



Materiais para a Indústria Química

Prof. Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

Seleção de Materiais



Materiais para a Indústria Química

**QUAL A NECESSIDADE DA SELEÇÃO DE
MATERIAIS?**

- **DIVERSOS DISPOSITIVOS E PEÇAS SOFREM DIFERENTES SOLICITAÇÕES E NECESSITAM SER FABRICADOS COM DIFERENTES MATERIAIS;**
- **PARA PROJETAR UMA PEÇA E /OU DISPOSITIVO É NECESSÁRIO SELECIONAR O MATERIAL;**
- **A SELEÇÃO SERVE TANTO PARA COMPRAR UM MATERIAL PARA FABRICAÇÃO, BEM COMO PARA APROVEITAMENTO DE MATERIAIS DE ESTOQUE;**
- **MESMO PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E NOVOS MATERIAIS TAMBÉM ENVOLVE: SELEÇÃO!!!**



- **PLATAFORMA É UM EXEMPLO DE UM EQUIPAMENTO COM DIVERSOS TIPOS DE DISPOSITIVOS E MECANISMOS FABRICADOS COM DIFERENTES MATERIAIS!**

SELEÇÃO DE INSUMOS PARA TINTAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: RESINAS, POLÍMEROS, ETC

31/1/2014

Tintas: Consumo de imobiliárias cresce puxado por reformas de fim de ano - QUÍMICA.com.br - O Portal da Revista Química e Derivados





DIFERENTES MATERIAIS SÃO UTILIZADOS EM UM MESMO EQUIPAMENTO, CADA UM COM UMA PROPRIEDADE ESPECÍFICA: SELEÇÃO!





Empilhadora/recuperadora de minérios- Stacker/Reclaimer



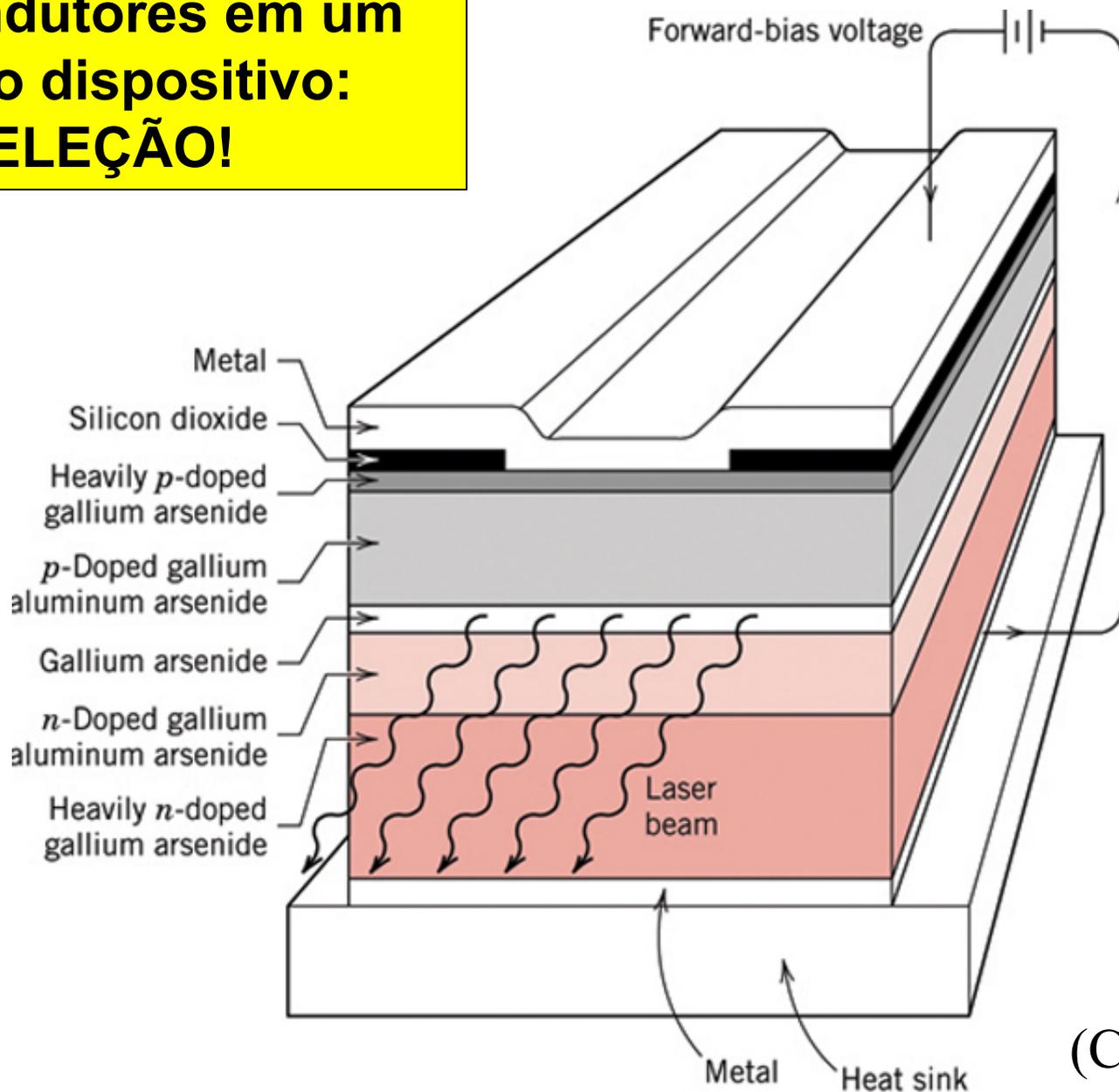


**Alguns reatores químicos e/ou petroquímicos:
Parte interna e externa com diferentes materiais-
SELEÇÃO!**



Diferentes
semicondutores em um
mesmo dispositivo:
SELEÇÃO!

Seleção de Materiais



(Callister)

Seleção de vários materiais: trilhos de metrô!

6 As estações do metrô recebem a energia em grandes troncos de 22 mil volts de tensão. Nas **salas de média tensão**, essa matriz passa por transformadores que baixam a tensão para 750 V, 460 V, 220 V ou 110 V, cada uma distribuída de acordo com os equipamentos em uso, do próprio trem às lâmpadas

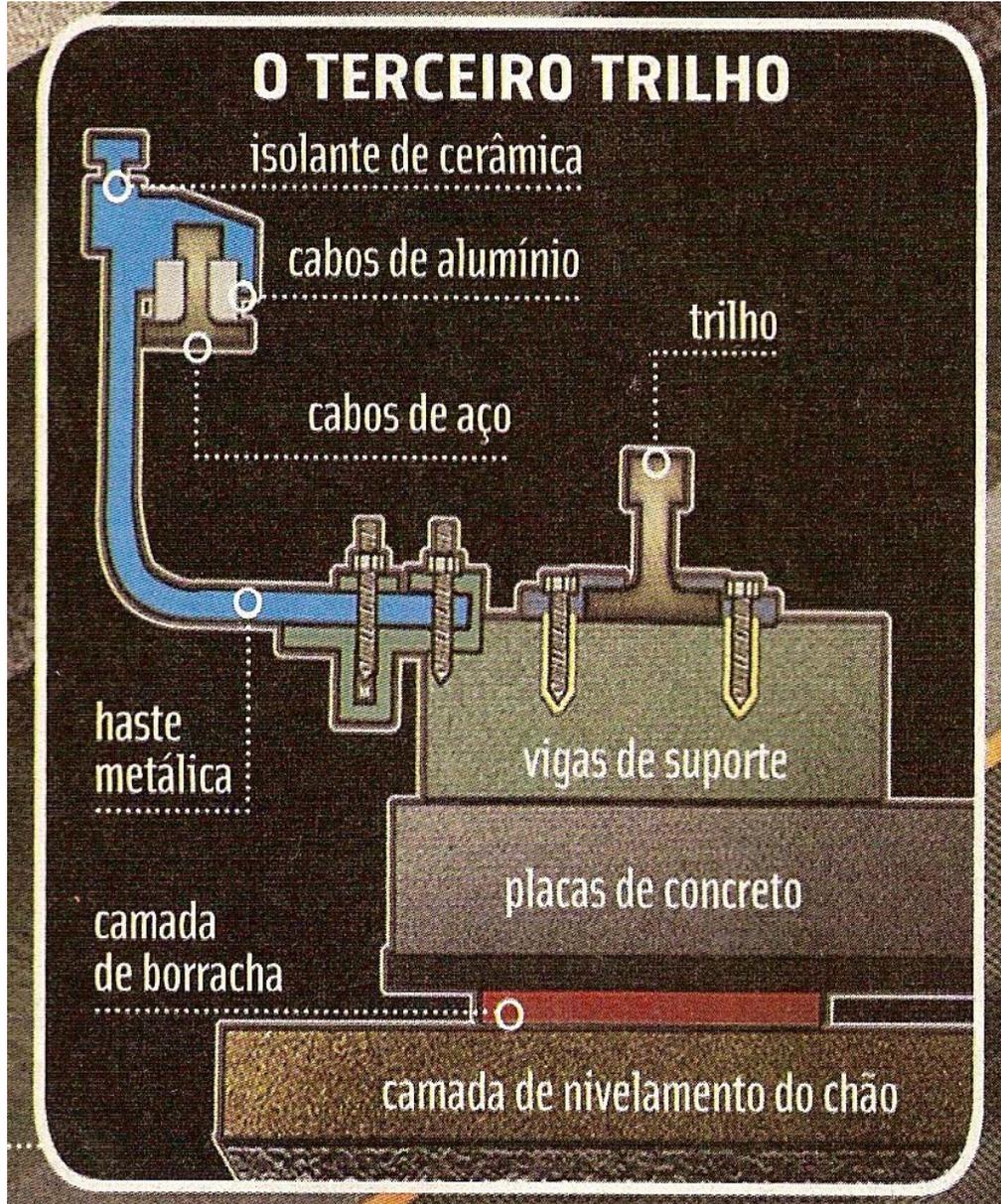
7 O metrô está pronto para rodar! Cada **vagão** tem coletor de energia, rodas e motores independentes. Quase sempre comandados por computadores, os trens têm sempre um operador na cabine para intervir em emergências

8 Sabe como o metrô vai parar nos trilhos? O mais comum é cada vagão vir de **carreta**, trazido em contêineres especiais com trilhos. Em seguida, a carreta que traz o vagão se abaixa para nivelar a altura dele com a dos trilhos de uma rampa no pátio de manobras

4 Energizado com uma tensão de 750 volts ao longo de toda a via do metrô, o **terceiro trilho** abastece os trens de energia. Esse trilho é feito de alumínio (condutor capaz de levar energia sem quedas de tensão) e aço, que dá firmeza no contato com a sapata, a peça de aço que leva energia ao trem.

5 A estrutura de uma estação é parecida com a de uma casa. Mas aqui alguns itens merecem atenção especial, como o piso. Nas plataformas usa-se o **granito**, rocha resistente que serve como isolante elétrico. Já nas salas de média e alta-tensão, restritas aos funcionários, usa-se **paviflex**, um plástico ainda mais eficiente como isolante

O TERCEIRO TRILHO
 isolante de cerâmica
 cabos de alumínio
 cabos de aço
 haste metálica
 trilho
 vigas de suporte
 placas de concreto
 camada de borracha
 camada de nivelamento do chão





Seleção de Materiais

⇒ ***Fatores Técnicos:***

- ✓ Propriedades mecânicas;
- ✓ Propriedades térmicas e elétricas;
- ✓ Propriedades químicas;
- ✓ Segurança;
- ✓ Meio ambiente.

⇒ ***Fatores Econômicos:***

- ✓ Custo;
- ✓ Qualidade de fornecimento;
- ✓ Disponibilidade.



Seleção de Materiais

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS: QUAL
A ORIGEM?**

AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS TÊM SUA ORIGEM NA LIGAÇÃO ENTRE OS ÁTOMOS

Quanto à energia envolvida na ligação elas podem ser divididas em:

- **Fortes : covalente, iônica e metálica;**
- **Fracas: Van der Waals e pontes de hidrogênio.**



Seleção de Materiais- ligação - Propriedades

Tipos de ligação química

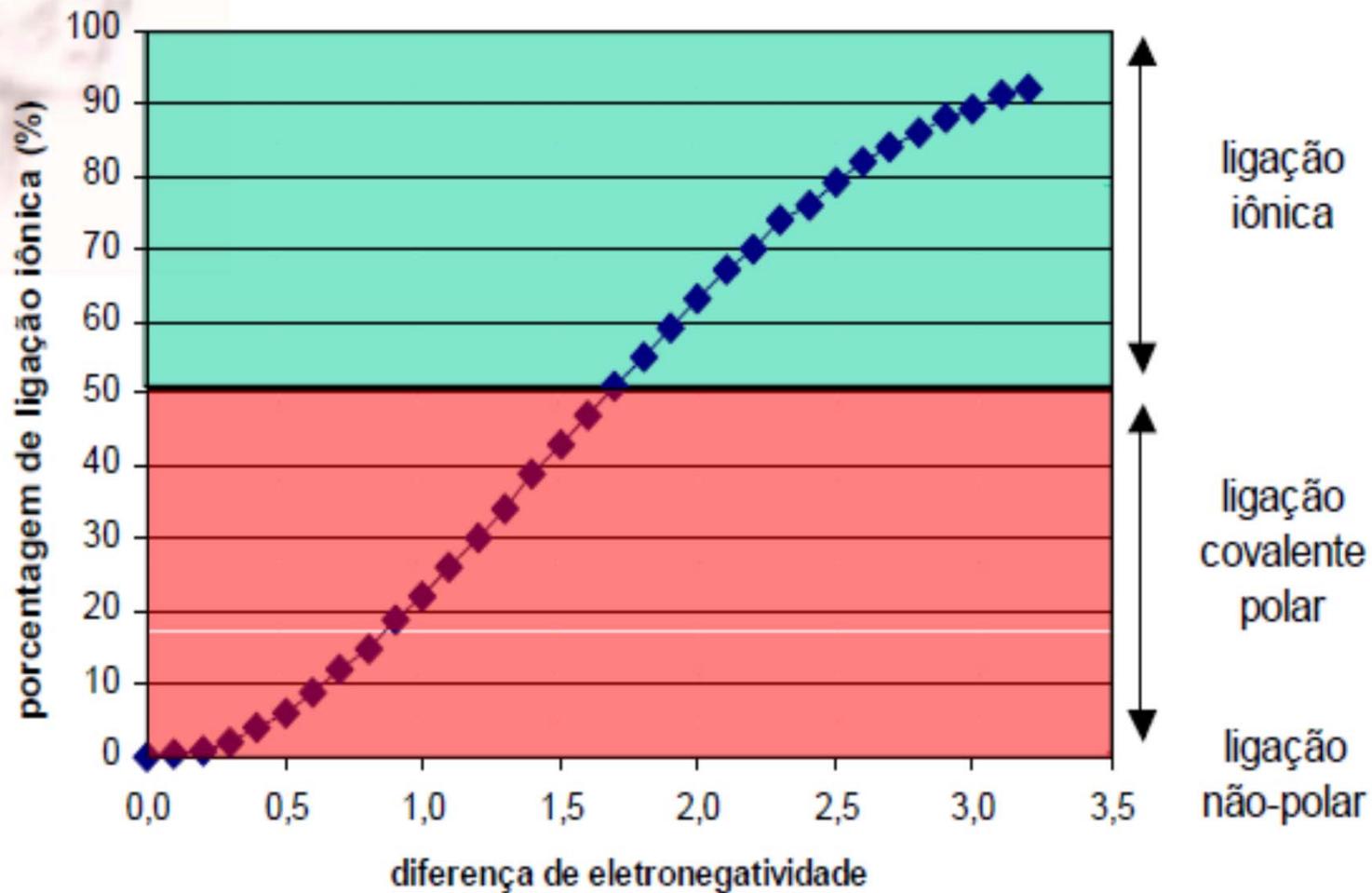
- Elementos eletronegativos: facilidade em receber elétrons.
- Elementos eletropositivos: facilidade em doar elétrons.

ELEMENTO ELETROPOSITIVO + ELEMENTO ELETRONEGATIVO	LIGAÇÃO IÔNICA
ELEMENTO ELETROPOSITIVO + ELEMENTO ELETROPOSITIVO	LIGAÇÃO METÁLICA
ELEMENTO ELETRONEGATIVO + ELEMENTO ELETRONEGATIVO	LIGAÇÃO COVALENTE

Seleção de Materiais- ligação - Propriedades

- Os tipos de ligação química são determinados pela diferença de eletronegatividade.

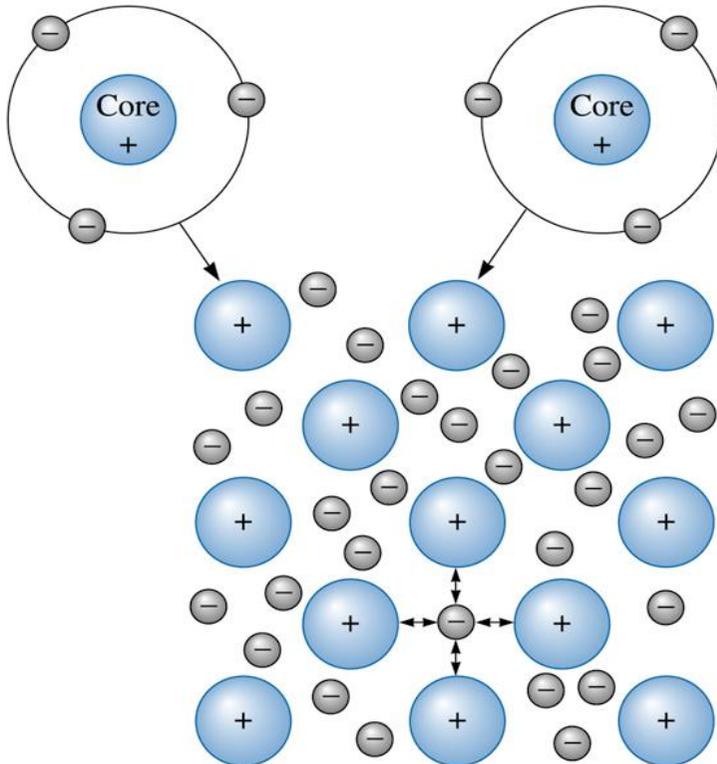
Maiores dif. eletronegatividade - maior % lig. iônica



i) LIGAÇÃO METÁLICA

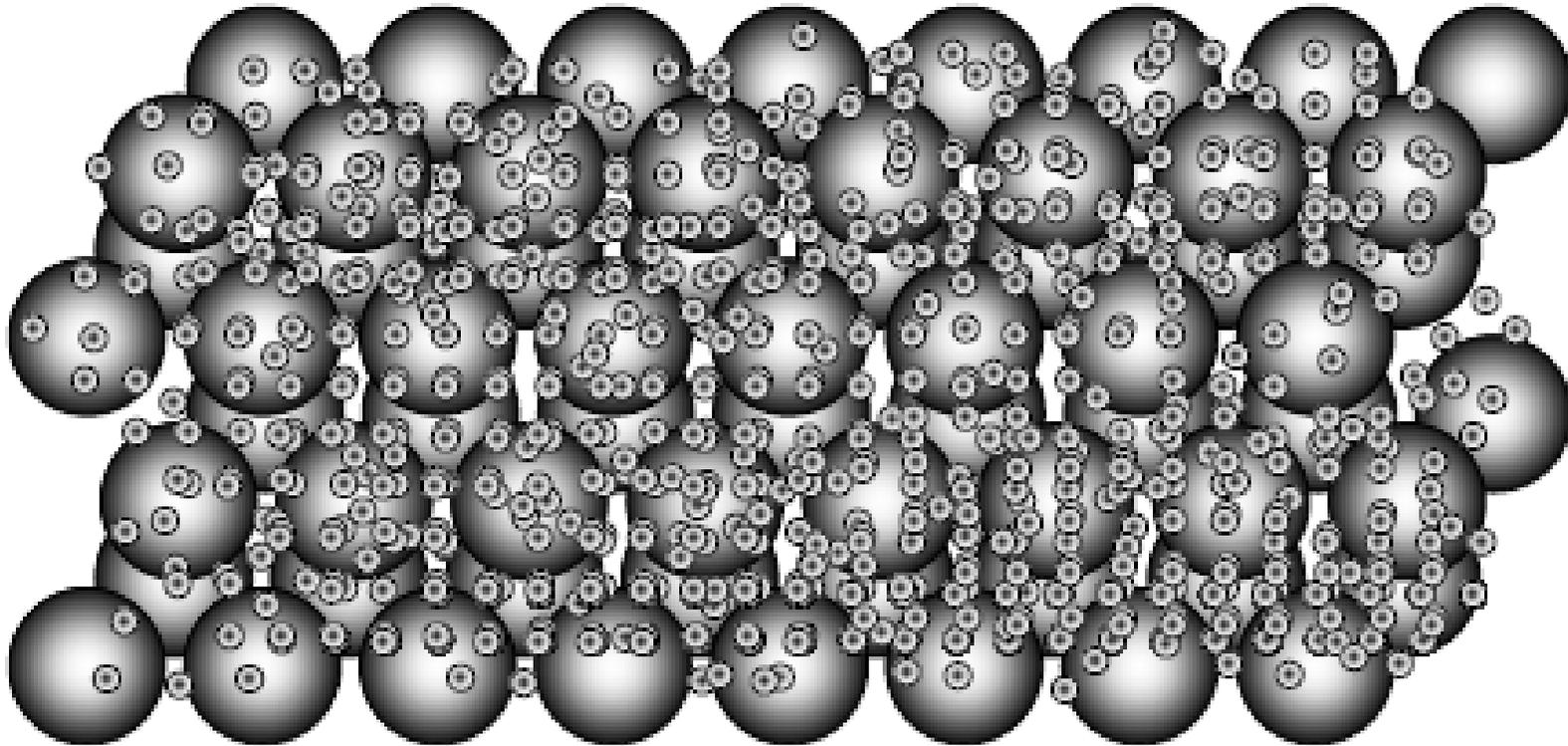
- ÁTOMOS MANTIDOS UNIDOS E COESOS PELA ATRAÇÃO MÚTUA ENTRE NÚCLEOS POSITIVOS E NÚVEM ELÉTRONS NEGATIVOS
- ELÉTRONS LIVRE \Rightarrow ÓTIMAS CONDUTIVIDADES ELÉTRICA E TÉRMICA

© 2003 Brooks/Cole Publishing / Thomson Learning™



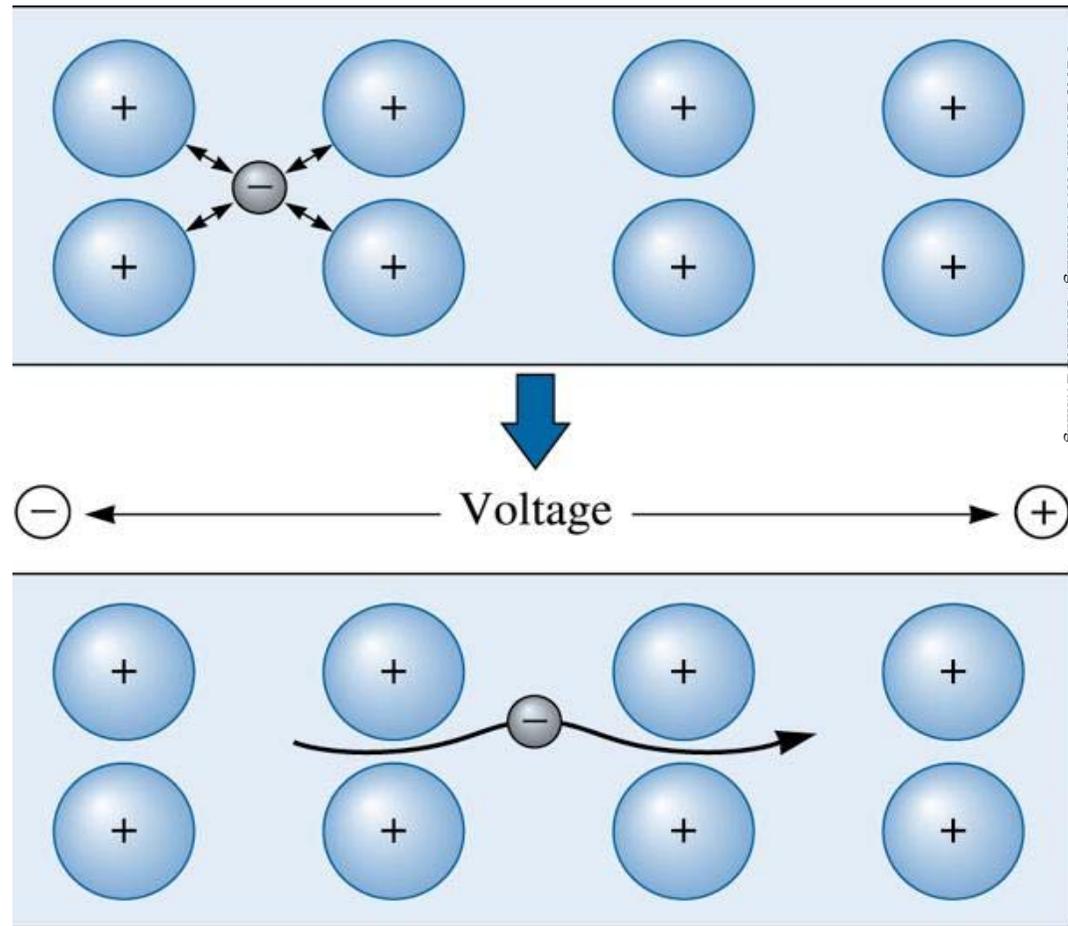
As ligações metálicas se formam quando os átomos cedem os seus eletrons de valência para estes formarem uma nuvem de eletrons que é compartilhada por todos os átomos da ligação. A carga positiva dos centros

Ligação metálica: não direcional



Ligações metálicas (nuvem de elétrons) encontradas nos metais.

