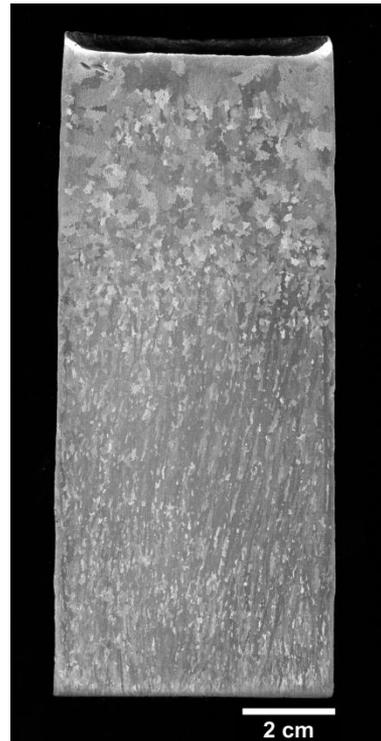
Flambagem e separação de fibras

Resistência de metais (aspectos gerais)

- A maioria dos metais de engenharia apresenta uma ductilidade significativa -> possibilidade de obtenção de curvas tensão x deformação no regime plástico
- A maioria dos metais de engenharia são cristalinos -> deformação por movimento de discordâncias
- As propriedades dependem das direções cristalográficas, mas a maioria dos metais de engenharia são policristalinos (grau de anisotropia dependentes do processo de fabricação – Ex: solidificação equiaxial x colunar, direção de laminação)

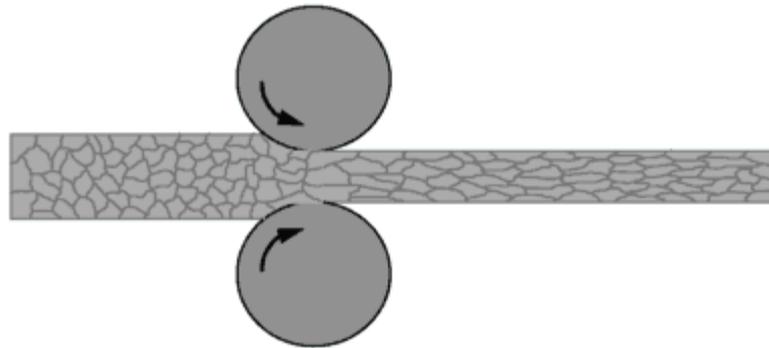
Resistência de metais (aspectos gerais)

- solidificação equiaxial x colunar



Resistência de metais (aspectos gerais)

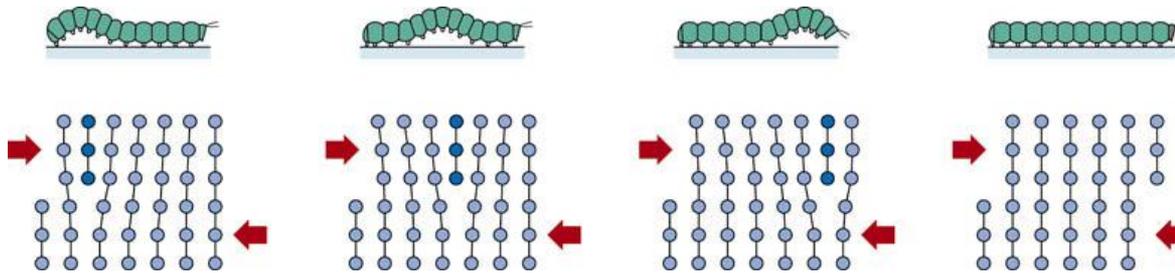
- Anisotropia também pode ser importante em laminados (atenção à direção de sollicitação)



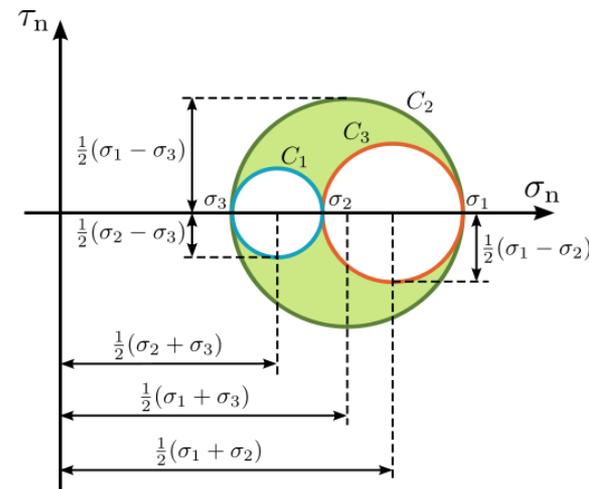
*Cold work being rolled
into copper alloy strip.*