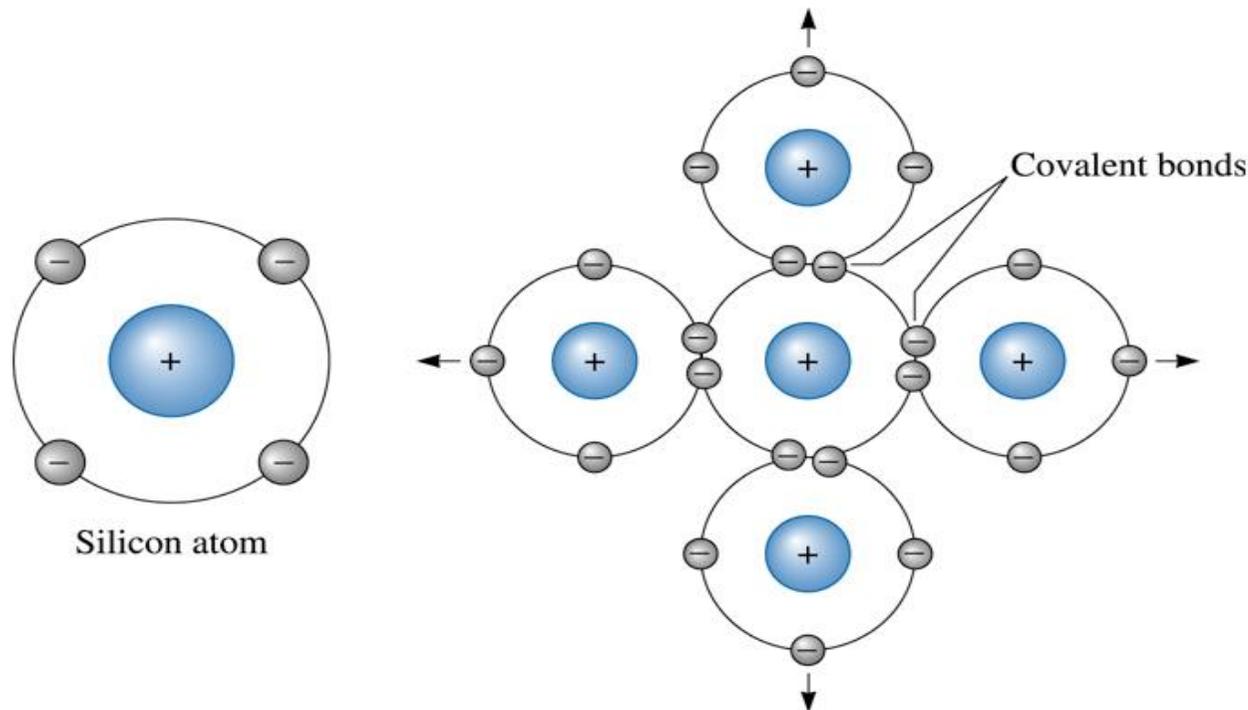
i) LIGAÇÃO METÁLICA



Quando uma voltagem é aplicada ao metal, os elétrons da nuvem comum aos átomos podem mover-se facilmente e criar uma corrente.

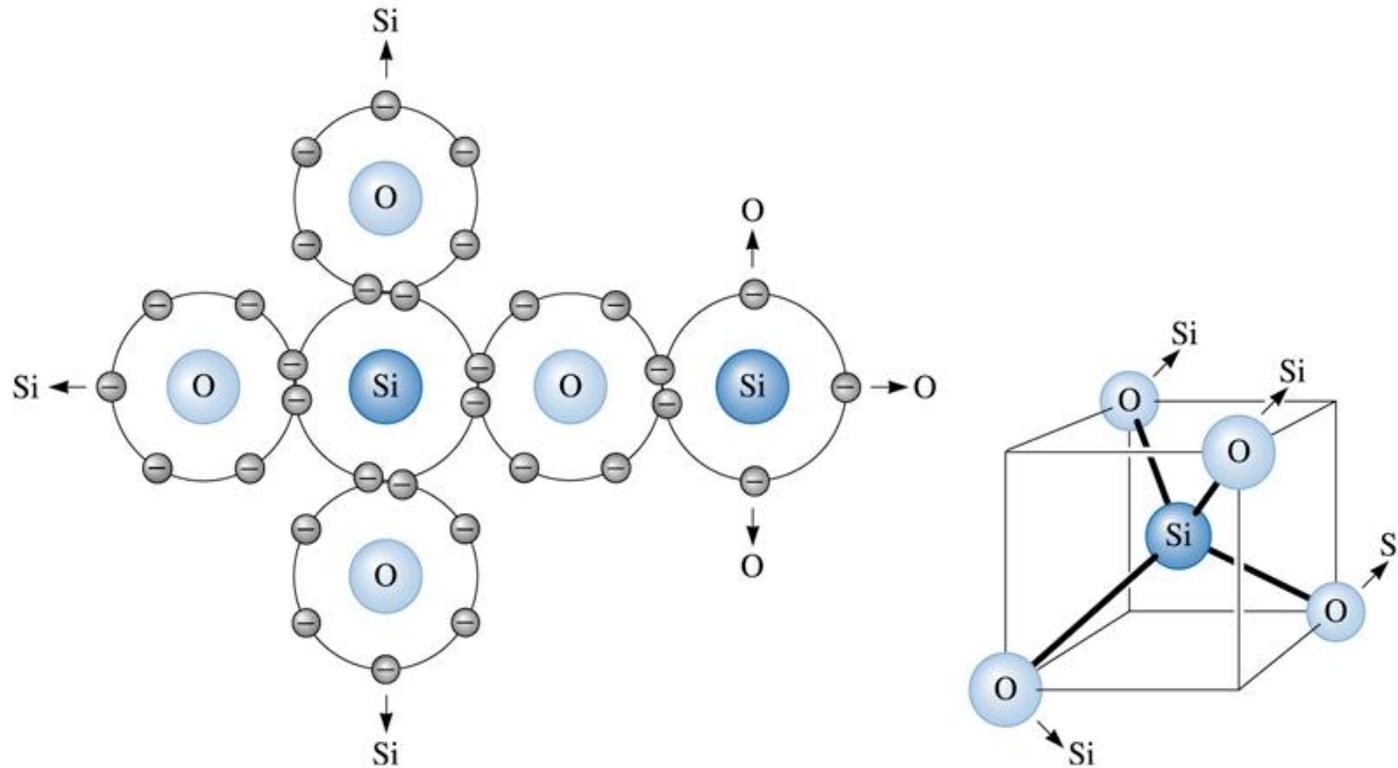
ii) LIGAÇÃO COVALENTE

- ESTABILIDADE SÃO ADQUIRIDAS APOS COMPARTILHAMENTO ENTRE ELÉTRON DE ATOMOS ADJACENTE (8 ELETRONS DE VALENCIA=ESTABILIDADE)
- LIGAÇÃO ALTAMENTE DIRECIONAL E RÍGIDA \Rightarrow FRAGILIDADE DOS CERÂMICOS E POLÍMEROS TERMO-RÍGIDOS
- CONDUTIVIDADES ELÉTRICA E TÉRMICA POBRES \Rightarrow QUEBRA DAS FORTES LIGAÇÕES COVALENTES PARA LIBERAÇÃO DE ELÉTRONS
- PODEM SER MUITO FORTES COMO O DIAMANTE (ALTO PONTO FUSÃO 3550 °C, DURO) OU PODEM SER MUITO FRACAS COMO BISMUTO QUE FUNDE A 270 °C.)



© 2003 Brooks/Cole Publishing / Thomson Learning™

No Si, com uma valência de 4, necessita de 4 ligações covalentes.

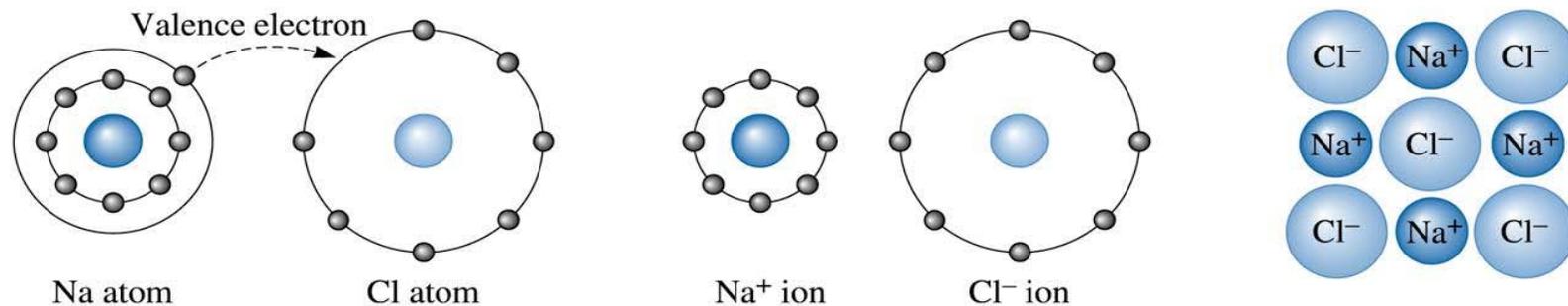


A estrutura tetraédrica da sílica (SiO_2), que contém ligações covalentes entre os átomos de Si e de O.

iii) LIGAÇÃO IÔNICA

- **ÁTOMOS SE COMPORTAR COMO ÍONS (CÁTION Na^+ E ÂNION Cl^-) SE ATRAINDO ELETROSTATICAMENTE**
- **CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POBRE \Rightarrow MOVIMENTO IÔNICO**

As ligações predominantes nos materiais cerâmicos são iônicas.



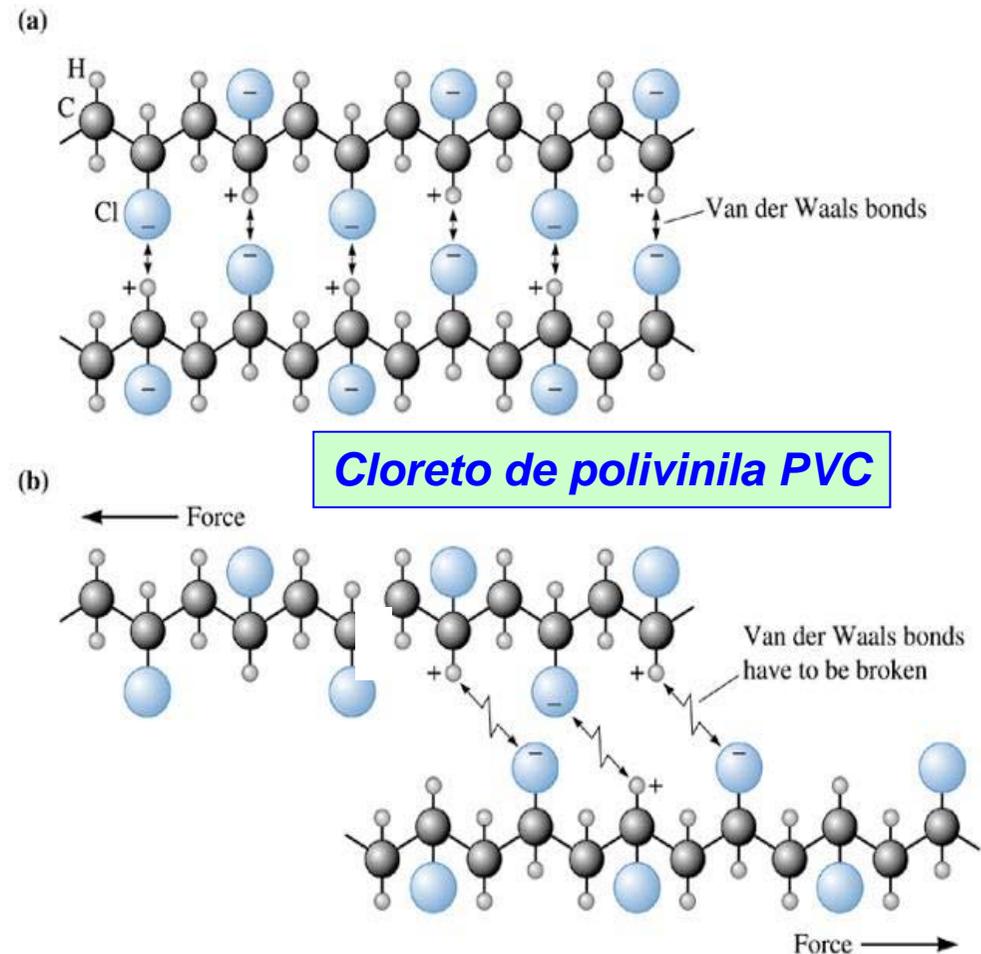
© 2003 Brooks/Cole Publishing / Thomson Learning™

Uma ligação iônica é criada entre dois átomos diferentes com diferentes eletronegatividades. Quando o Na doa seu elétron de valência para o Cl, cada elemento se torna um íon, a atração ocorre e a ligação iônica é formada.

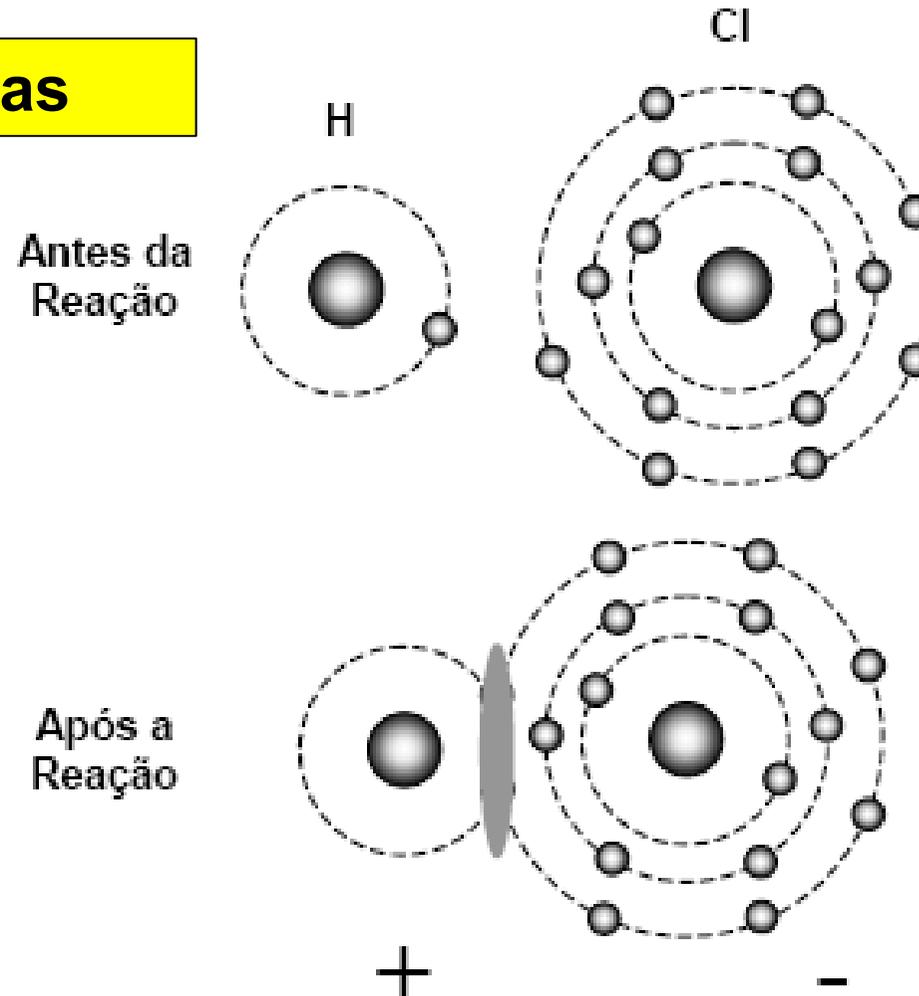
LIGAÇÕES MOLECULARES

(a) No cloreto de polivinil (PVC), os átomos de Cl unido a cadeia do polímero tem uma carga negativa e os átomos de H são positivamente carregados. A cadeia é ligada fracamente por ligações de vander Walls. Esta ligação extra faz o PVC mais rígido

(b) Quando uma força é aplicada ao polímero, as ligações de van der Walls são quebradas e as cadeias escorregam umas sobre as outras.



Ligações fracas

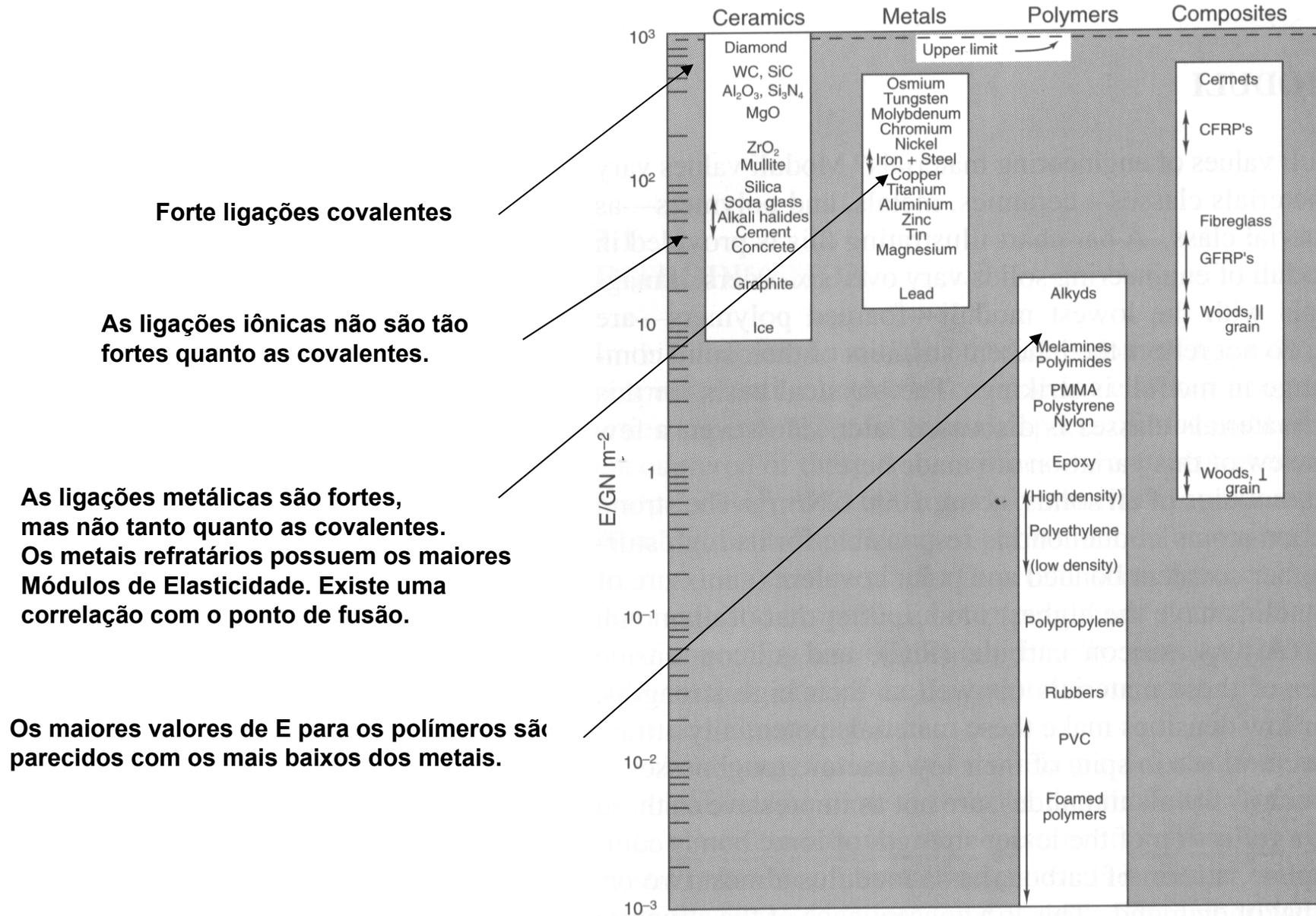


Ligações de Van der Waals – dipolos permanentes

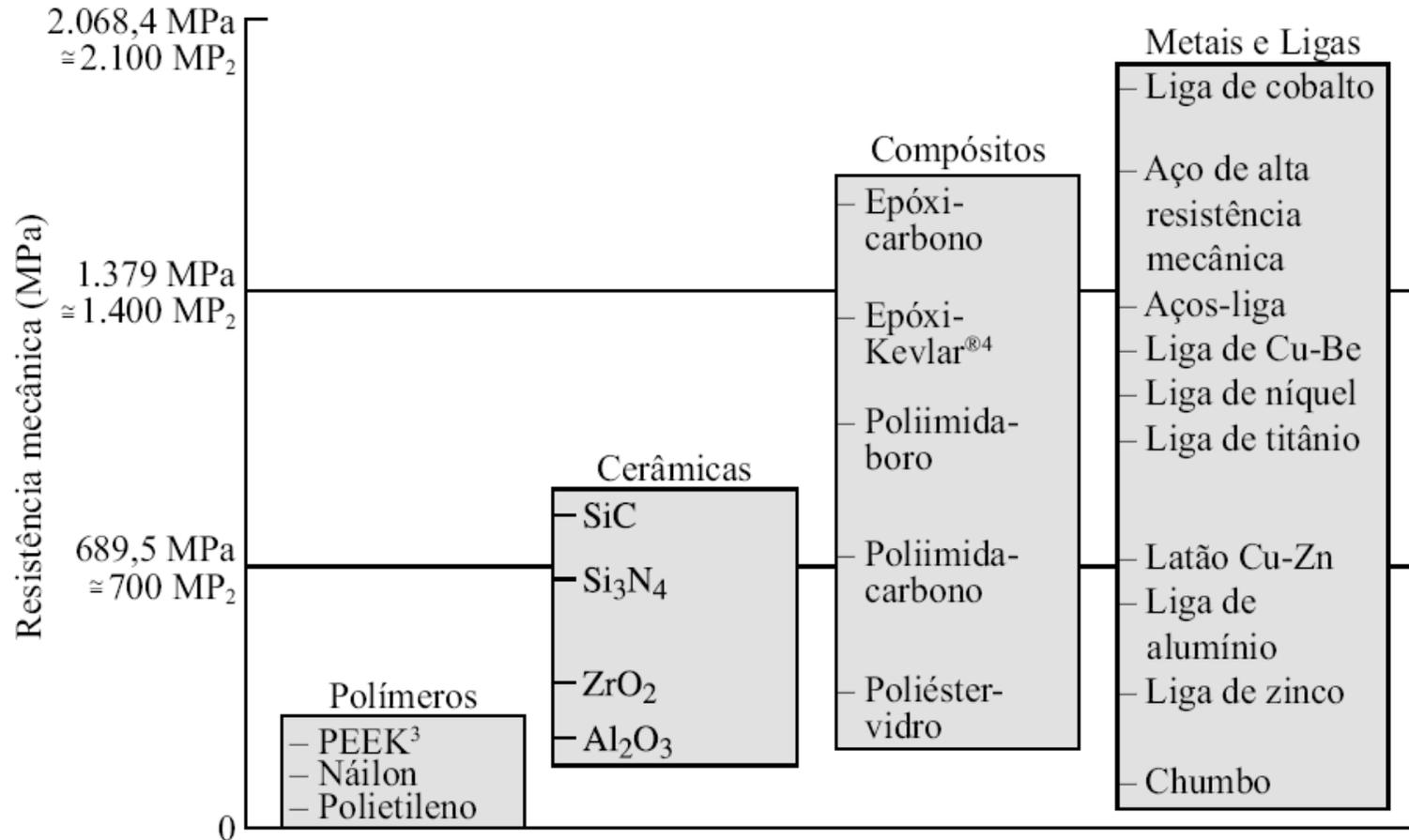
ENERGIA DAS LIGAÇÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS

Bond	Binding Energy (kcal/mol)
Ionic	150–370
Covalent	125–300
Metallic	25–200
Van der Waals	< 10

Propriedades Elástica dos Materiais

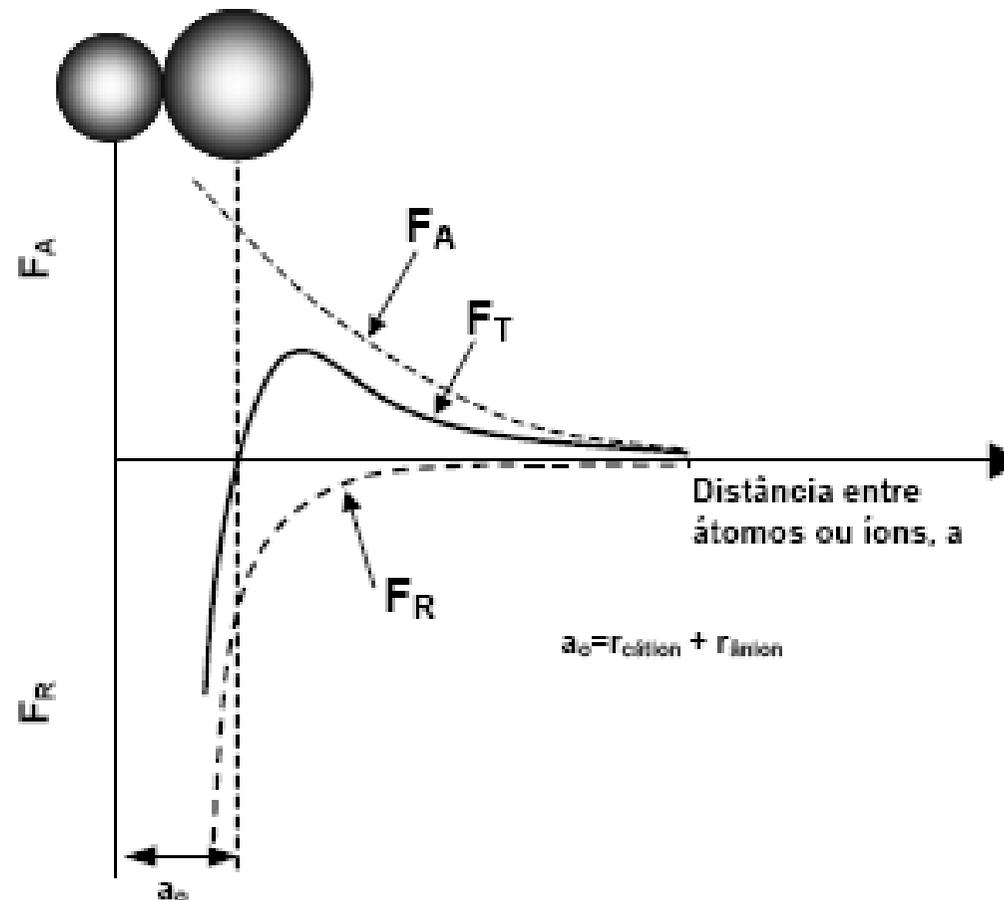


REPRESENTAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS VÁRIAS CATEGORIAS DE MATERIAIS



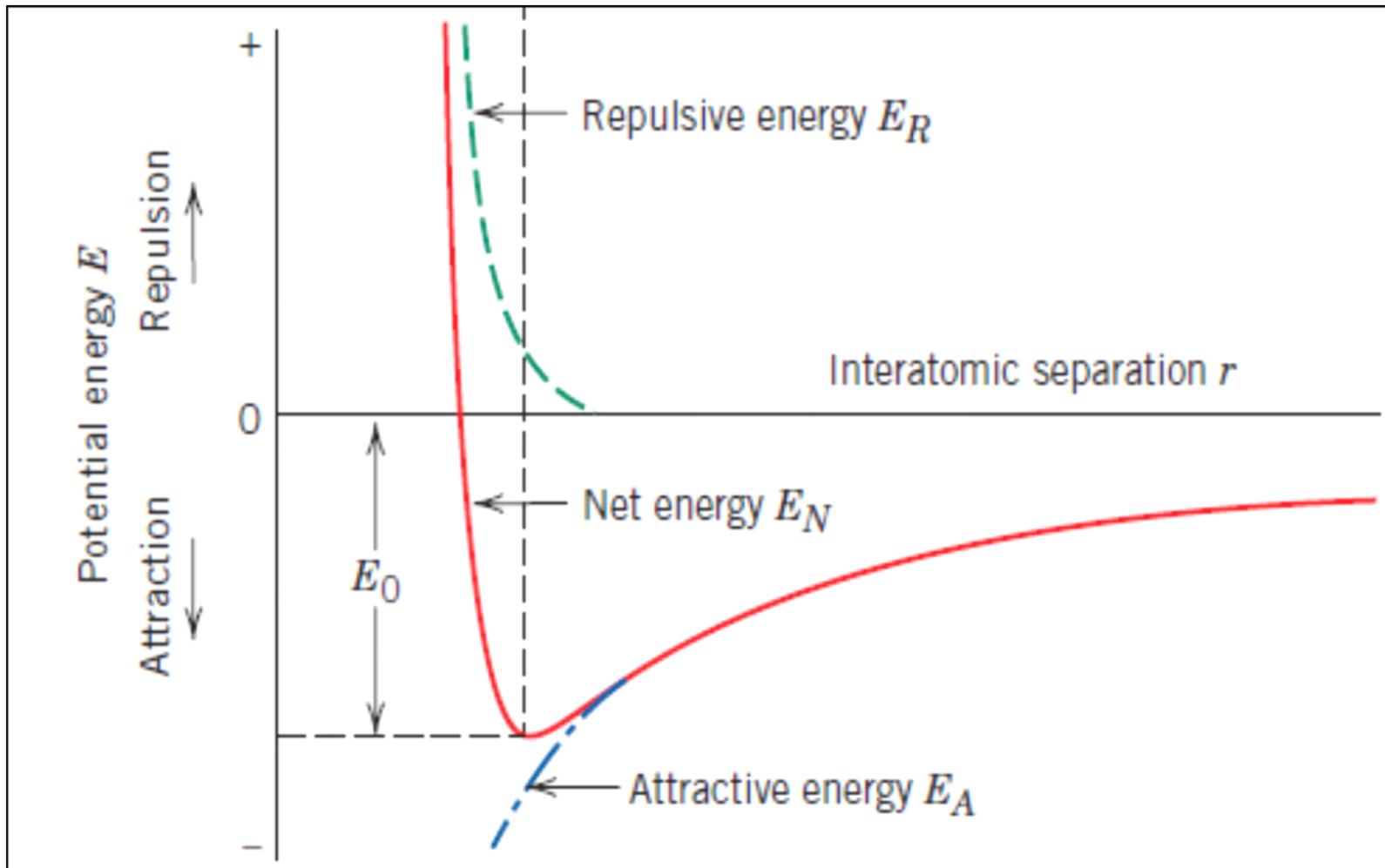
**O QUE OCORRE QUANDO UM
ÁTOMO/ÍON SE LIGA A OUTRO?**

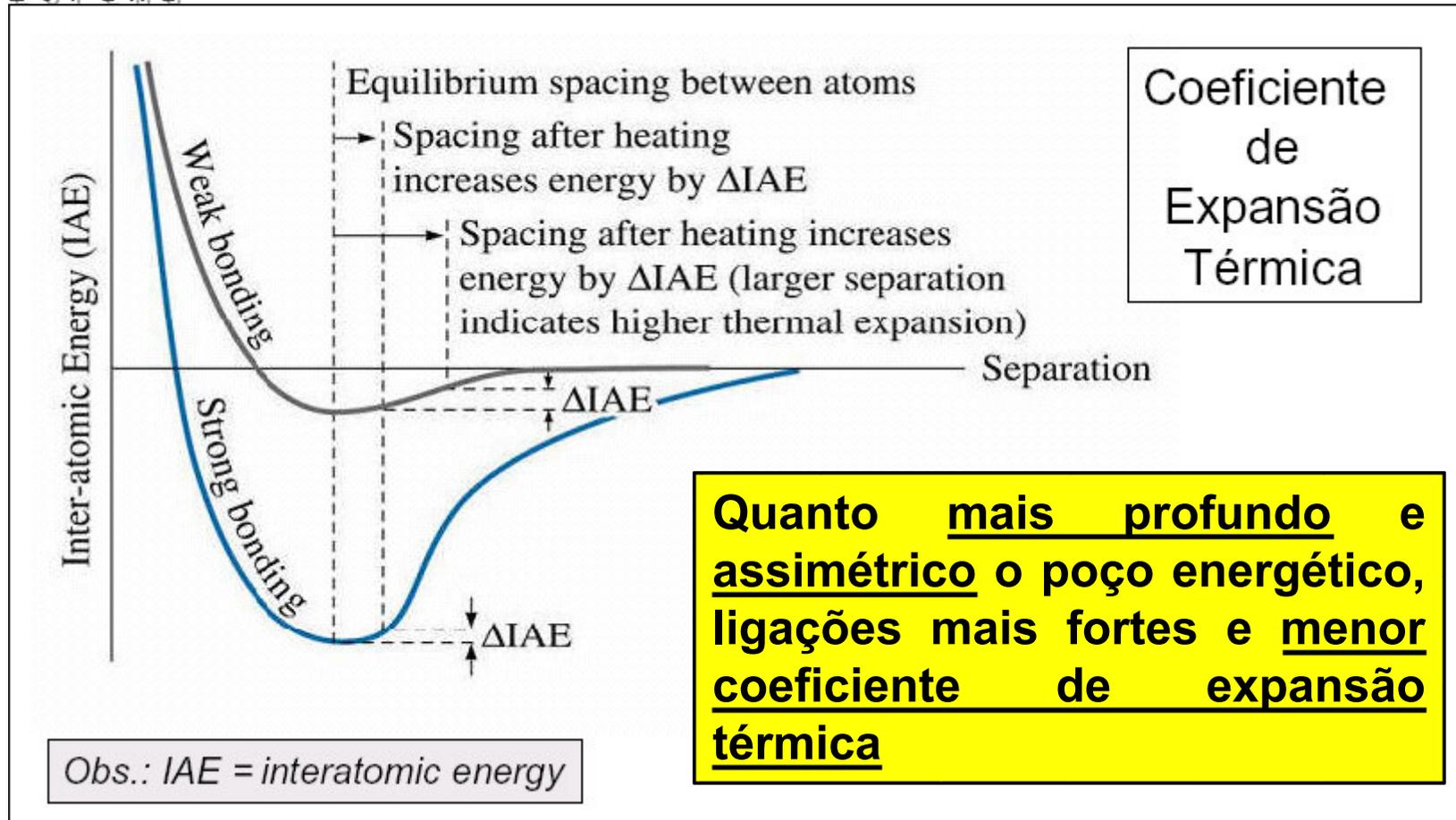
Força e energia interatômicas



Força de interação entre dois átomos: curva é a soma das forças de atração e repulsão.

Energia interatômica: Variação da energia potencial resultante da interação entre átomos ou íons.





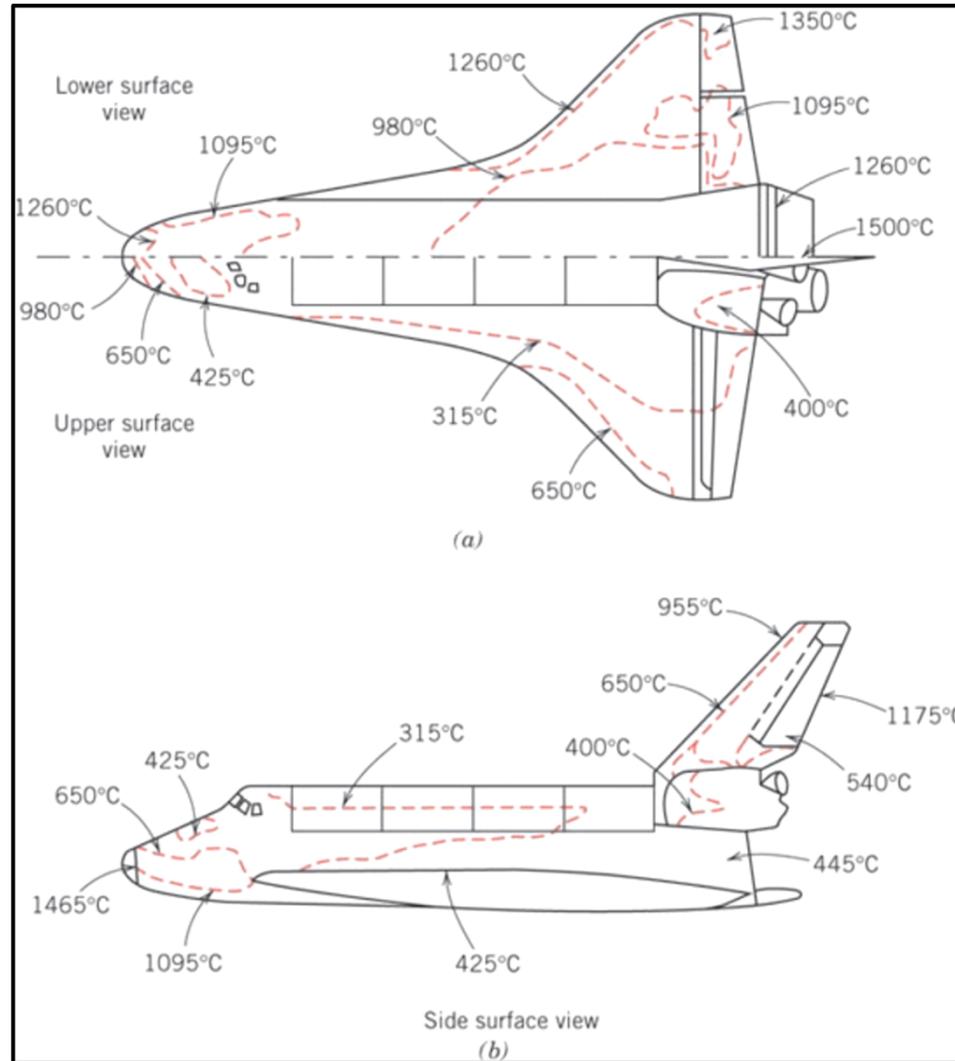
Ponto de fusão: Quanto mais profundo o poço, maiores as temperaturas de fusão, ebulição e sublimação.

Seleção de vários materiais: Space shuttle!



(Callister)

Seleção de vários materiais: Space shuttle!



Seleção de vários materiais: resistência mecânica, temperatura de fusão, coeficiente de expansão térmica e isolamento em diferentes temperaturas!

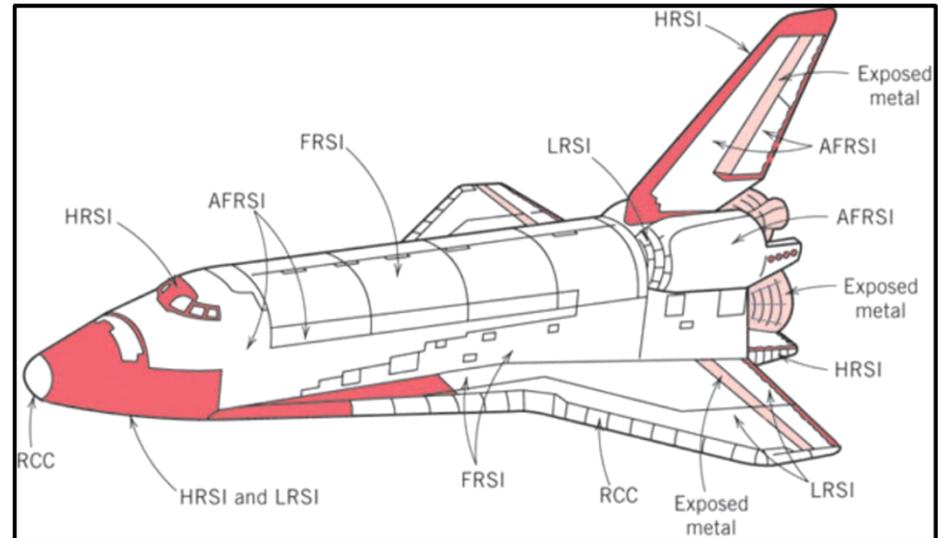


Table 20.5 Thermal Protection Systems Employed on the Space Shuttle Orbiter

<i>Material Generic Name</i>	<i>Minimum Operating Temperature, °C (°F)</i>	<i>Maximum Operating Temperature, °C (°F)</i>	<i>Material Composition</i>	<i>Orbiter Locations</i>
Felt reusable surface insulation (FRSI)	-130 (-200)	400 (750)	Nylon felt, silicone rubber coating	Wing upper surface, upper sides, cargo bay doors
Advanced flexible reusable surface insulation (AFRSI)	-130 (-200)	815 (1500)	Quartz batting sandwiched between quartz and glass fabrics	Upper surface regions
Low-temperature reusable surface insulation (LRSI)	-130 (-200)	650 (1200)	Silica tiles, borosilicate glass coating	Upper wing surfaces, tail surfaces, upper vehicle sides
High-temperature reusable surface insulation (HRSI)	-130 (-200)	1260 (2300)	Silica tiles, borosilicate glass coating with SiB ₄ added	Lower surfaces and sides, tail leading and trailing edges
Reinforced carbon-carbon (RCC)	No lower limit identified	1650 (3000)	Pyrolyzed carbon-carbon, coated with SiC	Nose cap and wing leading edges

Source: Adapted from L. J. Korb, C. A. Morant, R. M. Calland and C. S. Thatcher, "The Shuttle Orbiter Thermal Protection System," *Ceramic Bulletin*, No. 11, Nov. 1981, p. 1188. Copyright 1981. Reprinted by permission of the American Ceramic Society.

(Callister)

Prof. Dr. Cassius Olivio F.



Seleção de Materiais- ligação - Propriedades

Material	Ligação	Propriedades
Cerâmicos: Constituintes :óxidos, silicatos e nitretos.	Iônica ou covalente	<ul style="list-style-type: none">• ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA• ALTA FRAGILIDADE• BOM ISOLANTE TÉRMICO E ELÉTRICO• ALTA TEMPERATURA DE FUSÃO• ALTA DUREZA
Metálicos: Constituintes: elementos metálicos e não metálicos.	Metálica	<ul style="list-style-type: none">• MÉDIA - ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA• ALTA DUCTILIDADE• BOM CONDUTOR TÉRMICO E ELÉTRICO• BAIXA - ALTA TEMPERATURA DE FUSÃO• BAIXA - ALTA DUREZA
Poliméricos: Constituintes: cadeias moleculares orgânicas.	Covalente e ligações fracas.	<ul style="list-style-type: none">• BOM ISOLANTE TÉRMICO E ELÉTRICO• ALTA DUCTILIDADE• BAIXA RESISTÊNCIA MECÂNICA• BAIXA DUREZA• BAIXA ESTABILIDADE TÉRMICA



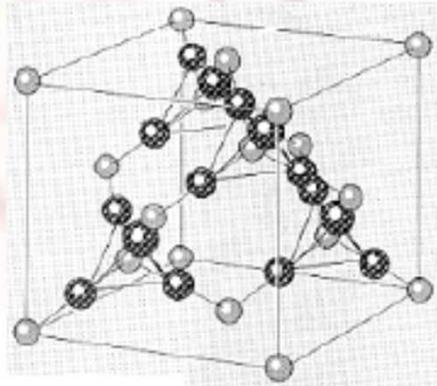
Seleção de Materiais- Estrutura e Propriedades

- Segundo a distribuição espacial dos átomos, moléculas ou íons, os sólidos podem ser classificados em:
 - **Cristalinos**: compostos por átomos, moléculas ou íons arranjados de uma forma periódica em três dimensões. As posições ocupadas seguem uma ordenação que se repete para grandes distâncias atômicas (de longo alcance).
 - **Amorfos**: compostos por átomos, moléculas ou íons que não apresentam uma ordenação de longo alcance. Podem apresentar ordenação de curto alcance.