Resistência de metais

- Obtenção da resistência de metais
 - Critério real para a resistência é a tensão de cisalhamento na direção dos planos cristalinos (sistema de escorregamento) -> mas não é útil para projeto

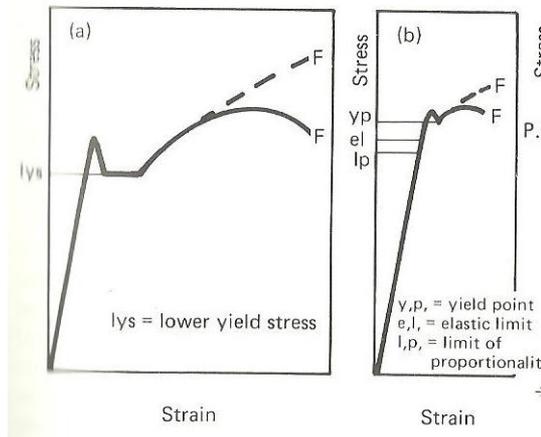


– Circulo de Mohr

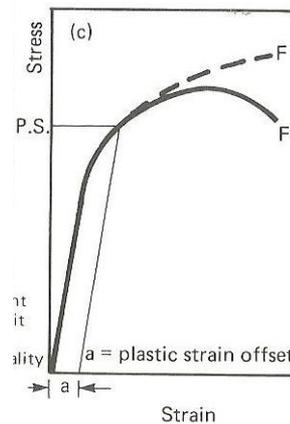


Resistência de metais

- Obtenção da resistência de metais
 - Curvas obtidas de ensaios de corpos de prova policristalinos. Formas típicas:



Materiais com descontinuidade de escoamento (patamar de escoamento)



Materiais com escoamento contínuo



Materiais frágeis

Tensão limite de resistência nunca deve ser atingida mas é fornecida em tabelas (útil para materiais frágeis)

Resistência de metais

- Classificação em Nível de resistência: Pode ser visto em termos absolutos ou relativos (ex: aço x Al -> 500MPa).
- Definição absoluta dos níveis de resistência:
 - Baixa resistência ($\sigma_e < 250$ MPa)
 - Média resistência ($250 \text{ MPa} < \sigma_e < 750$ MPa)
 - Alta resistência ($750 \text{ MPa} < \sigma_e < 1500$ MPa)
 - Ultra-alta resistência ($\sigma_e > 1500$ MPa)

Resistência de metais

- Materiais de baixa resistência ($\sigma_e < 250$ MPa)
 - Maioria dos metais recozidos
 - Depende da pureza Ex: Al 99,0% -> 37MPa, Al 99,99% -> 12MPa
 - Dependente do processo Ex: Mg laminado -> 100MPa, Mg fundido em areia -> 5x menos
 - São materiais “simples” -> baratos e fácil de processar -> os mais usados são os aços carbono -> fácil de usar e conformar e barato.
 - Desvantagem dos aços ao carbono: sofrem corrosão -> muitas vezes precisam de tratamento adicional elevando o custo e reduzindo sua competitividade frente, por ex., ao Al (ex: embalagem, ambiente marinho)

Resistência de metais

- Aumento de resistência geralmente traz redução de:
 - Conformabilidade: importante por ex. para estampagem profunda ou dobramento -> necessidade de materiais desenvolvidos especialmente para este fim com controle de anisotropia e baixo nível de inclusões

Resistência de metais

- Aumento de resistência geralmente traz redução de:
 - Usinabilidade: Maior resistência tende a reduzir a usinabilidade
 - Aços de elevada usinabilidade -> adição de chumbo e enxofre (resulfurados - MnS)
 - Perda de resistência e tenacidade -> tolerada pelo ganho de produtividade

Resistência de metais

- E quando se necessita resistência ao desgaste:
 - Comando de válvulas, tuchos e engrenagens são exemplos de peças geralmente com baixa solicitação onde a superfície é sujeita ao desgaste -> utiliza-se aços de baixa resistência com tratamento superficial
 - Tratamentos termoquímicos
 - Tratamento térmico superficial
 - Deposição por solda
 - Deposição de filmes
 - Etc...

Resistência de metais

- Condutividade elétrica (Ag, Cu e Al – melhores condutores):
 - Al pode ser endurecido por precipitação obtendo 140 MPa ($3,2\mu\Omega\text{cm}$ x $2,8\mu\Omega\text{cm}$ do Al puro comercial)
 - Possibilidade de usar cabos de Al com alma de aço -> escolha das linhas de alta tensão britânicas (solução de projeto, não de material).



Resistência de metais

- Materiais de Média resistência (σ_e 250-750MPa) -> Maioria dos materiais de tecnologia moderada.
 - Somente o titânio entra nesta classe em seu estado puro e recozido
 - Ligas de Al endurecíveis por precipitação são materiais bem conhecidos desta classe (2xxx e 7xxx)
 - Ligas de Cobre trabalhadas a frio e endurecíveis por precipitação também

Resistência de metais

- Materiais de Média resistência (σ_e 250-750MPa)
 - Uma variedade enorme de aços está nesta classe
 - Os de mais baixa resistência -> aços com controle de tamanho de grão (normalização ou laminação controlada)
 - Os de mais elevada resistência -> aços tratados termicamente (tempera e revenido)
 - Entre 500 e 750 MPa estão a maioria dos aços usados na indústria automotiva (indo do 0,4%C-Mn até aços baixa liga) -> temperados e revenidos -> custo (liga, tratamento, controle de qualidade, etc..)

Resistência de metais

- Materiais de Média resistência (σ_e 250-750MPa)
 - Uma variedade enorme de aços está nesta classe
 - Se resistência a corrosão ou oxidação for importante -> aços inoxidáveis
 - Austeníticos (200MPa até 600MPa se trabalhado a frio)
 - Martensíticos (temperados e revenidos) 400MPa para 0,1%C e 650MPa para 0,25%C (menor teor de carbono garante maior tenacidade e resistência à corrosão)

Resistência de metais

- Materiais de Alta resistência (σ_e 750-1500MPa): elevada tecnologia e baixa produção
 - Entre os não ferrosos somente ligas de Ti et Cu-Be entram nessa classe
 - Até 1000MPa os aços mais comuns são os baixa liga e médio carbono, temperados e revenidos (ex: AISI4340) -> peça de elevado carregamento -> molas, comes, engrenagens e outros componentes da transmissão de caminhões
 - Necessidade de carbono \sim 0,4% traz problemas de soldabilidade

Resistência de metais

- Materiais de Alta resistência (σ_e 750-1500MPa): elevada tecnologia e baixa produção
 - Para resistência entre 1000 e 1500MPa -> normalmente utiliza-se aços endurecíveis por precipitação (Inoxidáveis PH) -> válvulas, bombas, parafusos...
 - Maioria das ligas de titânio estão nesta classe, mas o máximo limite de escoamento das ligas de Ti é de ~1250MPa (aços podem superar ligas de Ti em tensão limite de escoamento).

Resistência de metais

- Materiais de Ultra-alta resistência ($\sigma_e > 1500\text{MPa}$)
 - Usados em trem de pouso de aviões (ex: 300M)
 - Para garantir confiabilidade (principalmente em fadiga e tenacidade) o processamento é muito controlado (consequentemente caro)
 - Extremamente difíceis de usinar após tratamento térmico -> sempre necessário acabamento (Maraging – permite tratamento térmico após peça finalizada -> envelhecimento a $\sim 480^\circ\text{C}$) -> baixo custo de usinagem e elevado custo do Ni

Resistência de metais

- Materiais de Ultra-alta resistência ($\sigma_e > 1500\text{MPa}$)
 - Propriedade de aços Maraging

	σ_e (Mpa)	K_{IC} (MPam ^{1/2})
18Ni-8,5Co-3Mo-Al-Ti	1400	110-176
18Ni-8Co-5Mo-Al-Ti	1700	100-165
18,5%Ni-9Co-5Mo-Al-Ti	1900	90-100

- Curiosidade : Cordas de instrumentos musicais estão entre os materiais mais resistente (Aço alto carbono com resistência normalmente 1600-1800MPa) – Perlita fina ou bainita (patenteado e trefilado)