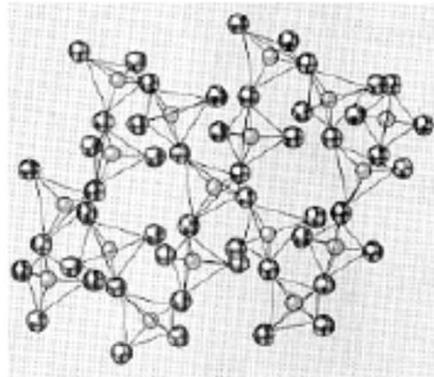


Seleção de Materiais- Estrutura e Propriedades

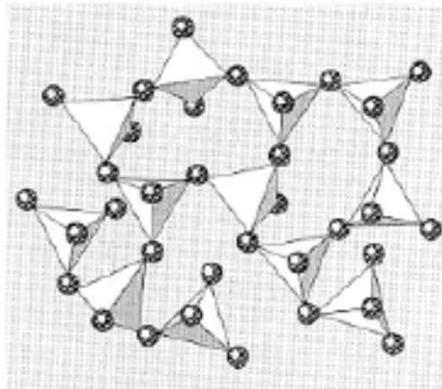
Estruturas da sílica (SiO_2)



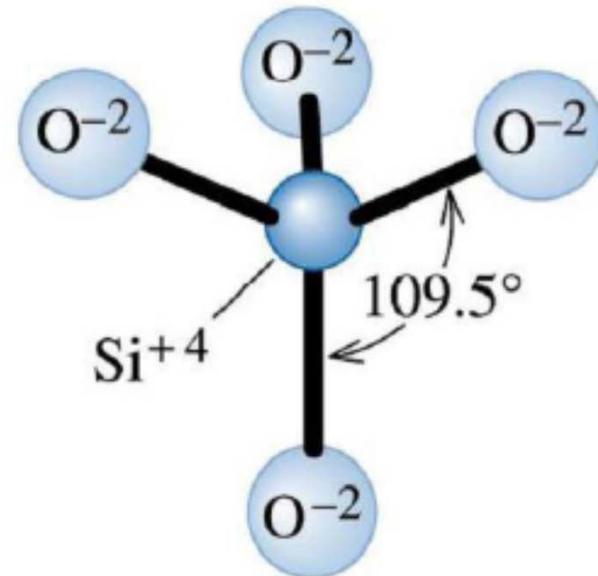
cristobalita

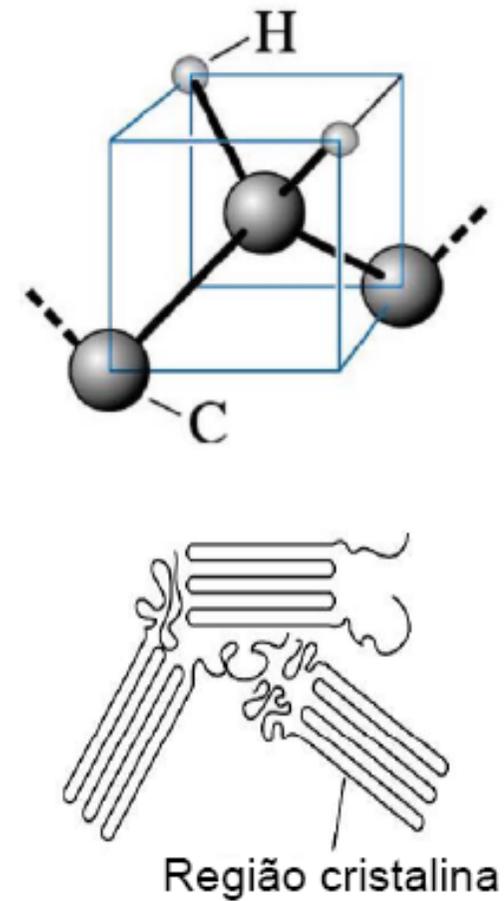
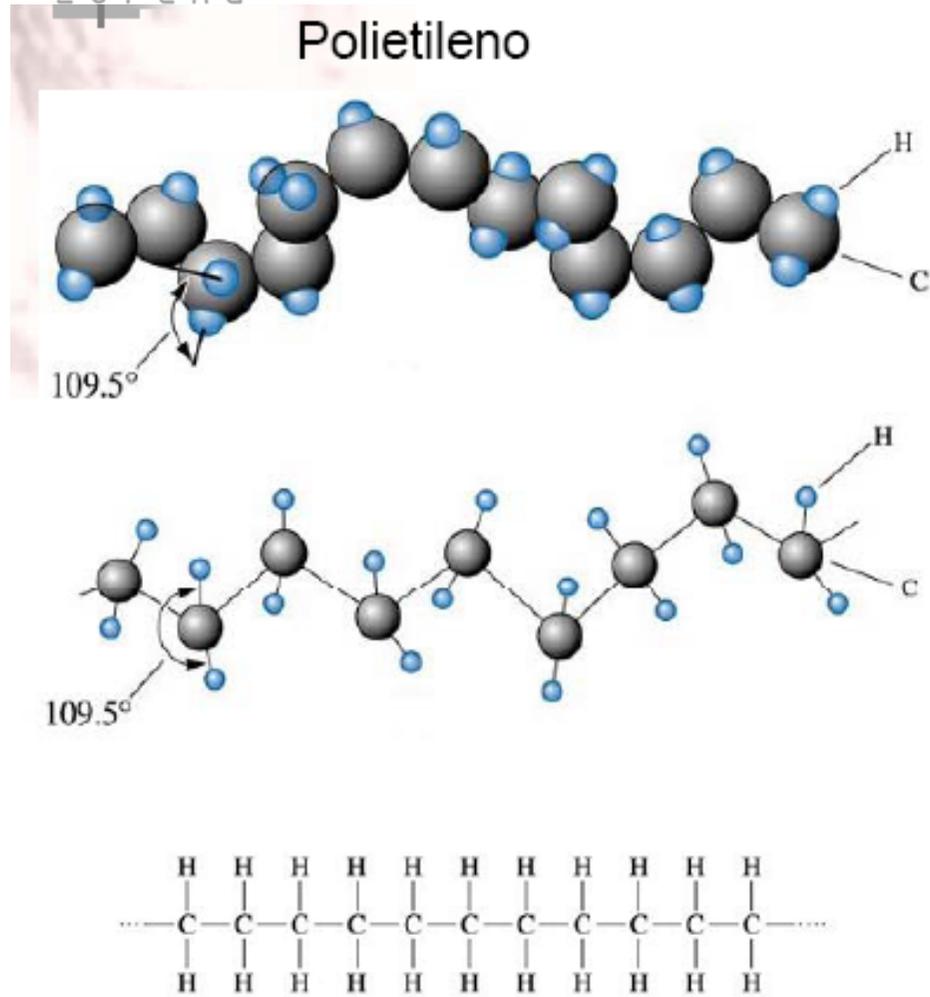


quartzo



vidro

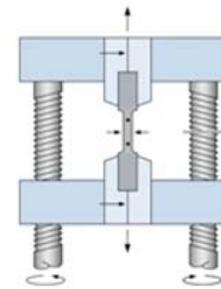
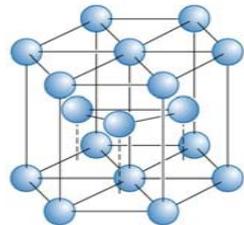
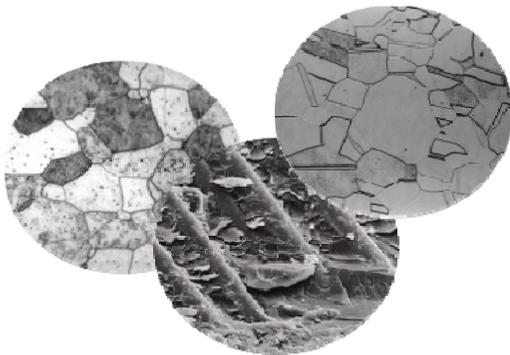






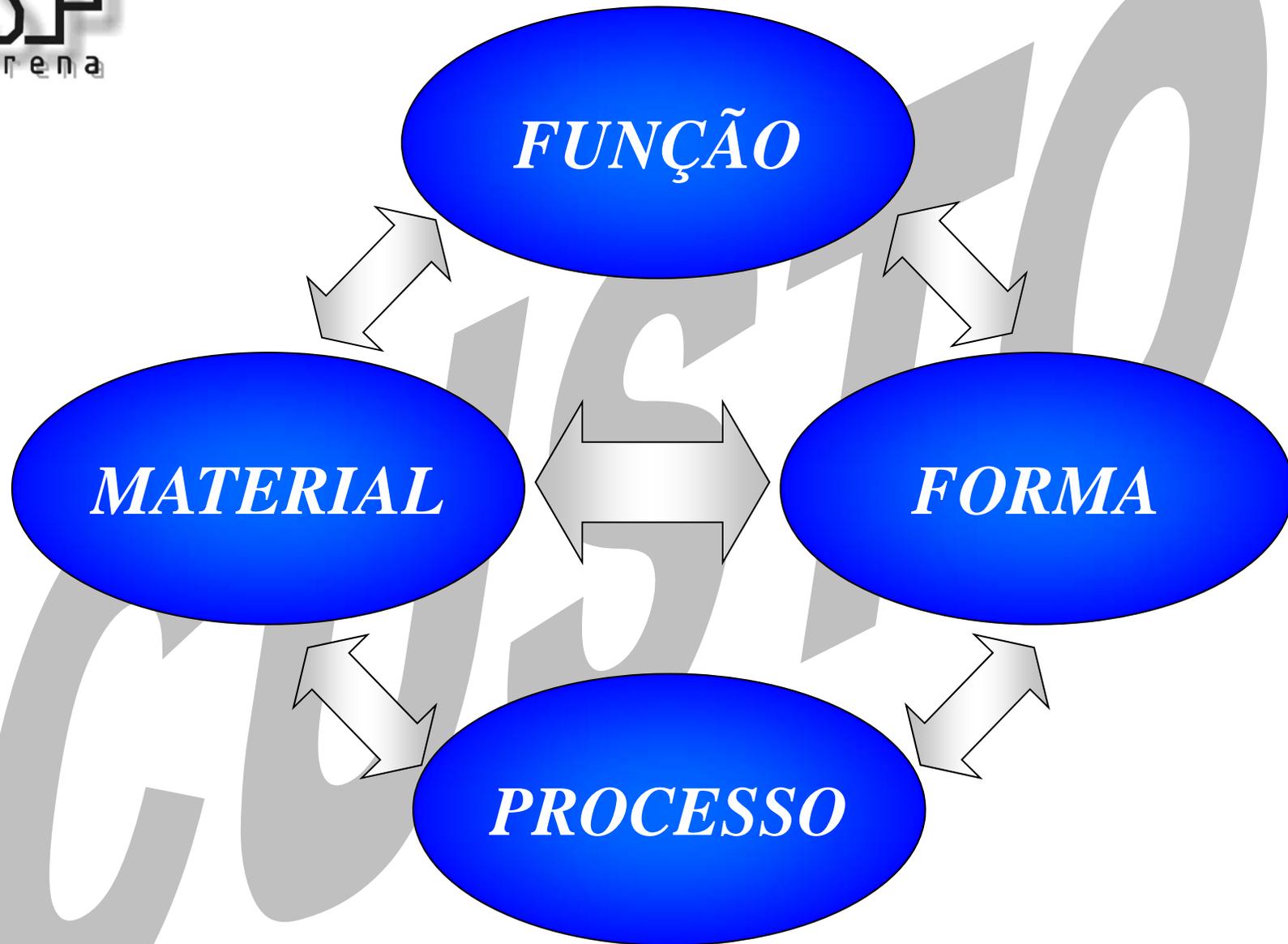
Seleção de Materiais

Prof. Dr. Cassius Ruchert



Sumário da Aula

- Introdução
- Índice de Mérito
- Mapas (diagrama) de seleção de materiais
- Exemplos



Os procedimentos de seleção de materiais obedecem a múltiplos critérios. Os 16 critérios de seleção de materiais a seguir são os mais representativos:

- Condições dimensionais;
- Considerações de forma;
- Considerações de peso;
- Considerações de resistência mecânica;
- Resistência ao desgaste;
- Conhecimento das variáveis de operação;
- Facilidade de fabricação;
- Requisitos de durabilidade;
- Número de unidades;
- Disponibilidade de material;
- Custo;
- Existência de especificações e códigos;
- Viabilidade de reciclagem;
- Valor da sucata;
- Grau de normalização;
- Tipo de carregamento.

Realizar a interação e otimização desses critérios para que a filosofia do compromisso exerça papel relevante

Mecanismos causadores de falhas em plantas industriais

Mecanismo	%
Corrosão	29
Fadiga	25
Fratura frágil	16
Sobrecarga	11
Corrosão em alta temperatura	7
Corrosão sob tensão/fadiga, fragilização por H	6
Fluência	3
Desgaste	3

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

Mecanismos causadores de falhas em componentes aeronáuticos

Mecanismo	%
Fadiga	61
Sobrecarga	15
Corrosão sob tensão	15
Desgaste excessivo	11
Corrosão	8
Oxidação em alta temperatura	6

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

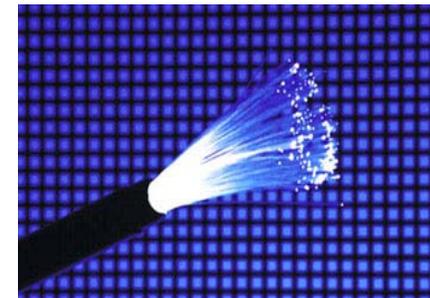
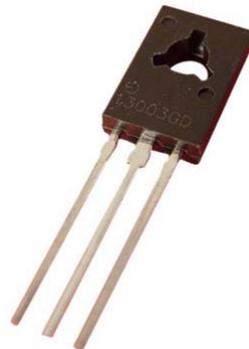
Origens das falhas em componentes metálicos

Origem	%
Seleção incorreta de materiais	38
Defeitos de fabricação	15
Tratamento térmico incorreto	15
Falha de projeto	11
Condições imprevistas de operação	8
Controle inadequado das condições de trabalho	6
Impropriedades na inspeção ou controle de qualidade	3
Troca equivocada de materiais	2

Alexander, W.O., Davies, G.J., Reynoldas, K.A., Bradbury, E.K (1985)

Tipos de Projetos

- **Original:**
 - Envolve uma idéia ou um novo princípio
 - A sílica de alta pureza viabilizou o transistor
 - O vidro de alta pureza viabilizou a fibra ótica
 - A tecnologia espacial estimulou o desenvolvimento de compósitos



Tipos de Projetos

- **Desenvolvimento:**

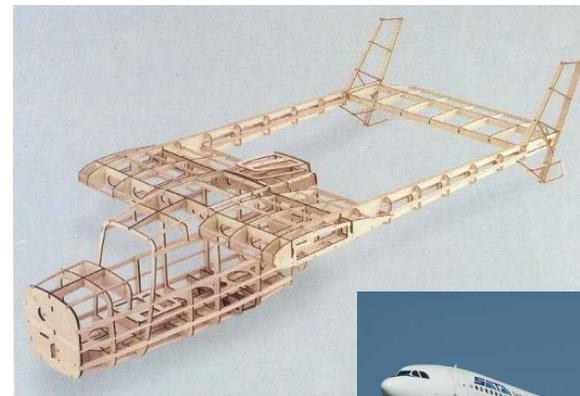
- Toma uma idéia já existente e melhora a performance através de um refinamento do princípio

- Os polímeros substituem os metais em aplicações domésticas
- Os compósitos de carbono substituem a madeira em artigos de desporto



Tipos de Projetos

- **Variante:**
 - Envolve uma mudança de escala sem alterar a função
 - Caldeiras de pequena dimensão são feitas de cobre; Caldeiras de grande dimensão são feitas de aço
 - Aviões de aeromodelismo são feitos de madeira; Aviões reais são feitos em ligas metálicas e compósitos



Tipos de Indústria

Indústria de Ponta

- Grande exigência tecnológica
- Utilização dos materiais nos limites

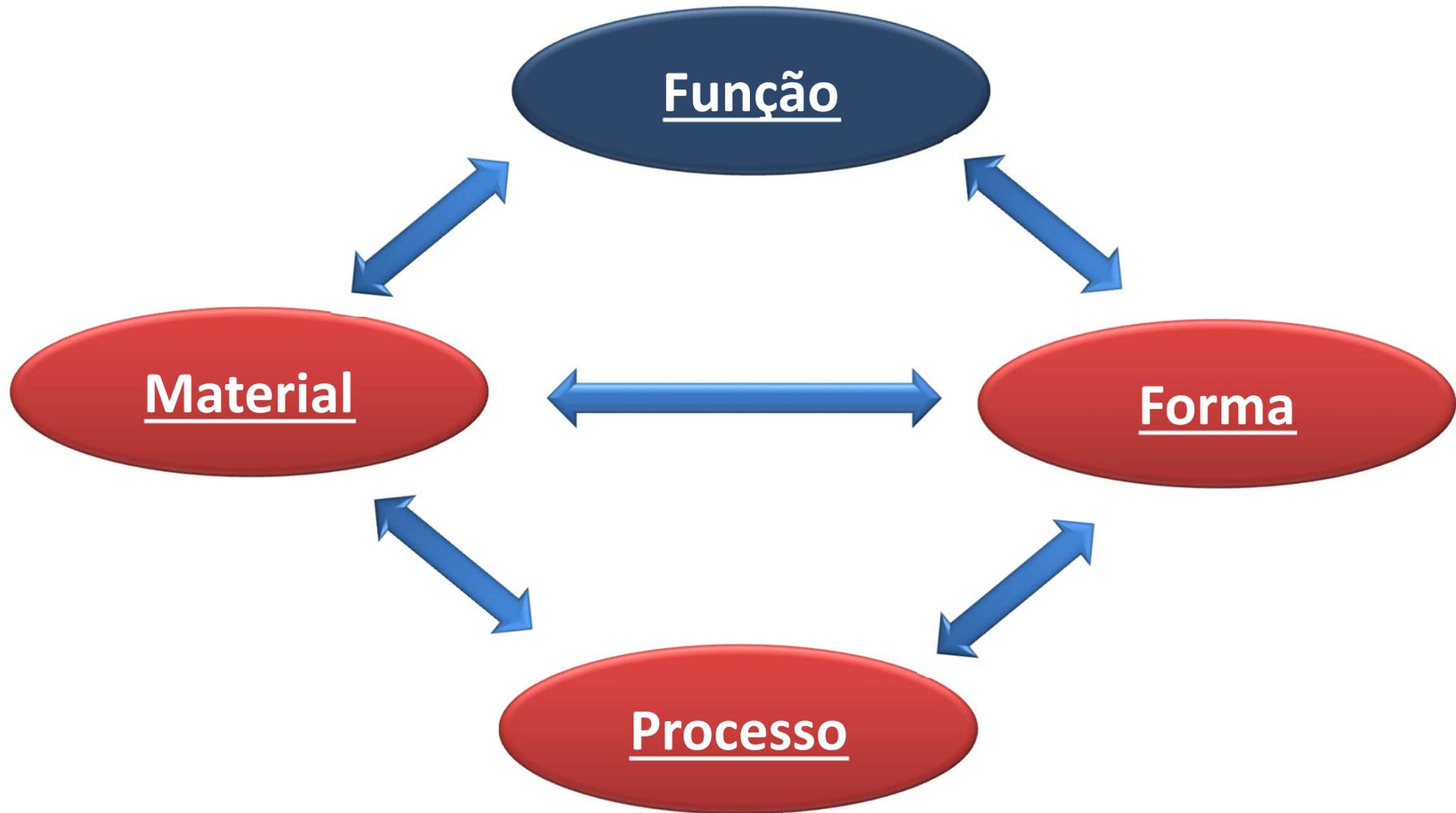
**Seleção Cuidadosa
(Fator Custo Secundário)**

Produção em Massa

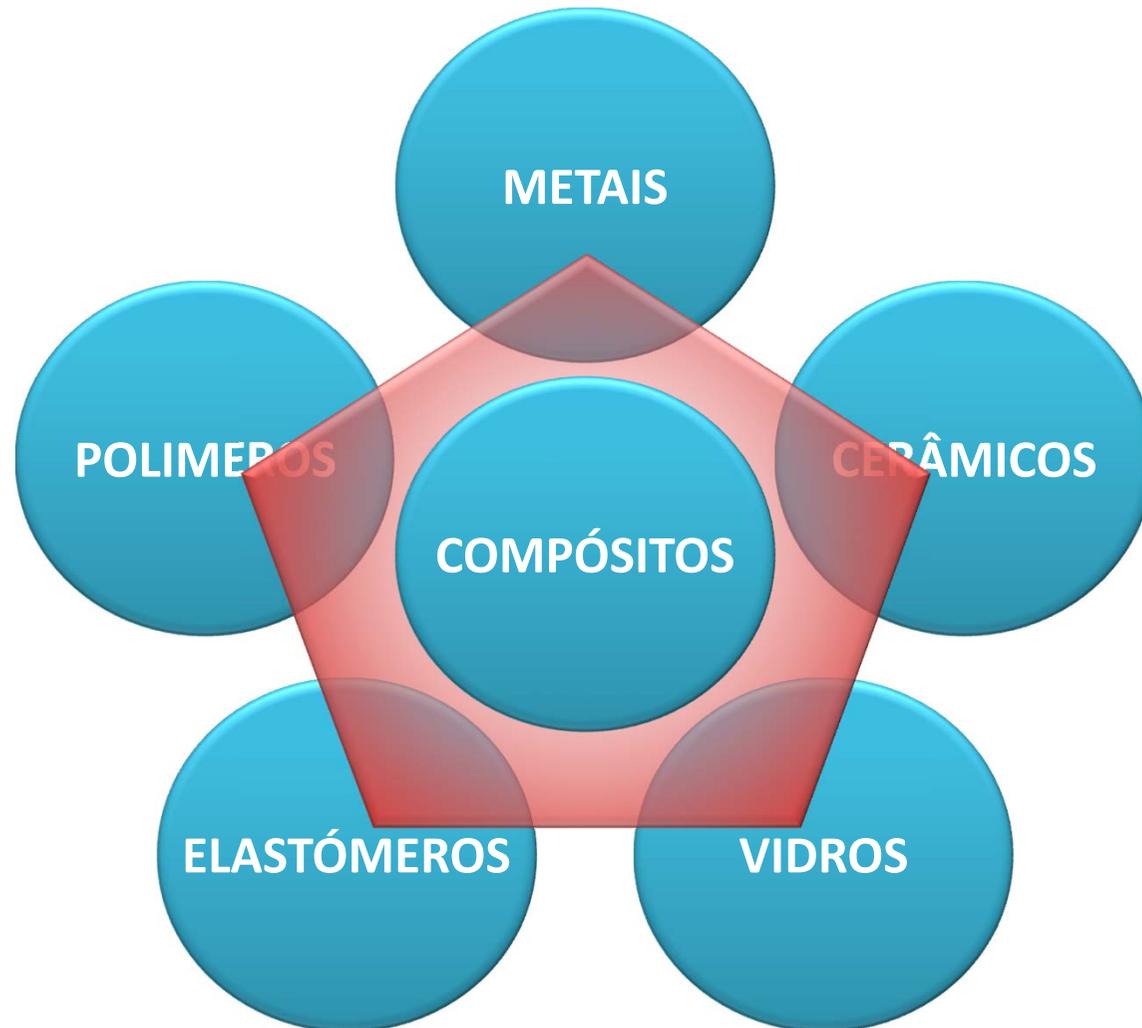
- Produtos não diferenciados
- Utilização de materiais abaixo dos limites

**Seleção Cuidadosa
(Fator Custo Primordial)**

Custo



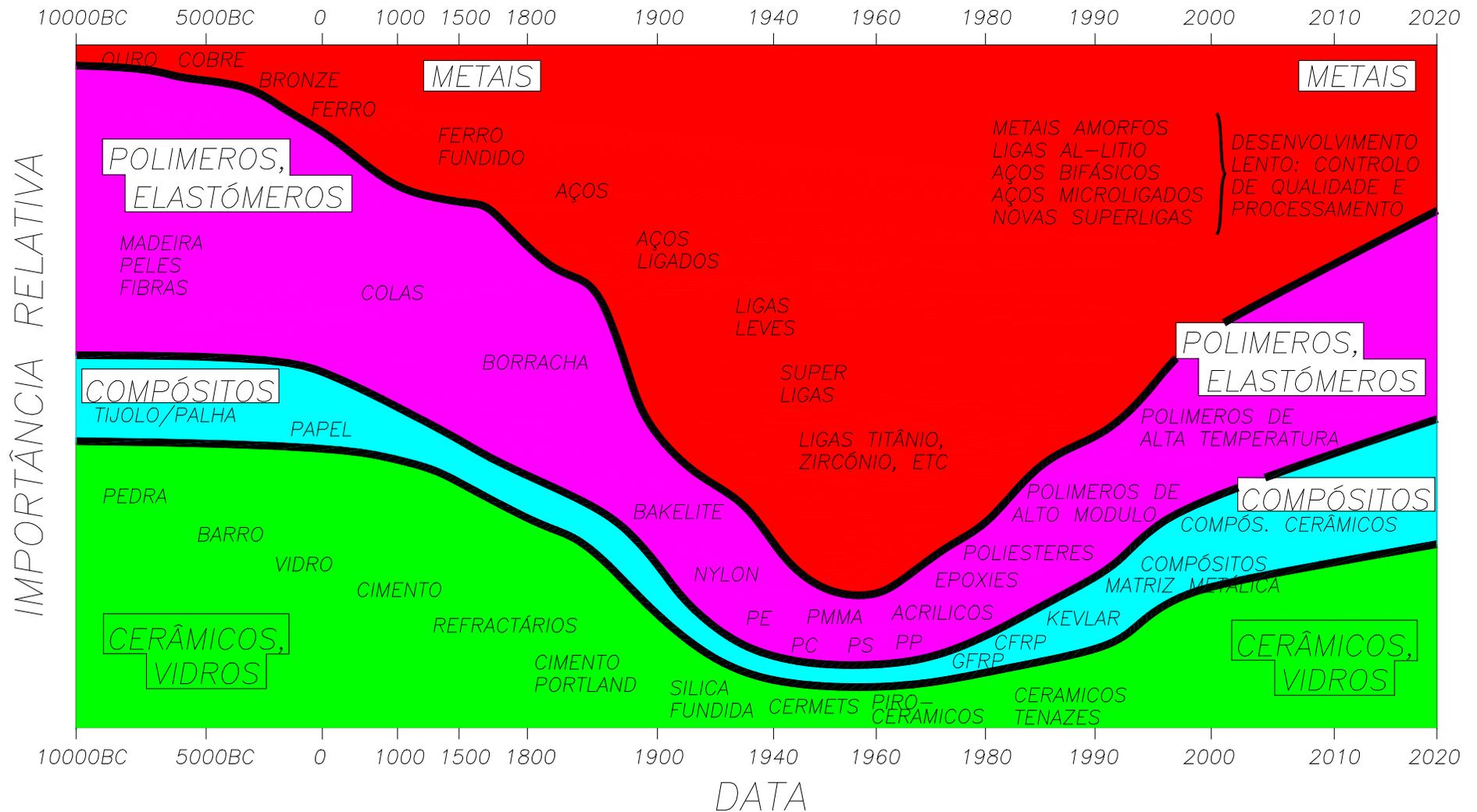
Famílias de Materiais



Sub-grupos dentro de cada família



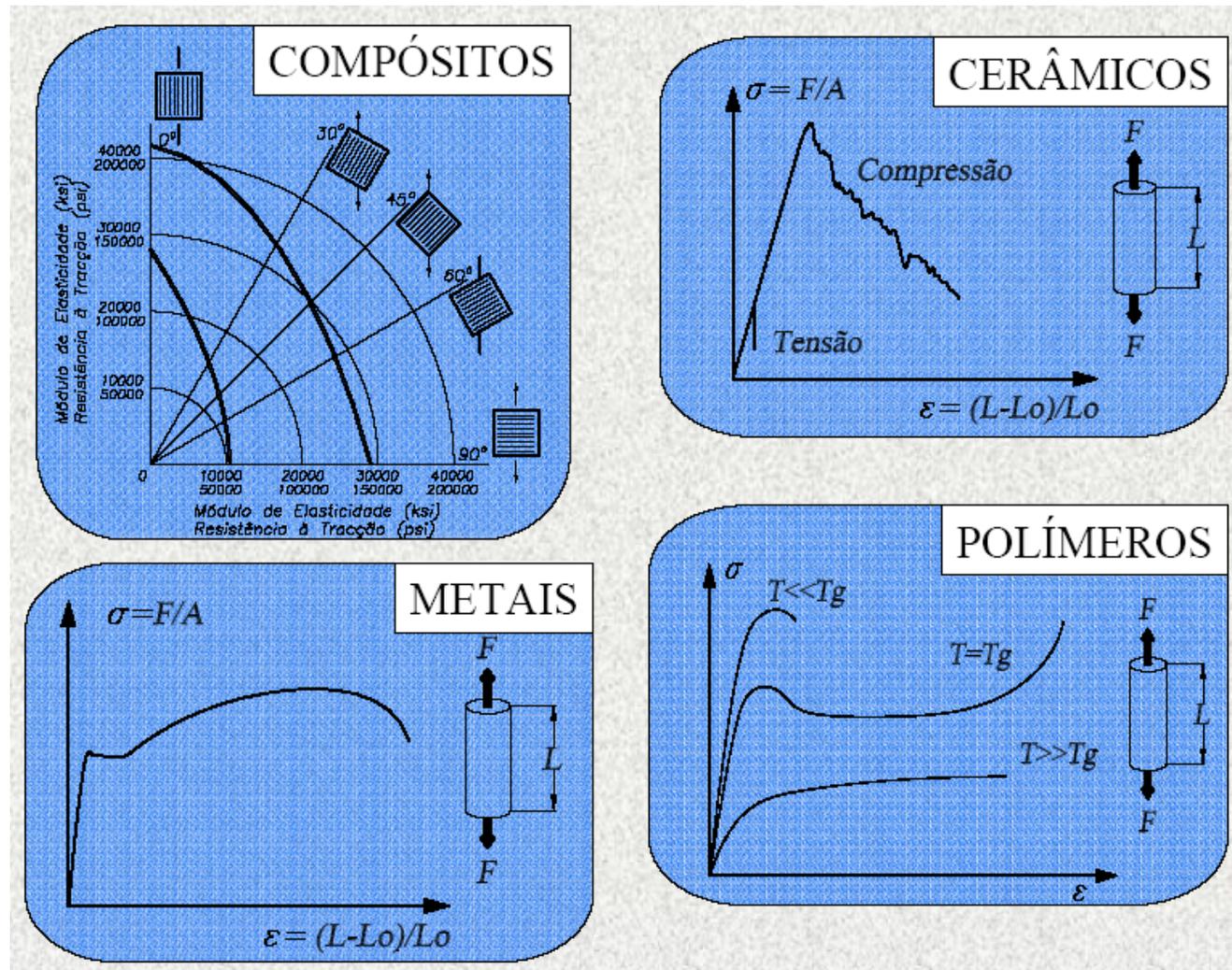
Evolução da Utilização dos Materiais



Sumário da Aula

- Introdução
- **Índice de Mérito**
- Mapas (diagrama) de seleção de materiais
- Exemplos

Critério de Seleção Baseado nas Propriedade dos Materiais



Índices de Mérito ou Desempenho (IM/D)

Organizar os procedimentos de seleção em torno do conceito de IM. Dentre estes os da relação resistência/peso e rigidez/peso são os mais conhecidos

Exemplo 1: resistência Específica

$$\frac{\sigma_y}{\rho}$$

Exemplo 2: Rigidez Específica

$$\frac{E}{\rho}$$

Exemplo 1: quadro de bicicleta

Material	σ_y (Mpa)
Aço-liga	1000
Ti	800
Al	500
PRFC	700

Obs.: PRFC = polímero reforçado com fibra de carbono

Material	IM (E/ρ)
Aço-liga	133
Ti	170
Al	185
PRFC	390

Exemplo 1: quadro de bicicleta

Material	Custo (US\$/Kg)
Aço-liga	0,75
Ti	15
Al	3
PRFC	20

Razão entre os preços varia pouco com o tempo em relação às variações de preço de um material específico !

Material	Custo / Custo do aço-liga
Aço-liga	1
Ti	20
Al	4
PRFC	26,7

Exemplo 1: quadro de bicicleta

Material	Custo Real / Custo Real do Aço-liga
Aço-liga	1
Ti	15,6
Al	2,9
PRFC	9,1

Obs.: Considerando uma barra maciça em tração

IM para minimização de peso de acordo com geometria e carregamento

Geometria / carregamento	Rigidez	Resistência	Tenacidade
Barra em tração	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$
Barra em torção	$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$
Tubo em torção	$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$
Barra e tubos em flexão	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$	$\frac{K_{IC}^{2/3}}{\rho}$
Flambagem de coluna e tubo	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	—	—

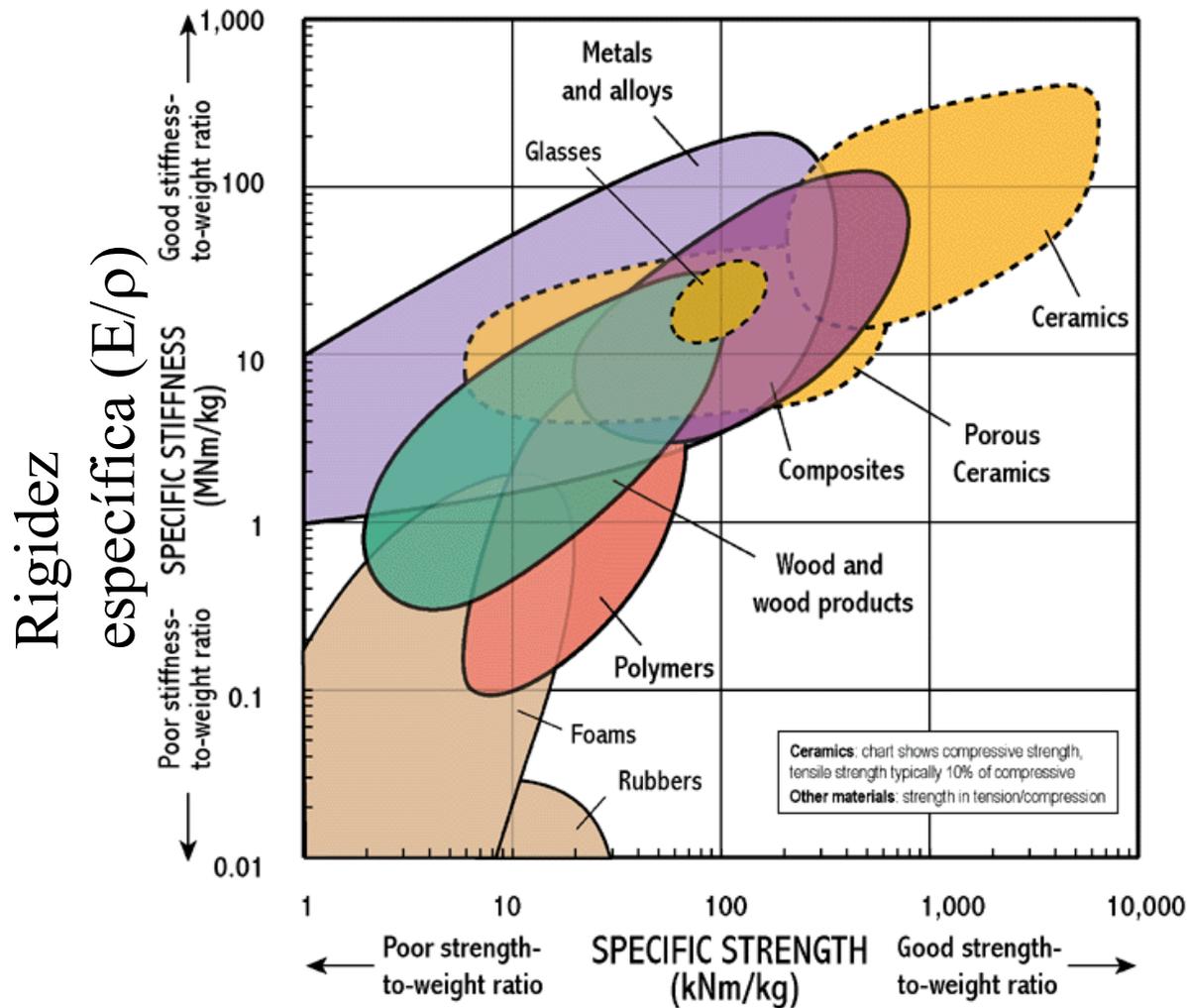
IM para minimização de peso de acordo com geometria e carregamento

Geometria / carregamento	Rigidez	Resistência	Tenacidade
Chapa em flexão	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$	$\frac{K_{IC}^{1/2}}{\rho}$
Flambagem de chapa	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	—	—
Cilindro em rotação	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$
Vaso de pressão cilíndrico	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$
Vaso de pressão esférico	$\frac{E}{(1-\nu)\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{K_{IC}}{\rho}$

Sumário da Aula

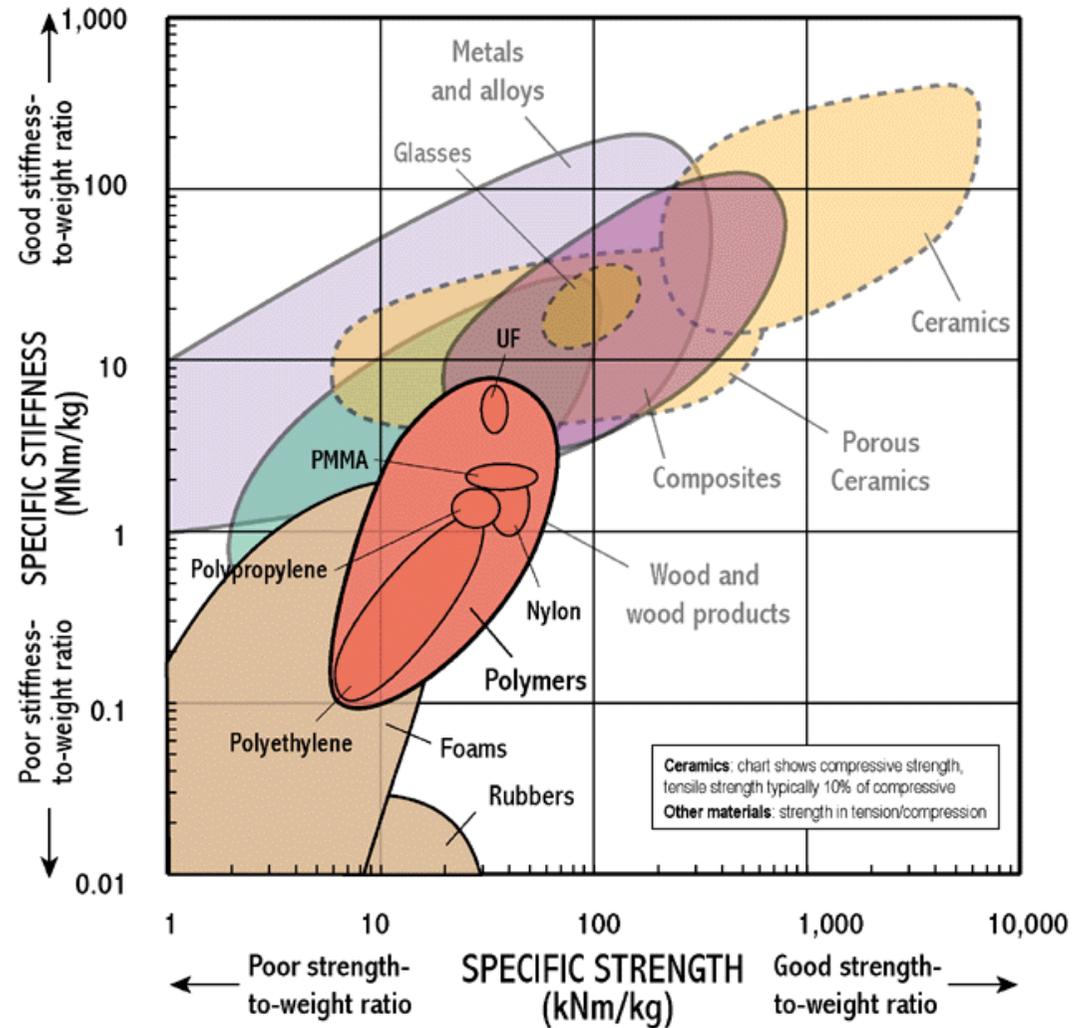
- Introdução
- Índice de Mérito
- Mapas (diagrama) de seleção de materiais
- Exemplos

Mapas de Seleção (Plotando dois IM)

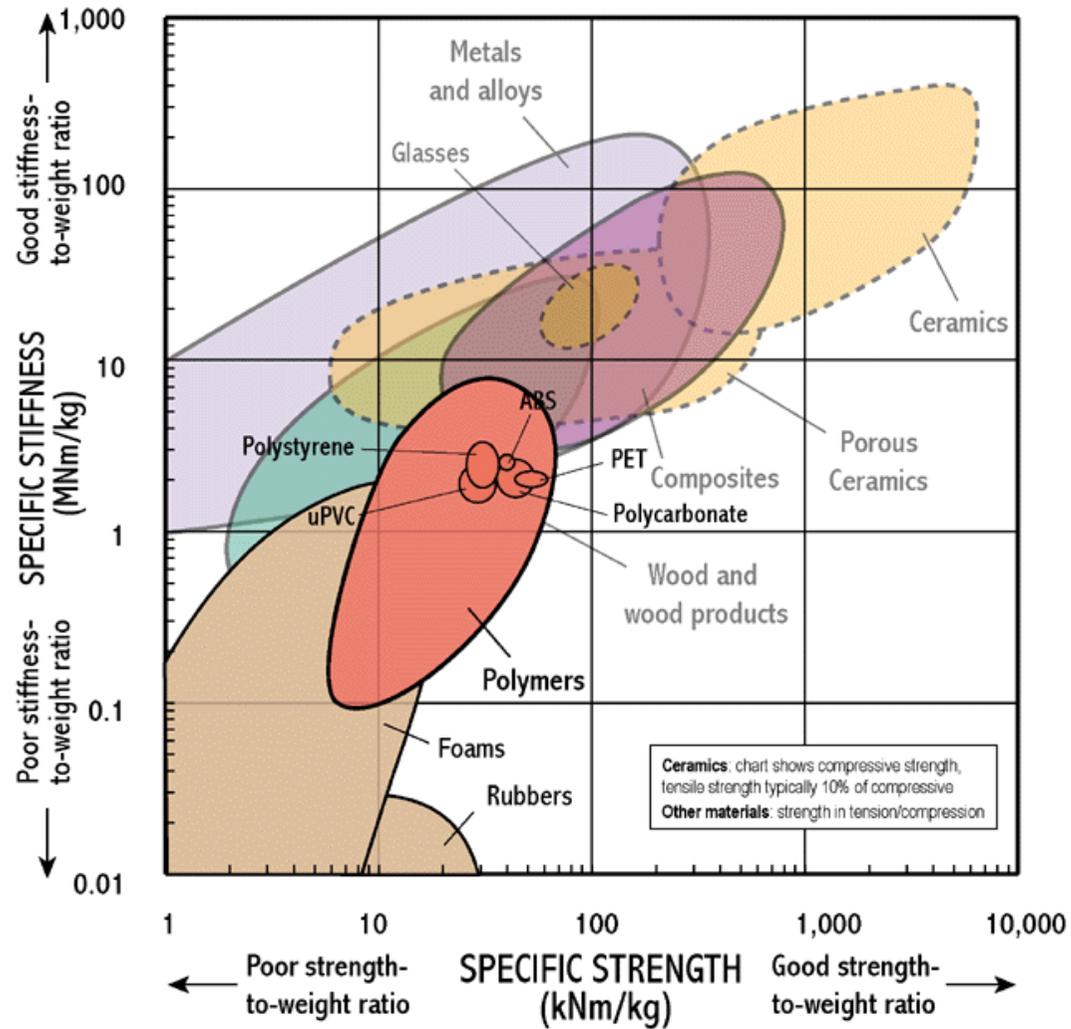


Resistência
específica (σ/ρ)

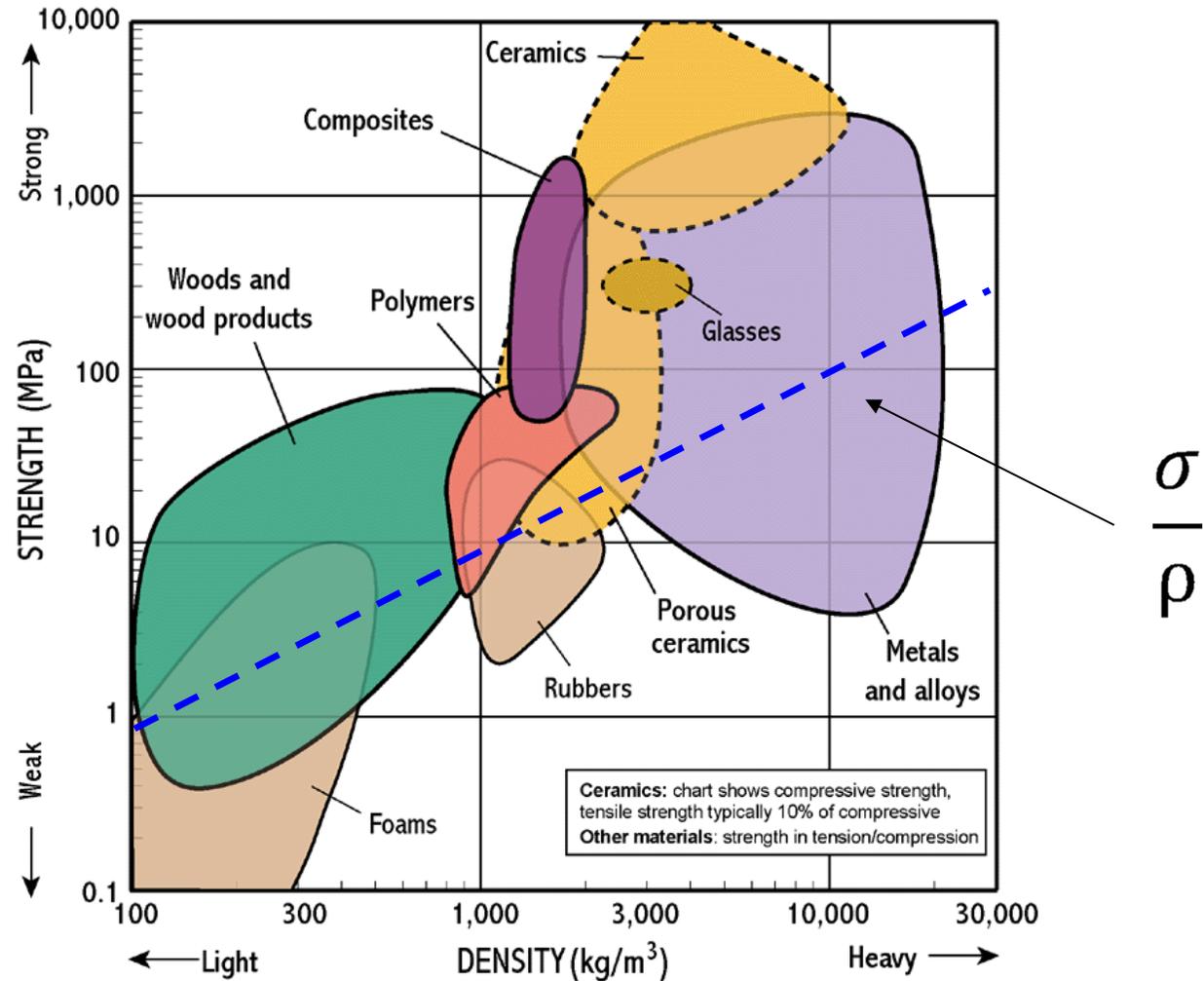
Mapas de Seleção (Plotando dois IM)^{ção}