Outros materiais (aspectos gerais)

- Polímeros: mecanismo distintos dos metais
 - Propriedades fortemente dependentes da temperatura
 - Propriedades dependentes do tempo
 - Baixa resistência, mas relação resistência densidade interessante
 - Pode depender do ambiente (ex. umidade)
- Compósitos
 - Aliar propriedade de materiais diferentes, ex:
 - Polímero reforçado com fibra
 - Metal duro

Critérios de seleção para carregamento estático

- A capacidade de suportar carga de um componente aumenta com sua secção -> nem sempre se necessita de um material de elevada resistência (ex: Estrutura de um prédio)
- Razões para aplicar materiais de elevada resistência:
 - Reduzir **volume (estoque e miniaturização)**
 - Reduzir **peso (transporte)**
 - Reduzir **custo**

Critérios de seleção para carregamento estático

- Eficiência estrutural – índice de mérito (carga/peso)

– Ex: componente sob tração (se L fixo) → Minimiza peso

$$\frac{\text{Carga}}{\text{Peso}} = \frac{P}{LA\rho} = \frac{\sigma_{DS} A}{AL\rho} = \frac{\sigma_e}{\rho} \frac{1}{nL}$$

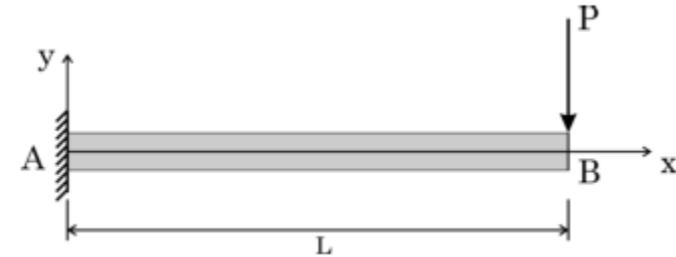
– Se o custo por unidade de massa é C_R o custo será

$$C_R \frac{\rho}{\sigma_e} \rightarrow \text{Minimiza custo}$$

- Relação varia para carregamentos mais complexos

Critérios de seleção para carregamento estático

$$\frac{\text{Carga}}{\text{Peso}} = \frac{P}{LA\rho} = \frac{\sigma b h^2}{6bhL^2\rho} = \frac{\sigma h}{\rho} \frac{1}{6L^2}$$



$$\sigma_x = \frac{My}{I} = \frac{PLy}{bh^3/12}$$

Momento de inércia

$$\sigma_{\max} = \frac{PL}{bh^2/6}$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\sigma b h^2}{6L} \\ h &= \sqrt{\frac{6PL}{\sigma b}} \end{aligned} \right\}$$

Manter b constante variar somente h

$$\frac{\text{Carga}}{\text{Peso}} = \left(\frac{1}{6b} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{\sigma}}{\rho} \left(\frac{P}{L^3} \right)^{1/2}$$

E se mantiver h constante variar somente b



Critérios de seleção para carregamento estático

- Fazendo o mesmo exercício para uma viga de seção quadrada ($b \times h$) e comprimento L em flexão o critério será:

$$\frac{\sqrt{\sigma_e}}{\rho}$$

Modo de Carregamento	Forma	Índice de Mérito	
		Rigidez	Resistência
Flexão	Barra, Tubo	$E^{1/2} / \rho$	$\sigma^{2/3} / \rho$
	Chapa	$E^{1/3} / \rho$	$\sigma^{1/2} / \rho$
Tração	Barra	E / ρ	σ / ρ
Flambagem	Coluna, tubo	$E^{1/2} / \rho$	-
	Chapa	$E^{1/3} / \rho$	-
Torção	Barra, Tubo	G / ρ	σ / ρ
Pressão interna	Vaso de pressão cilíndrico	E / ρ	σ / ρ
	Vaso de pressão esférico	$E / (1 - \nu)$	σ / ρ