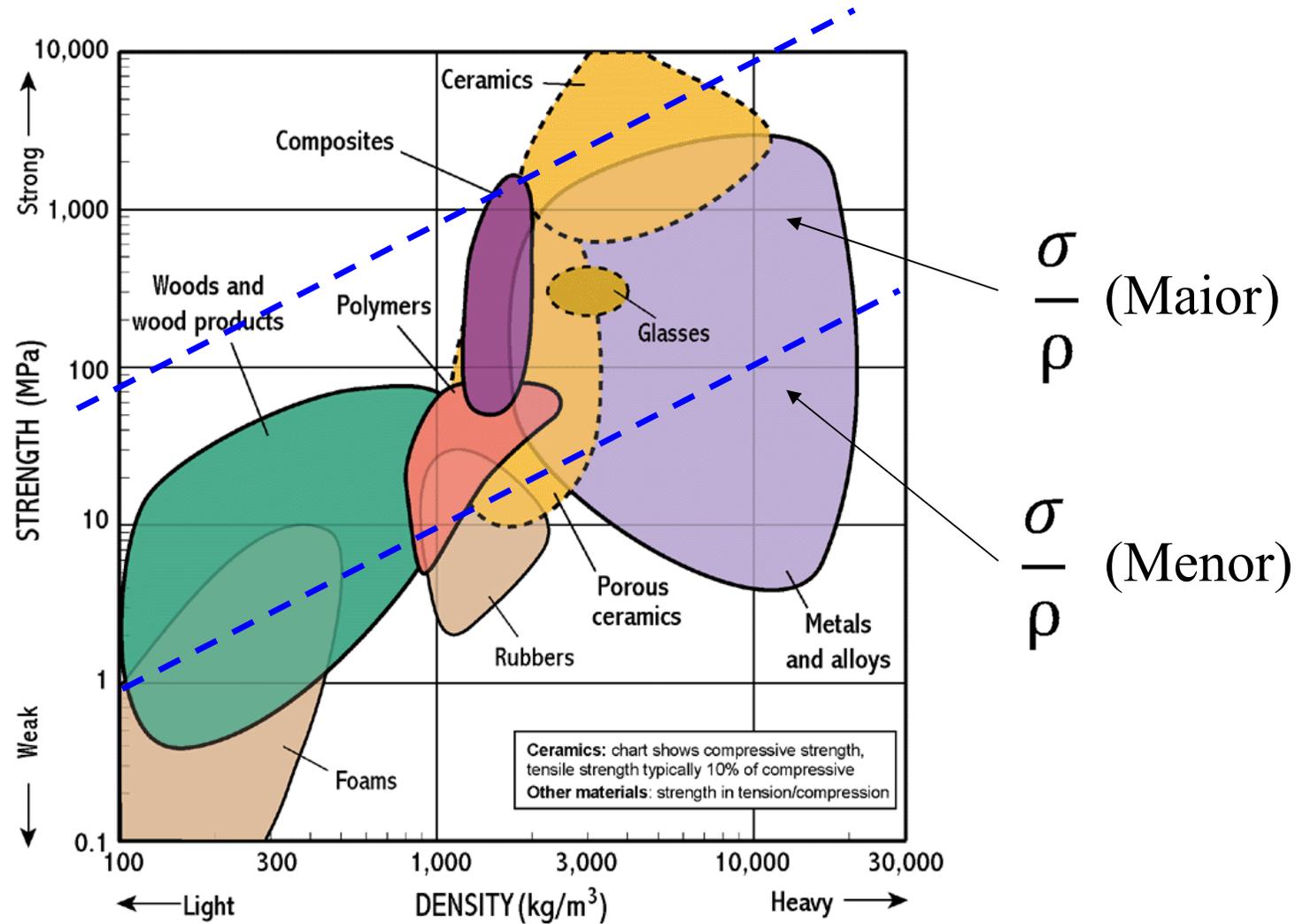
Mapas de Seleção (Plotando dois IM)



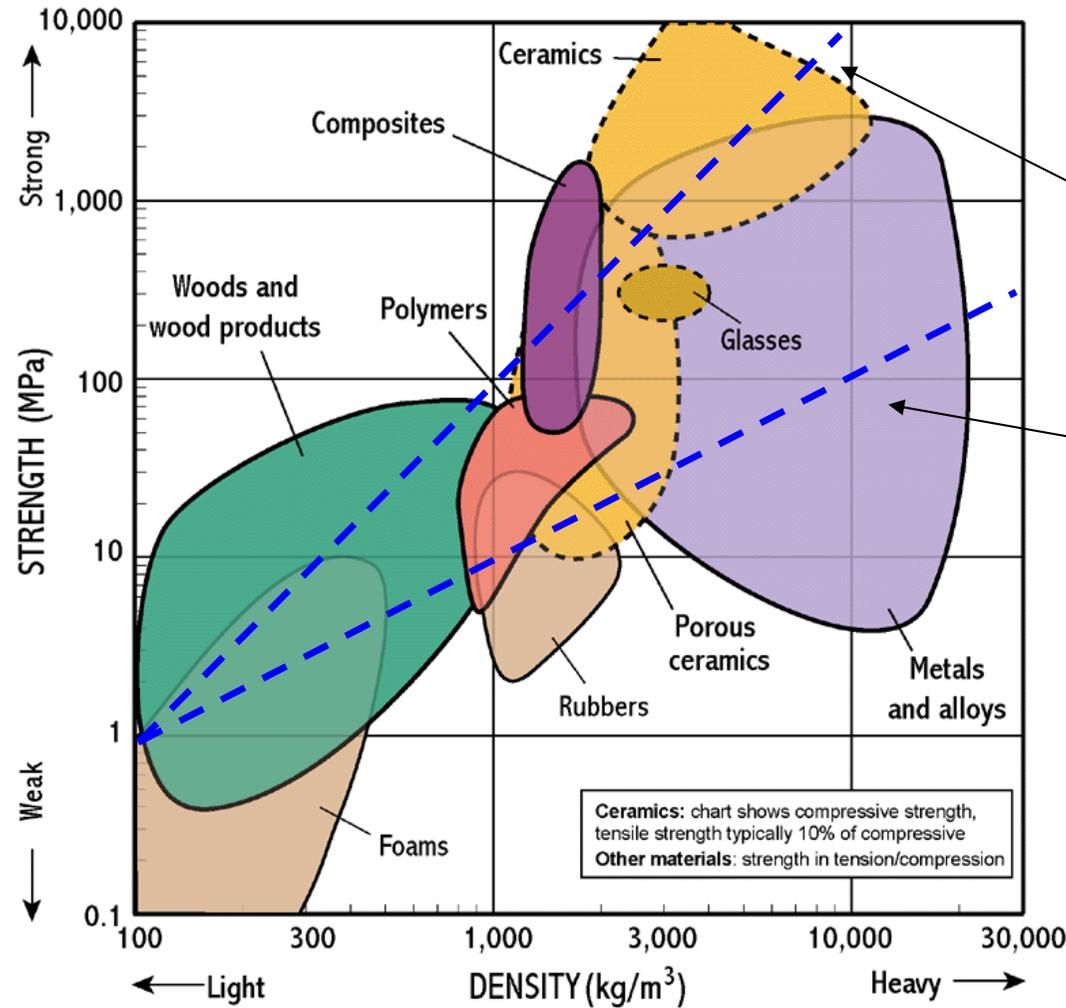
Mapas de Seleção (linhas guia p/ segurança projeto)



Mapas de Seleção (linhas guia)



Mapas de Seleção (linhas guia)



$$\frac{(\sigma)^{1/2}}{\rho}$$
$$\frac{\sigma}{\rho}$$

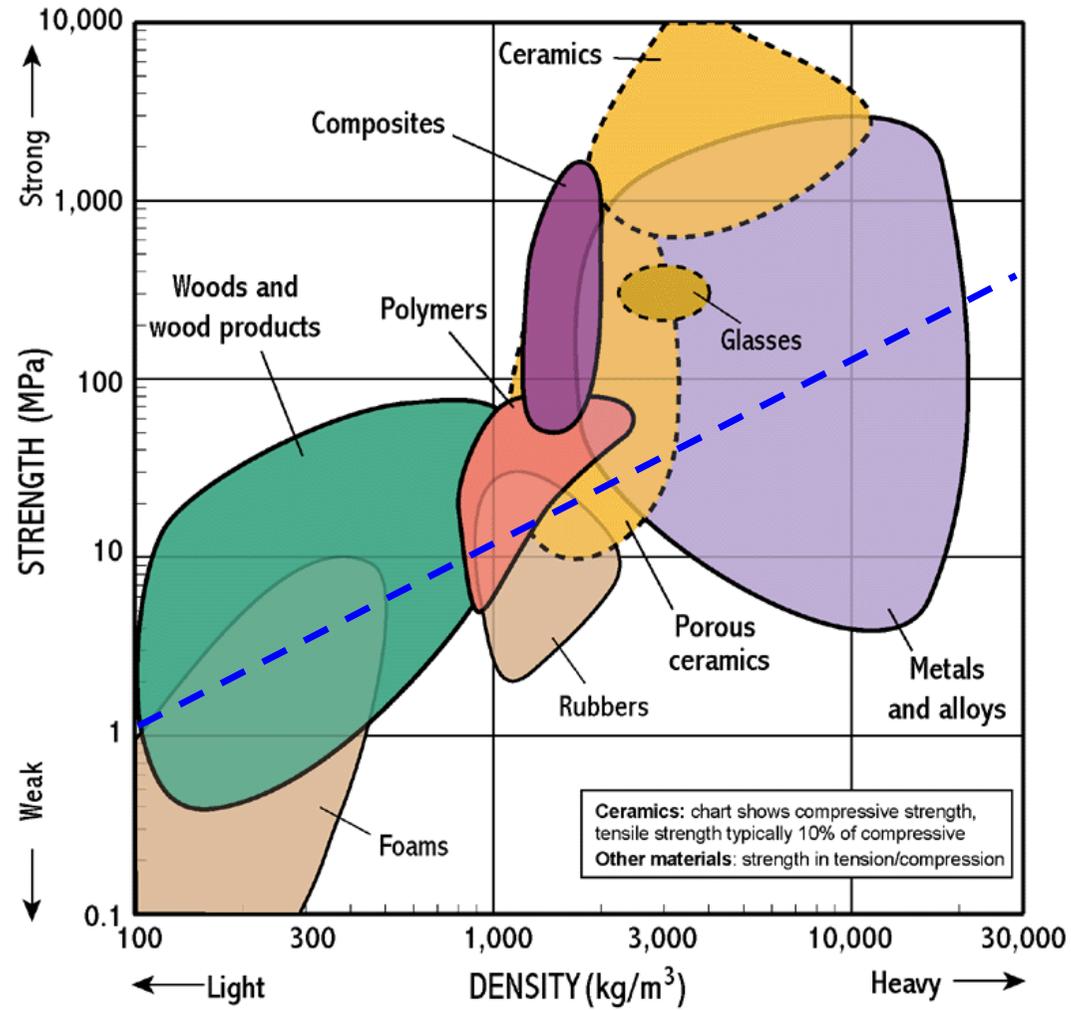
IMs
diferentes:

Inclinações
diferentes

Exemplo 2

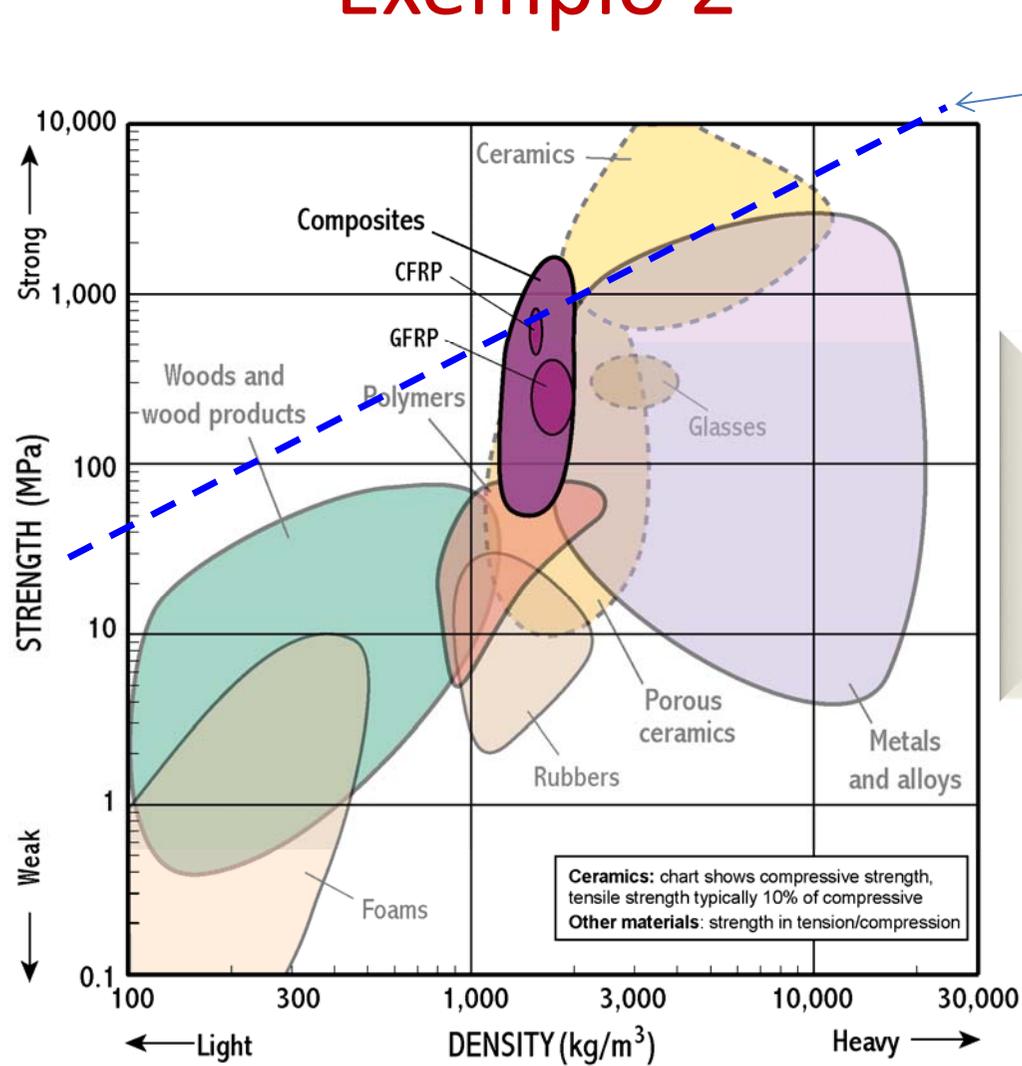
- Uma haste deve suportar somente esforços trativos num projeto aeronáutico. Considerando somente minimização de peso do componente, qual material é indicado na sua fabricação?
-

Exemplo 2



σ / ρ (Tração)

Exemplo 2



$$\frac{\sigma}{\rho} \text{ (Tração)}$$

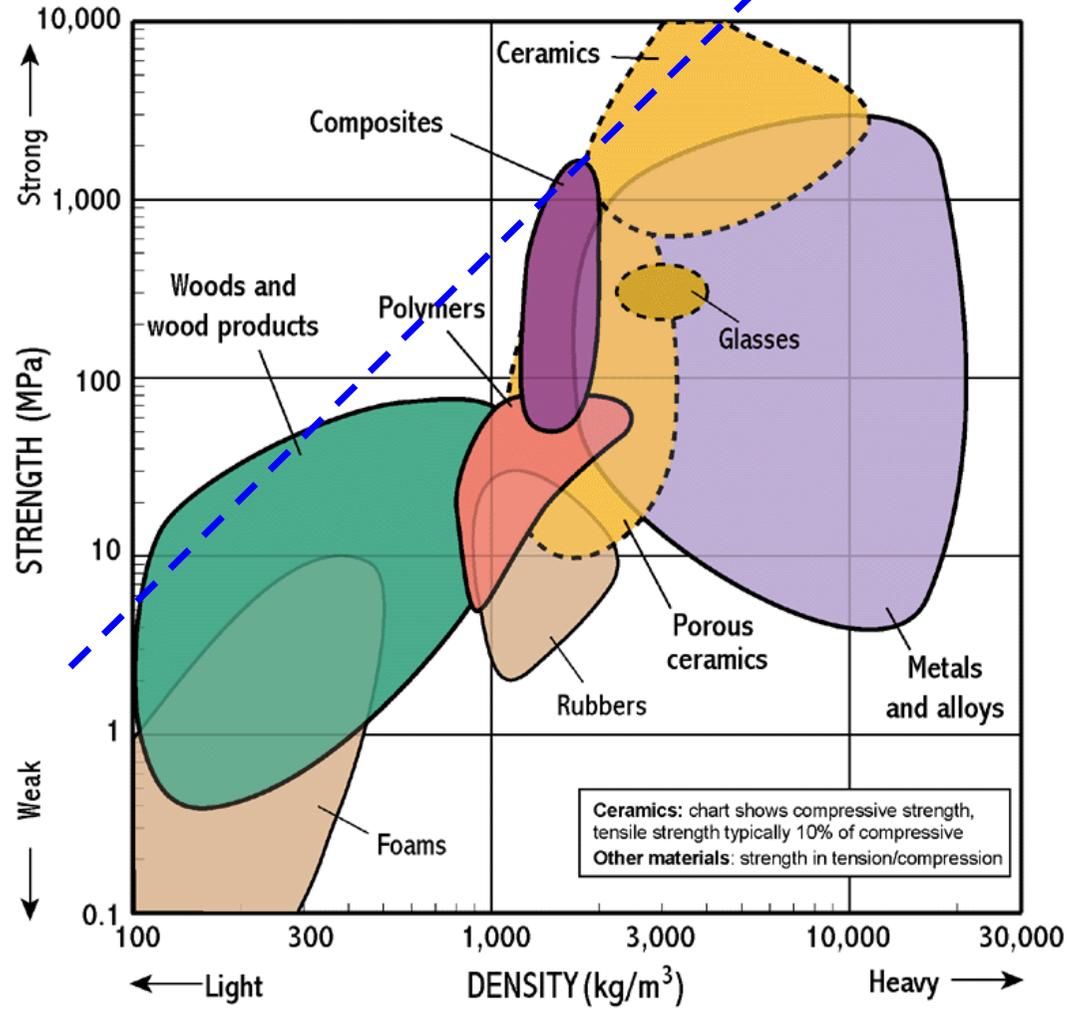
Maximizando a relação resistência/peso deslocar para cima a linha-guia (manter angulação)

Exemplo 3

- Supondo somente flexão, que materiais seriam adequados para minimizar o peso da asa de um avião?

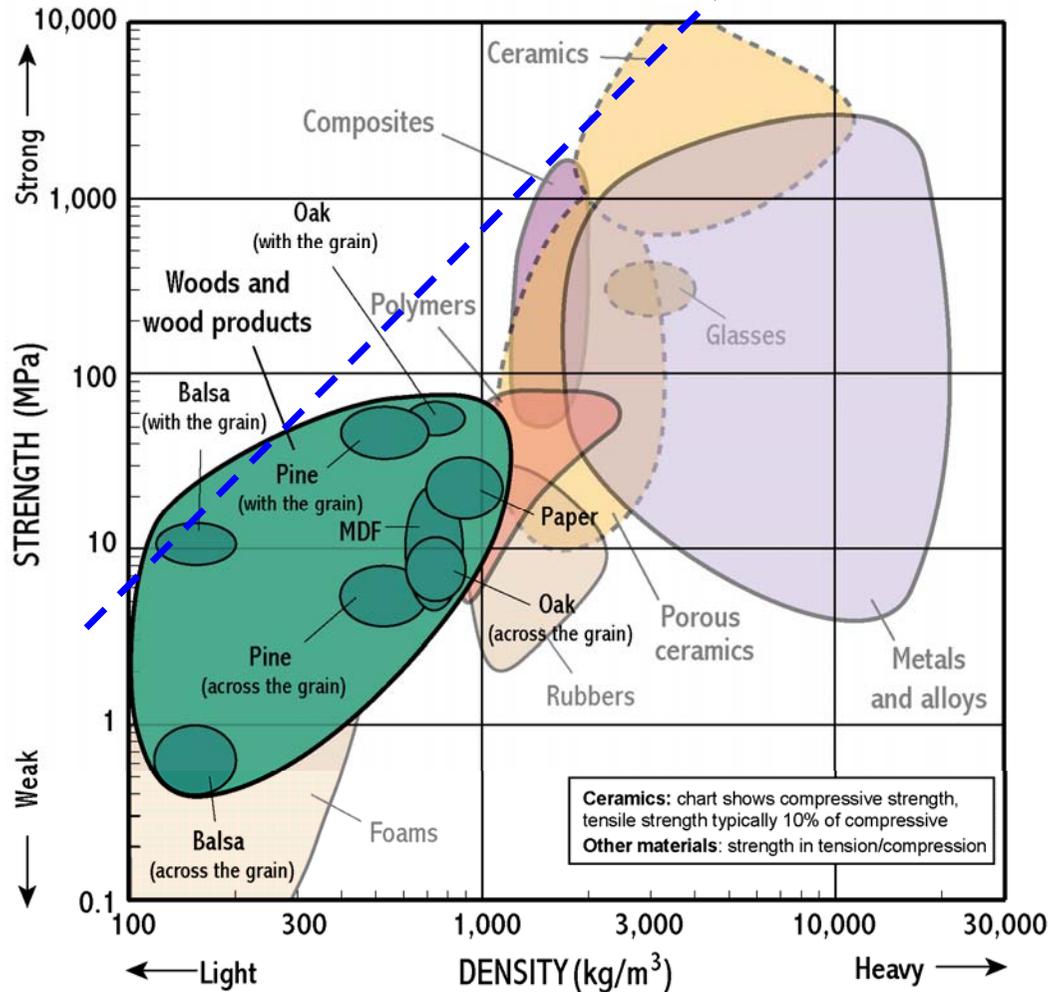
Exemplo 3

$$\frac{(\sigma)^{1/2}}{\rho}$$



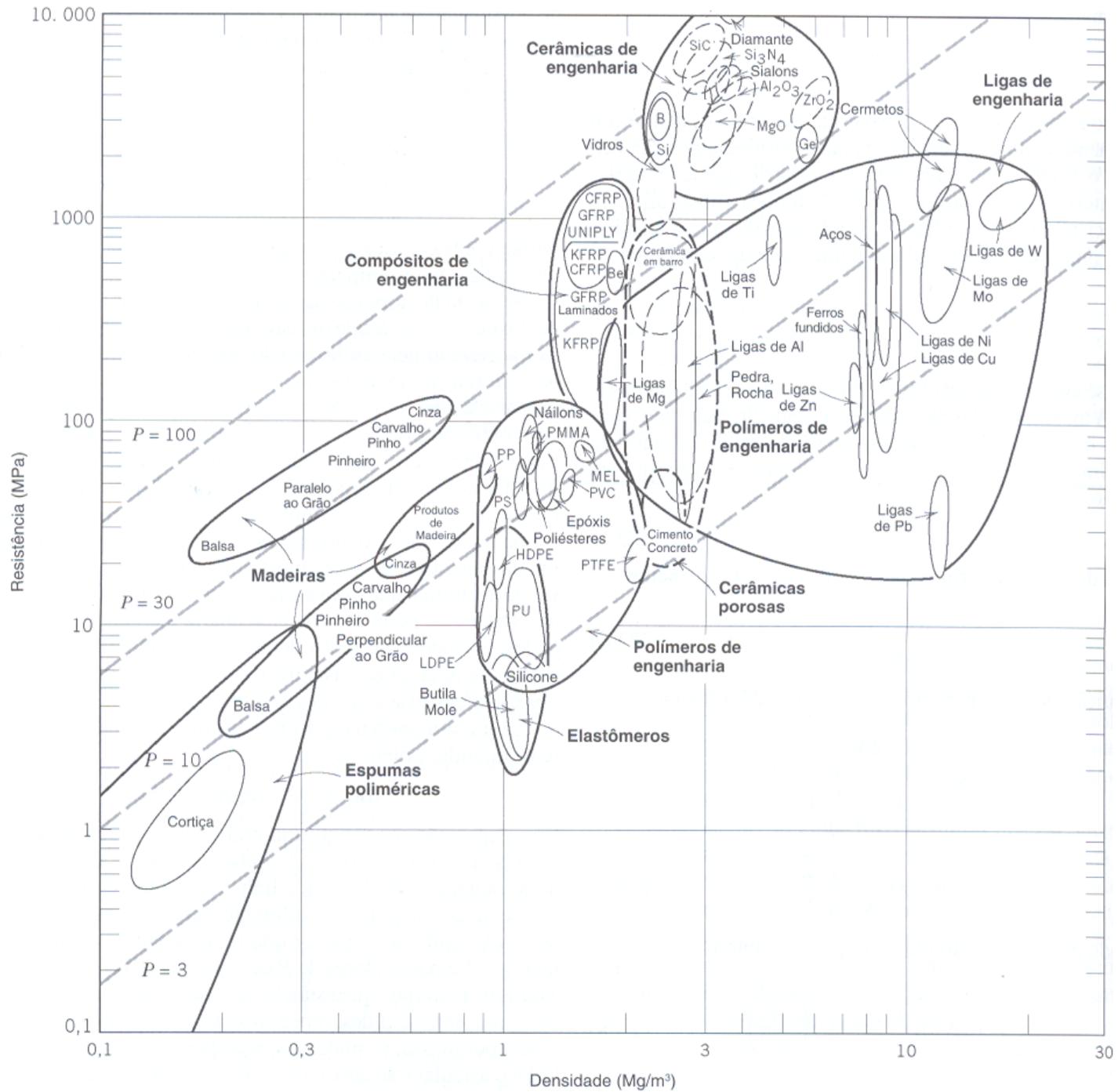
Exemplo 3

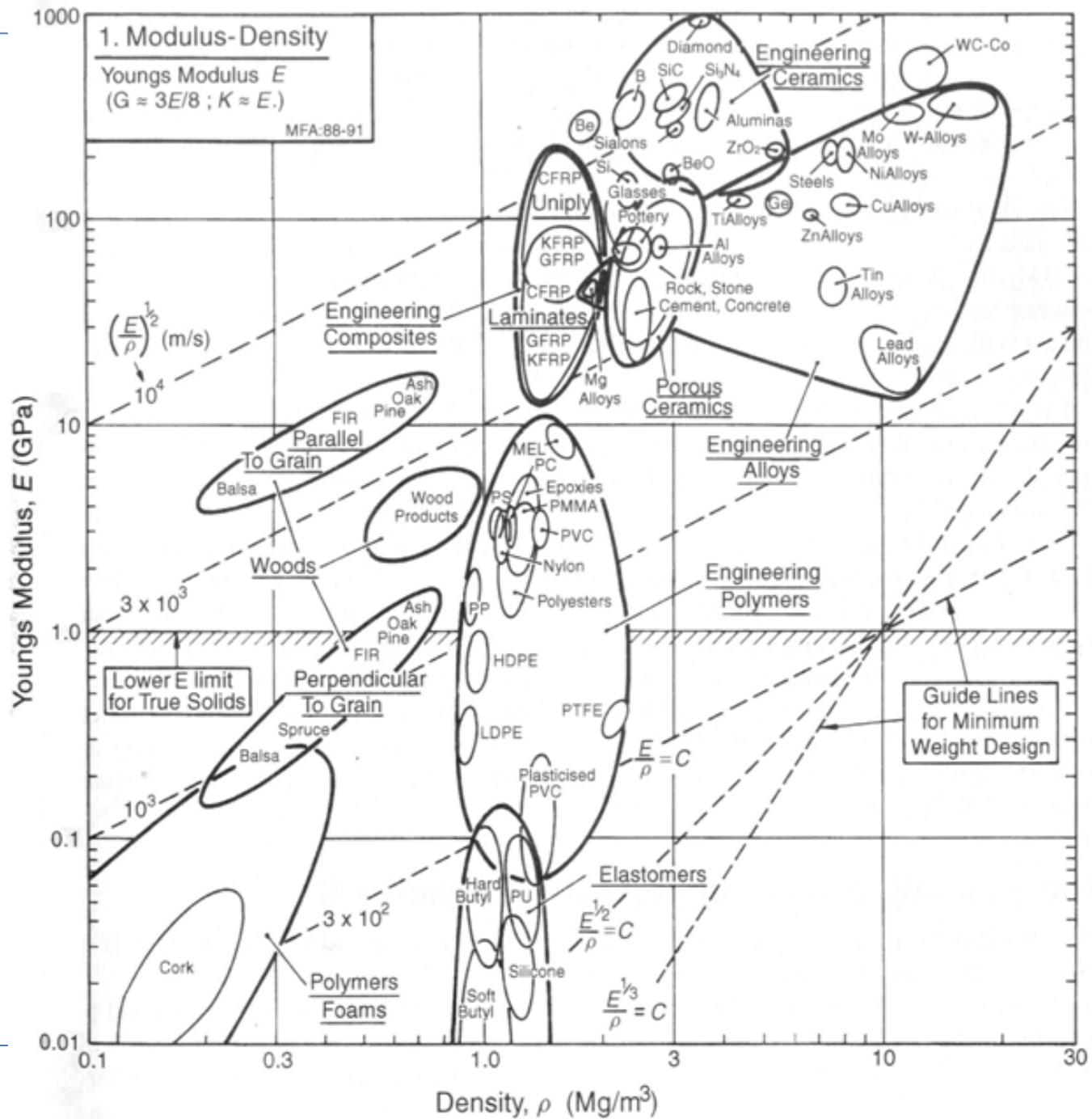
$$\frac{(\sigma)^{1/2}}{\rho}$$

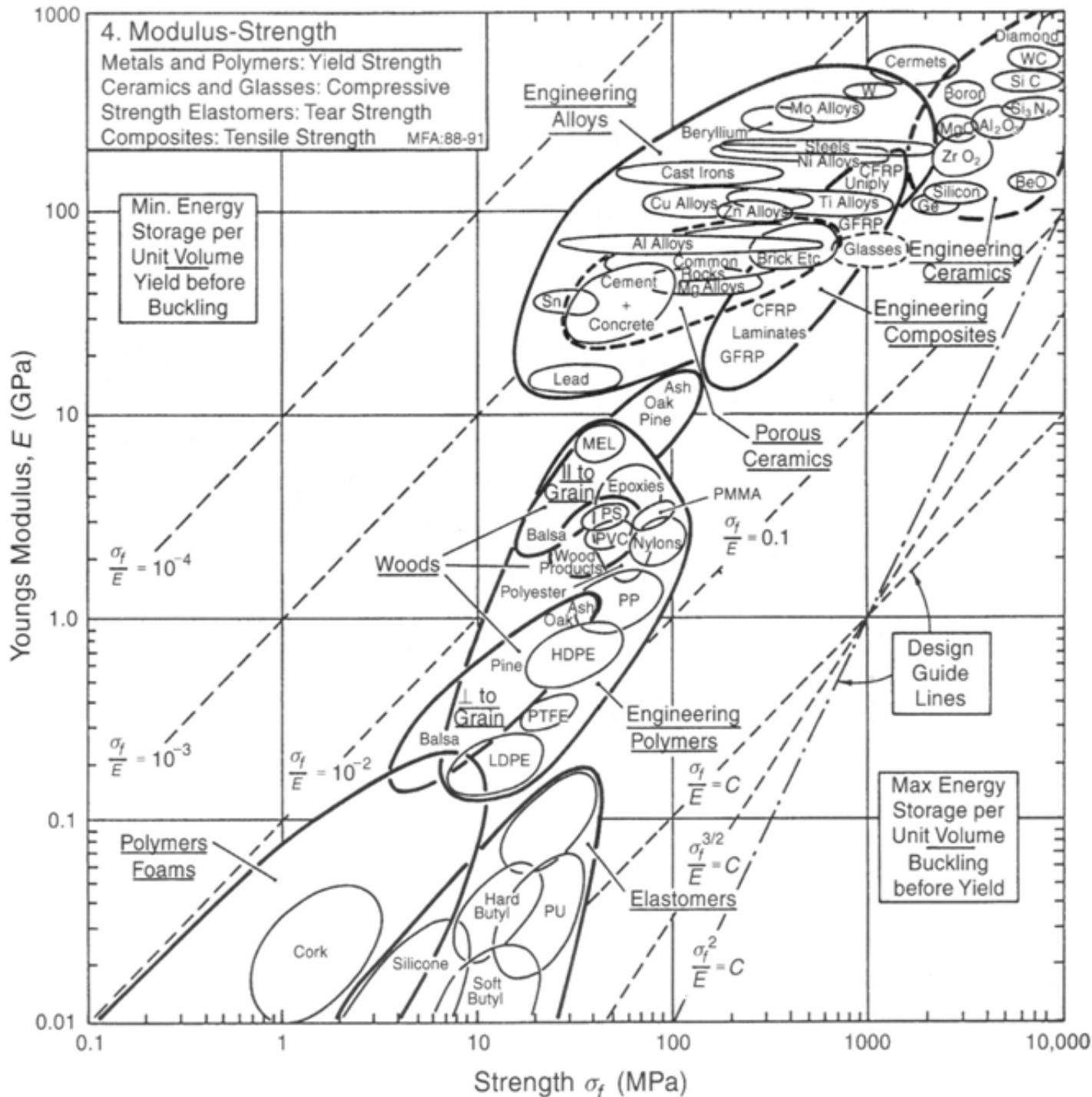


Madeira Balsa, Algumas cerâmicas (so em compressão). Não entra os compósitos de alta performance

Ma







Sumário da Aula

- Introdução
- Índice de Mérito
- Mapas (diagrama) de seleção de materiais
- Exemplos

Exemplo 4: Seleção de um Material

- É necessário projetar uma barra cilíndrica de determinado comprimento L , que suporte uma determinada força F de tração. Além disso deve ter o menor peso possível.
 - ✓ **Função:** Suportar uma força de tração
 - ✓ **Objetivo:** Peso mínimo
 - ✓ **Restrições:** Seção, comprimento e força de tração dadas

Exemplo 4: Seleção de um Material

- Função a minimizar:

$$m = \rho AL$$

- Constrangimento de resistência:

$$\sigma_f = \frac{F}{A}$$

- Eliminando a área:

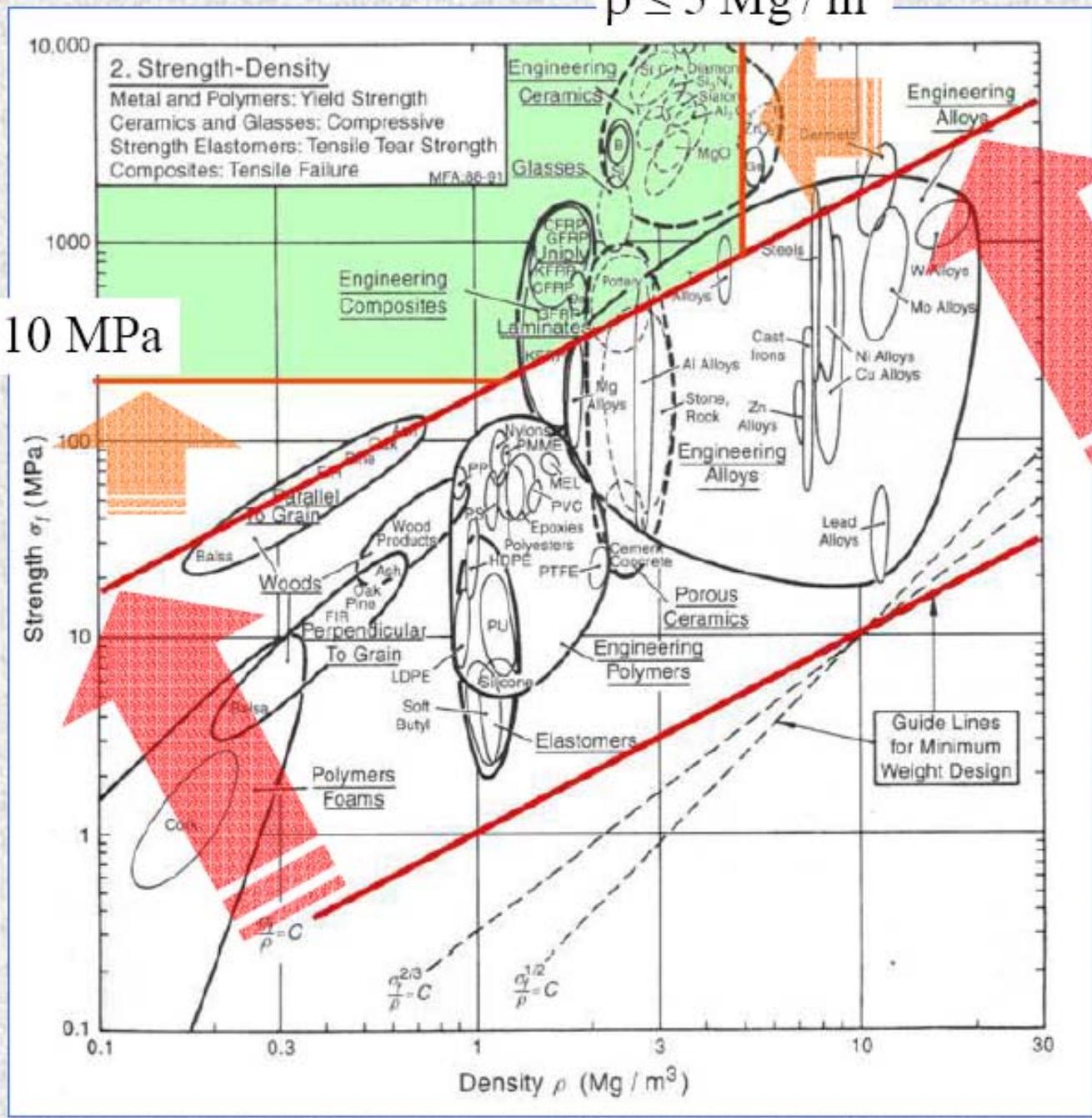
$$m = \rho \frac{F}{\sigma_f} L \quad \longrightarrow \quad m = F \frac{\rho}{\sigma_f} L$$

- Índice a maximizar:

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho}$$

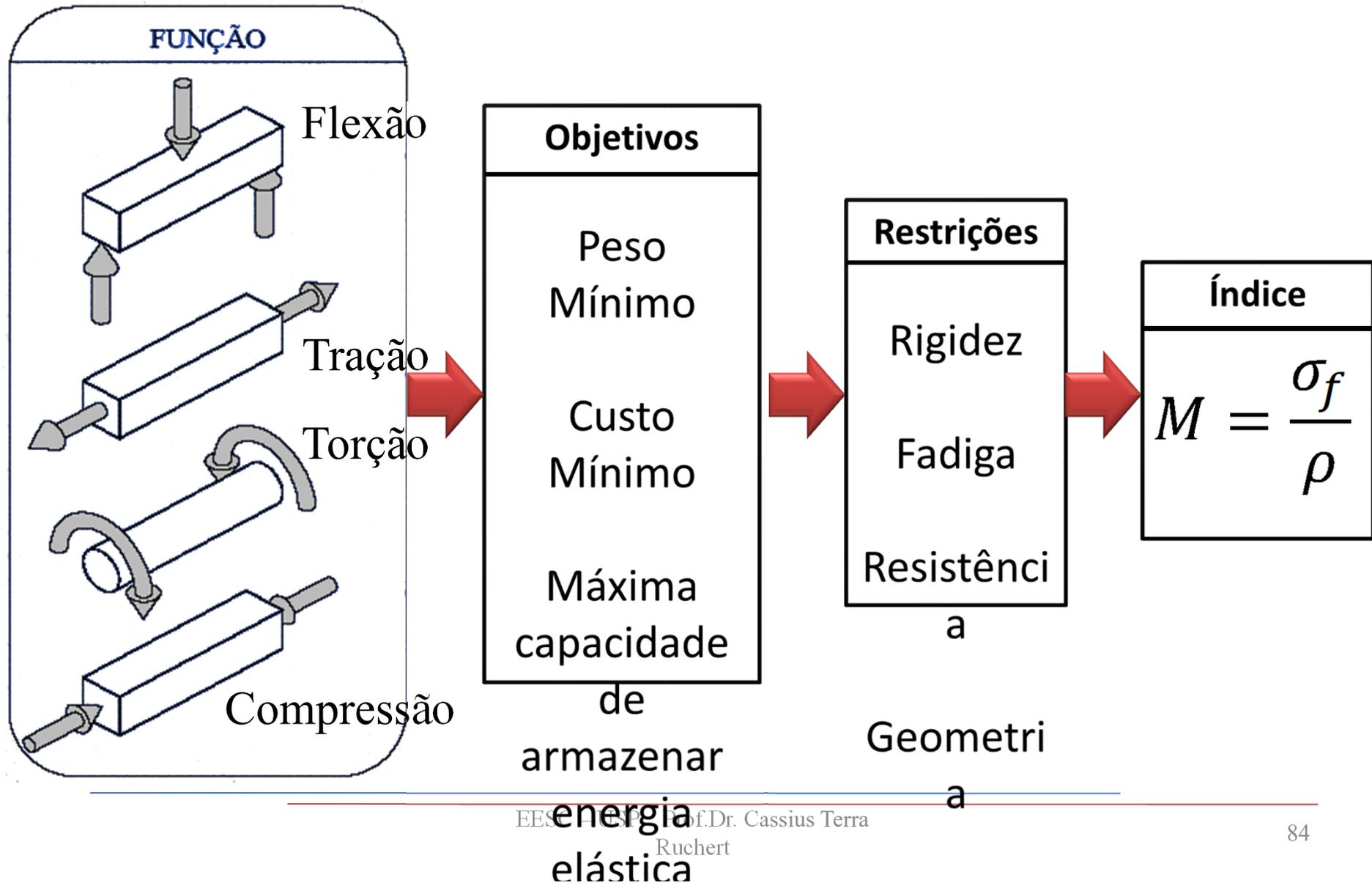
$$\rho \leq 5 \text{ Mg / m}^3$$

$$\sigma_f \geq 110 \text{ MPa}$$



RESISTÊNCIA VERSUS DENSIDADE

Obtenção do Índice de Mérito



Exemplo 5: Seleção de um Material

Selecione um material leve e resistente para um eixo cilíndrico sólido abaixo:

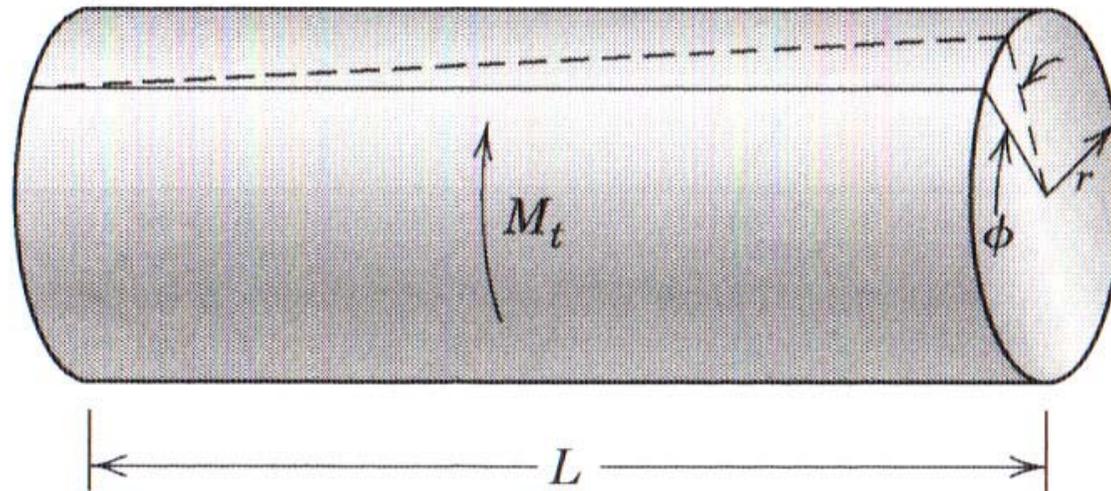


Figura 20.1 Um eixo cilíndrico sólido que experimenta um ângulo de torção ϕ em resposta à aplicação de um momento de torção M_t .

A aplicação de um momento (M_t) ou torque produz um ângulo de torção ϕ . A tensão de cisalhamento τ no raio r é definida pela equação:

$$\tau = \frac{M_t r}{J} \quad (1)$$

Onde J é o momento polar de inércia, onde para um cilindro sólido é dado por:

$$J = \frac{\pi r^4}{2} \quad (2)$$

Dessa forma, rearranjando as equações (1) e (2) teremos:

$$\tau = \frac{2M_t}{\pi r^3} \quad (3)$$

Projeto seguro: eixo sem fratura.