Índices de mérito
equivalente →

Representado por uma reta
no mapa de propriedades

$$\frac{\sigma_e}{\rho} = cte$$

$$\sigma_e = \rho \times cte$$

$$\log \sigma_e = \log(\rho \times cte)$$

$$\log \sigma_e = \log(cte) + \log(\rho)$$

$$y = a + bx$$

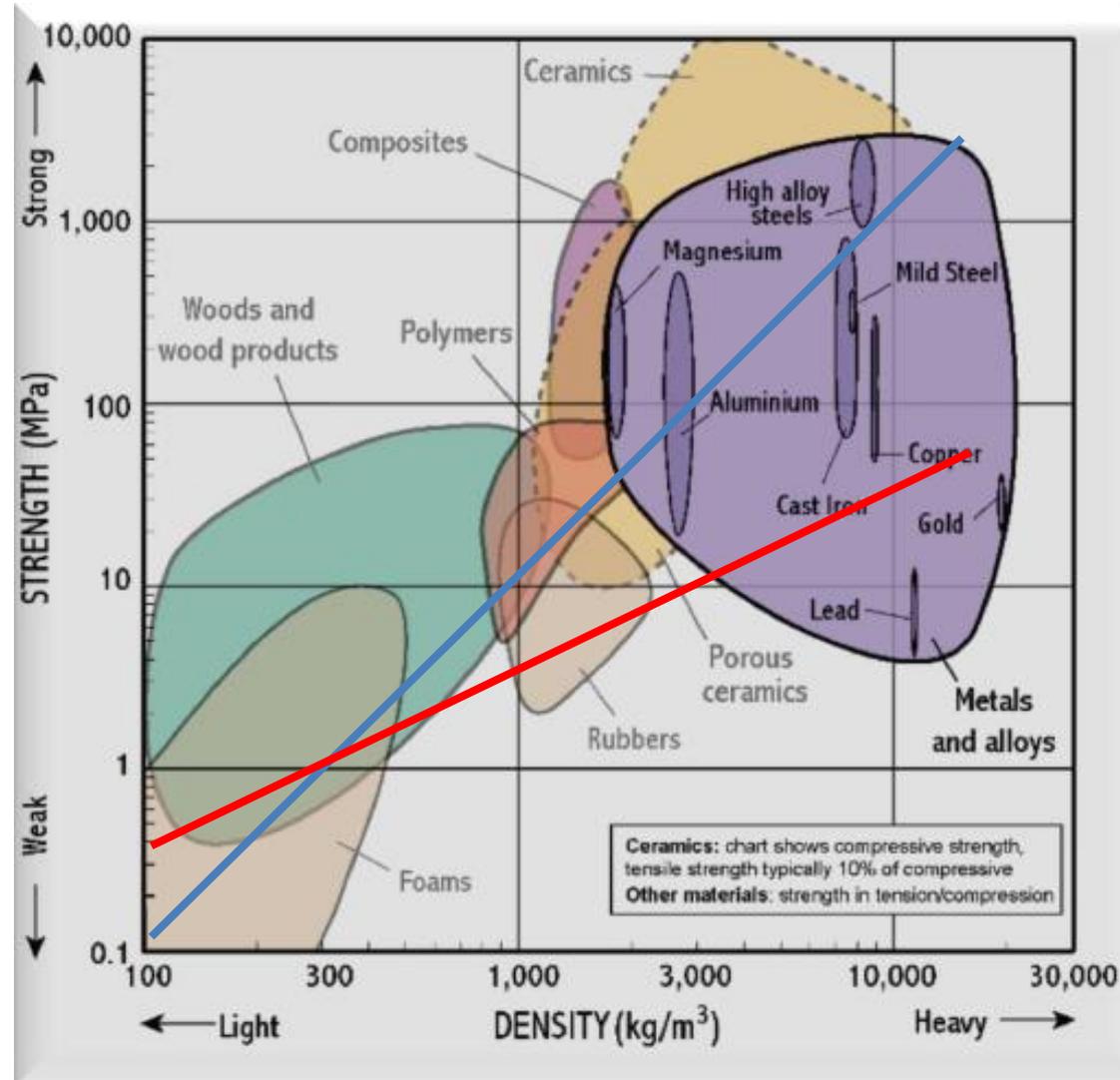
$$\frac{\sqrt{\sigma_e}}{\rho} = cte$$

$$\sqrt{\sigma_e} = \rho \times cte$$

$$\log \sqrt{\sigma_e} = \log(\rho \times cte)$$

$$\frac{1}{2} \log \sigma_e = \log(cte) + \log(\rho)$$

Mapa de propriedades



É importante lembrar

- Conseqüências do aumento de resistência mecânica nas demais propriedades do material e em sua facilidade de produção
- Utilização de índices de mérito para escolha de materiais
- Utilização de mapas de propriedades