Para estabelecer critérios de seleção onde o objetivo é ser leve e resistente, alteramos a equação (3) introduzindo um coeficiente de segurança, N conforme:

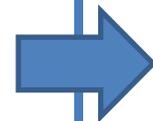
$$\frac{\tau_f}{N} = \frac{2M_t}{\pi r^3} \quad (4)$$

Levando em consideração a massa ($m=\rho*V$) e sabendo-se que o volume do cilindro $V=\pi r^2L$, logo:

$$m = \pi r^2 L \rho \quad (5)$$

Ou o raio do eixo em termos de sua massa é dado:

$$r = \sqrt{\frac{m}{\pi L \rho}} \quad (6)$$



A substituição desta expressão em função de r da equação (4) leva a:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_f}{N} &= \frac{2 M_t}{\pi \left(\sqrt{\frac{m}{\pi L \rho}} \right)^3} \\ &= 2 M_t \sqrt{\frac{\pi L^3 \rho^3}{m^3}} \end{aligned} \quad (7)$$

Resolvendo a expressão anterior (7) em função da massa m , obtemos:

$$m = (2NM_t)^{\frac{2}{3}} \left(\pi^{\frac{1}{3}} L \right) \left(\frac{\rho}{\tau_f^{2/3}} \right) \quad (8)$$

Relação com o funcionamento seguro do eixo

Parâmetro geométrico

Propriedades do Material

Conclusão: Melhores materiais serão os que possuírem baixas razões $\rho/\tau_f^{2/3}$

Em termos de adequação de um material, algumas vezes é preferível trabalhar com o índice de desempenho (mérito) que consiste simplesmente no inverso da razão $\rho/\tau_f^{2/3}$, ou seja:

$$D = \frac{\tau_f^{2/3}}{\rho} \quad (9)$$



Tomando o logarítmo da equação (9) teremos:

$$\log \tau_f = \frac{3}{2} \log \rho + \frac{3}{2} \log D \quad (10) \rightarrow \text{Reta em um gráfico di-log}$$

Coef. angular

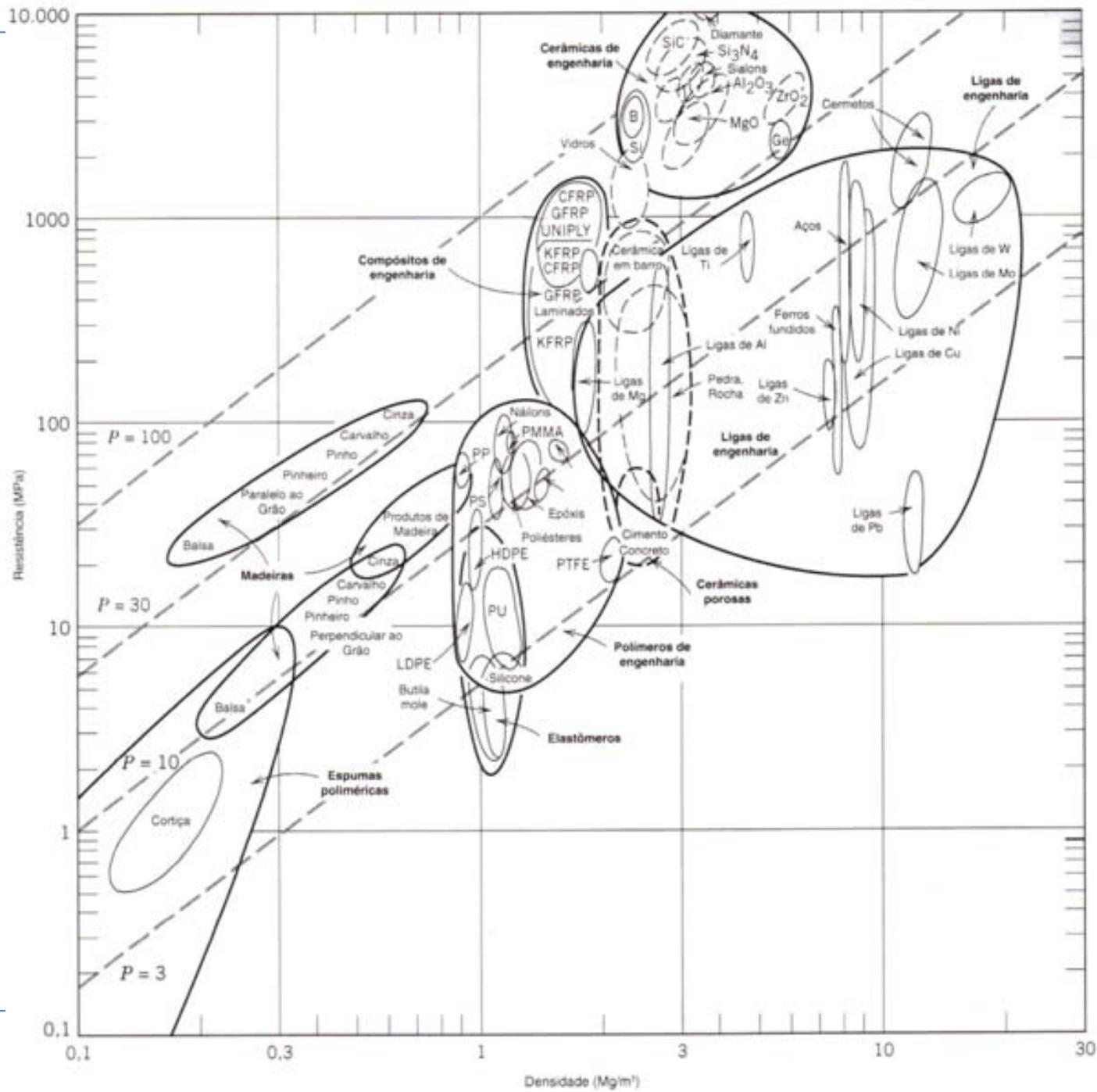


Tabela 20.1 Densidade (ρ), Resistência (τ_f) e Índice de Desempenho (P) para Cinco Materiais de Engenharia

<i>Material</i>	ρ (Mg/m ³)	τ_f (MPa)	$\frac{\tau_f^{2/3}}{\rho} = P = D = I$ [(MPa) ^{2/3} m ³ /Mg]
Compósito reforçado com fibras de carbono (fração de fibras de 0,65) ^a	1,5	1140	72,8
Composito reforçado com fibras de vidro (fração de fibras de 0,65) ^a	2,0	1060	52,0
Liga de alumínio (2024-T6)	2,8	300	16,0
Liga de titânio (Ti-6Al-4V)	4,4	525	14,8
Aço 4340 (temperado em óleo e revenido)	7,8	780	10,9

^a As fibras nesses compósitos são contínuas, alinhadas e estão enroladas segundo um padrão helicoidal em um ângulo de 45° em relação à linha de centro do eixo.



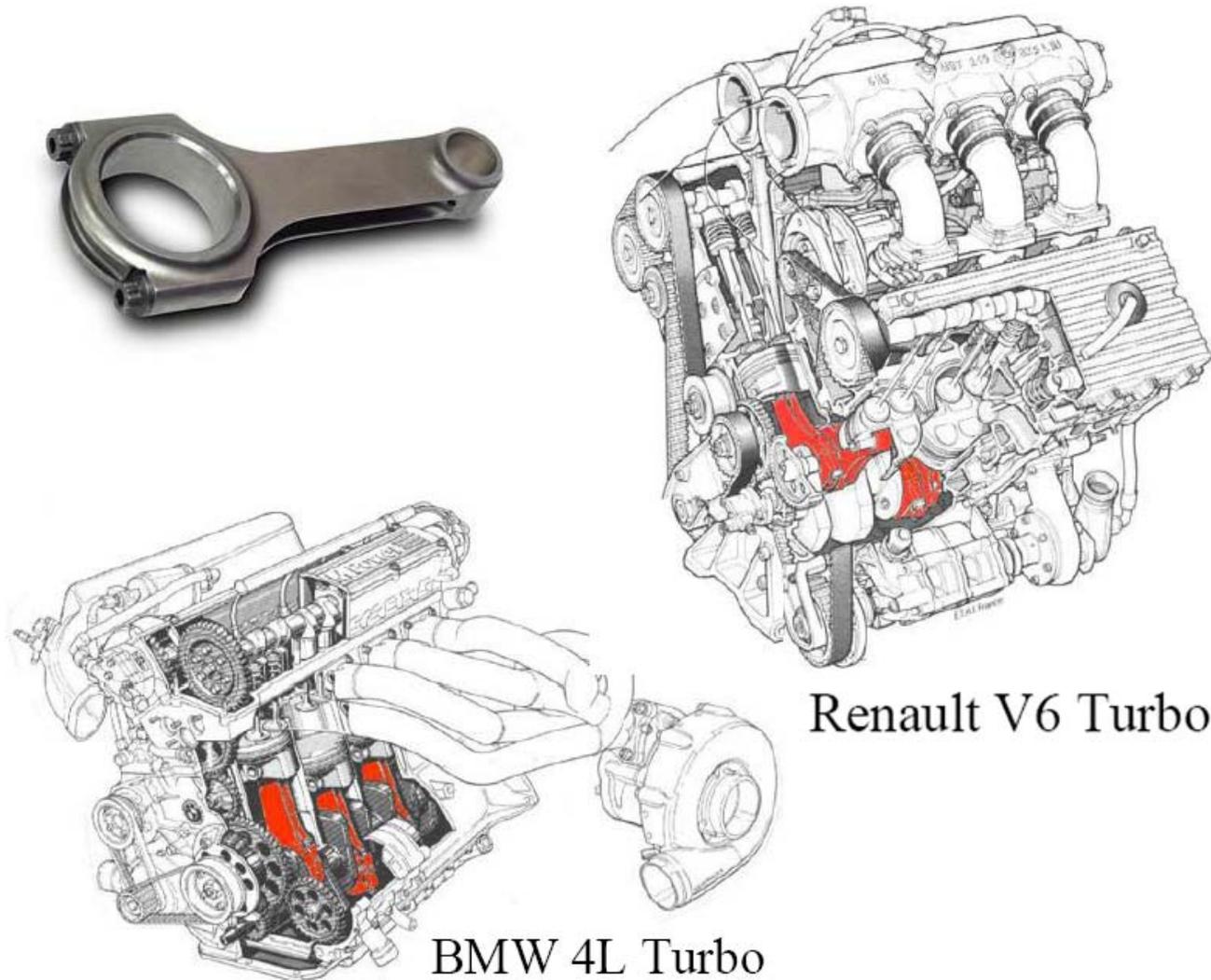
Tabela 20.2 Tabulação da Razão $\rho/\tau_f^{2/3}$, do Custo Relativo (\bar{c}) e do Produto entre $\rho/\tau_f^{2/3}$ e \bar{c} para Cinco Materiais de Engenharia^a

<i>Material</i>	$\rho/\tau_f^{2/3}$ [10 ⁻² {Mg/(MPa) ^{2/3} m ³ }]	\bar{c} (\$/\$)	$\bar{c}(\rho/\tau_f^{2/3})$ [10 ⁻² (\$/\$){Mg/(MPa) ^{2/3} m ³ }]
Aço 4340 (temperado em óleo e revenido)	9,2	5	46
Compósito reforçado com fibras de vidro (fração de fibras de 0,65) ^b	1,9	40	76
Liga de alumínio (2024-T6)	6,2	15	93
Compósito reforçado com fibras de carbono (fração de fibras de 0,65) ^b	1,4	80	112
Liga de titânio (Ti-6Al-4V)	6,8	110	748

^a O custo relativo é a razão entre os preços por unidade de massa do material e de um aço carbono comum com baixo teor de carbono.

^b As fibras nesses compósitos são contínuas, alinhadas e estão enroladas segundo um padrão helicoidal em um ângulo de 45° em relação à linha de centro do eixo.

Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela



Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela

- Projetar uma biela de seção retangular com comprimento L , que suporte uma força F com o menor peso possível
 - ✓ **Função:** Suportar uma força de tração/compressão
 - ✓ **Objetivo:** Peso mínimo
 - ✓ **Restrições:**
 - Seção (A), comprimento (L) e força (F) de tração são dadas
 - Tensão limite de fadiga (gera um Índice de Mérito para tensão de fadiga)
 - Instabilidade elástica (gera um outro Índice de Mérito para E)

Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela

- Função a minimizar:

$$m_1 = \rho AL \quad (1)$$

- Constrangimento de tensão limite de fadiga:

$$F/A \leq \sigma_{LF} \quad (2)$$

- Eliminando a área, logo (1) e (2):

$$m_1 = FL \left(\rho / \sigma_{LF} \right) \quad (3)$$

- **Índice a maximizar:**

$$M_1 = \left(\sigma_{LF} / \rho \right)$$

- Função a minimizar:

$$m_2 = \rho AL \quad (1)$$

- Constrangimento de instabilidade elástica:

$$F/A \leq \pi^2 EI / L^2 \quad (2)$$

- Eliminando a área, logo (1) e (2):

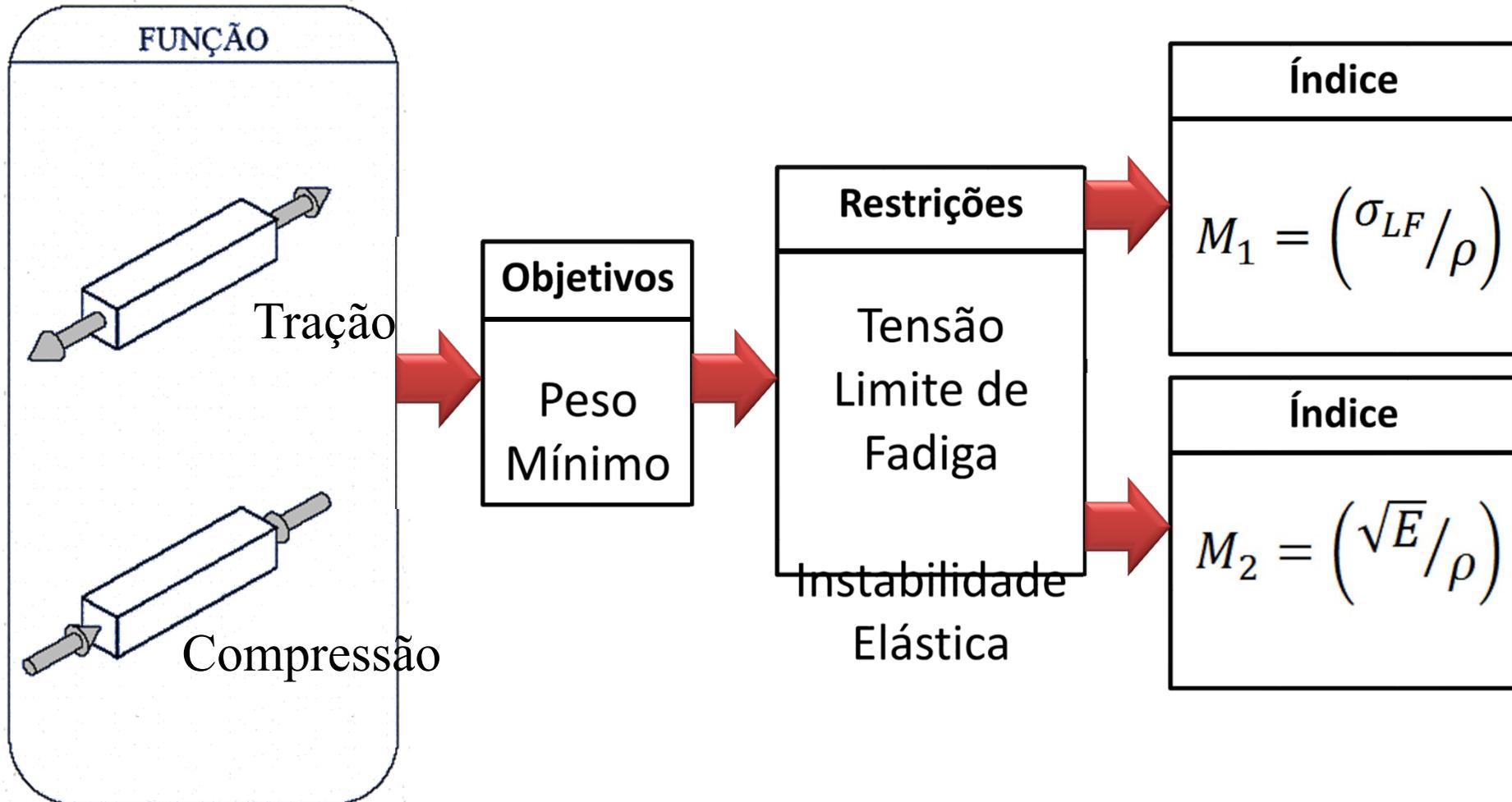
$$m_2 = \sqrt{12F / \alpha \pi^2} (L^2) \left(\rho / \sqrt{E} \right)$$

- **Índice a maximizar:**

$$M_2 = \left(\sqrt{E} / \rho \right)$$

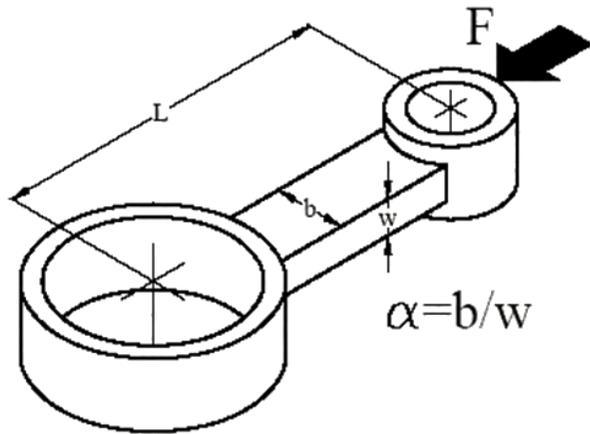
Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela

- Obtenção dos índices de mérito



Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela

- Método Analítico:



$$m_1 = FL \left(\frac{\rho}{\sigma_{LF}} \right)$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{12F}{\alpha\pi^2} (L^2)} \left(\frac{\rho}{\sqrt{E}} \right)$$

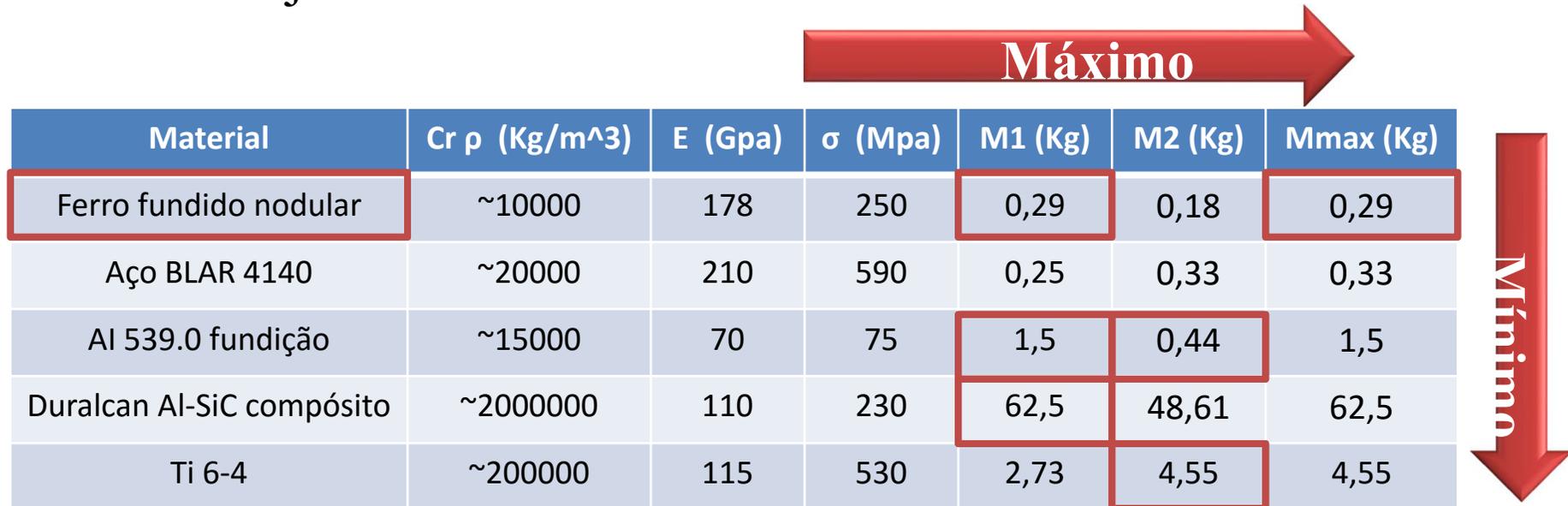
Máximo →

Material	ρ (Kg/m ³)	E (Gpa)	σ (Mpa)	M1 (Kg)	M2 (Kg)	Mmax (Kg)
Ferro fundido nodular	7150	178	250	0,21	0,13	0,21
Aço BLAR 4140	7850	210	590	0,1	0,13	0,13
Al 539.0 fundição	2700	70	75	0,27	0,08	0,27
Duralcan Al-SiC compósito	2880	110	230	0,09	0,07	0,09
Ti 6-4	4400	115	530	0,06	0,1	0,1

↓ **Mínimo**

Exemplo 6: Seleção de Material para uma Biela

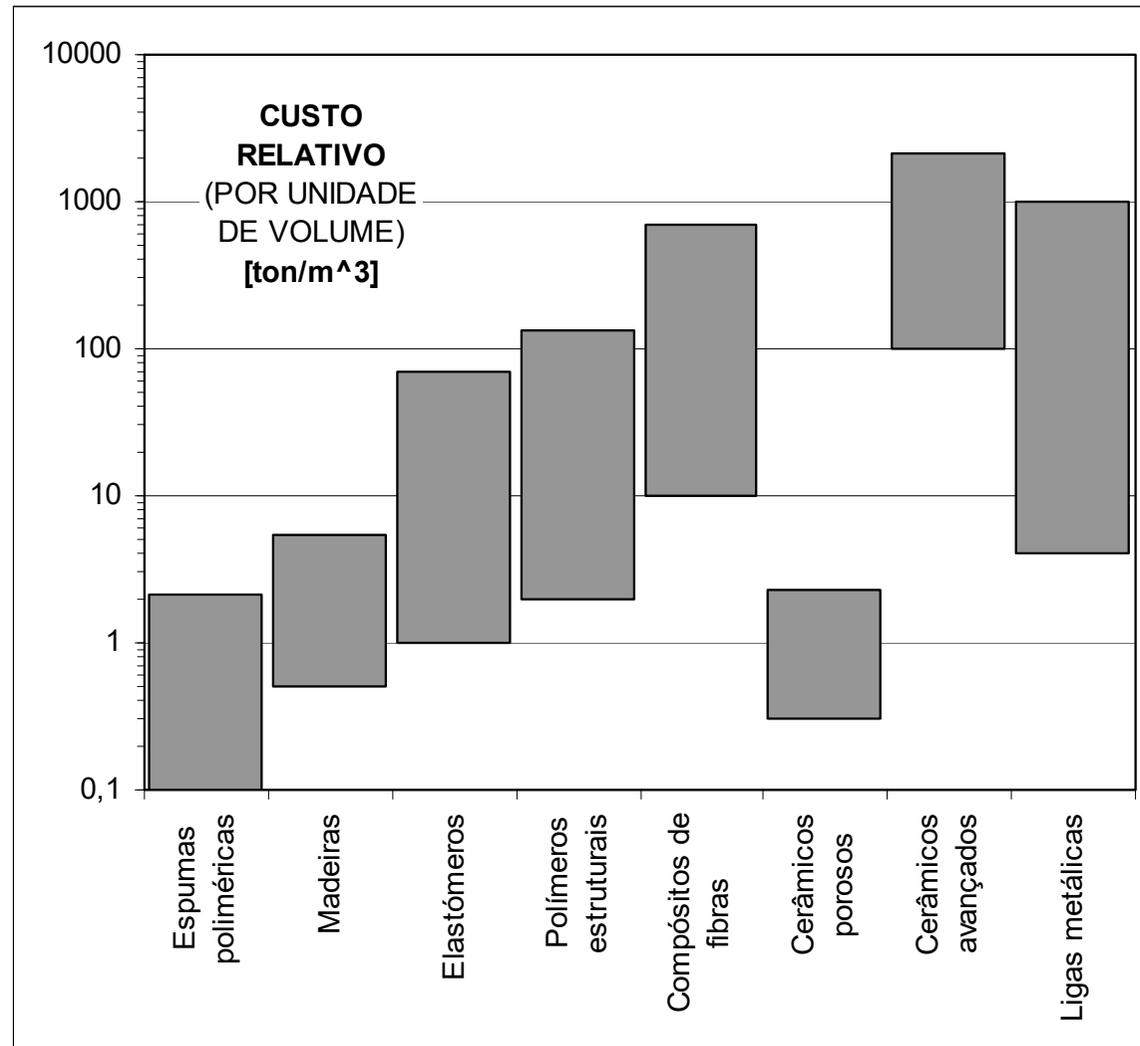
- Conclusão:
Mas normalmente, nos carros do dia-a-dia, as bielas são feitas em ferro fundido!
- Se o objetivo for o menor custo:



Material	Cr ρ (Kg/m ³)	E (Gpa)	σ (Mpa)	M1 (Kg)	M2 (Kg)	Mmax (Kg)
Ferro fundido nodular	~10000	178	250	0,29	0,18	0,29
Aço BLAR 4140	~20000	210	590	0,25	0,33	0,33
Al 539.0 fundição	~15000	70	75	1,5	0,44	1,5
Duralcan Al-SiC compósito	~2000000	110	230	62,5	48,61	62,5
Ti 6-4	~200000	115	530	2,73	4,55	4,55

Seleção de Material

Custo relativo por unidade de volume para diversos grupos de materiais



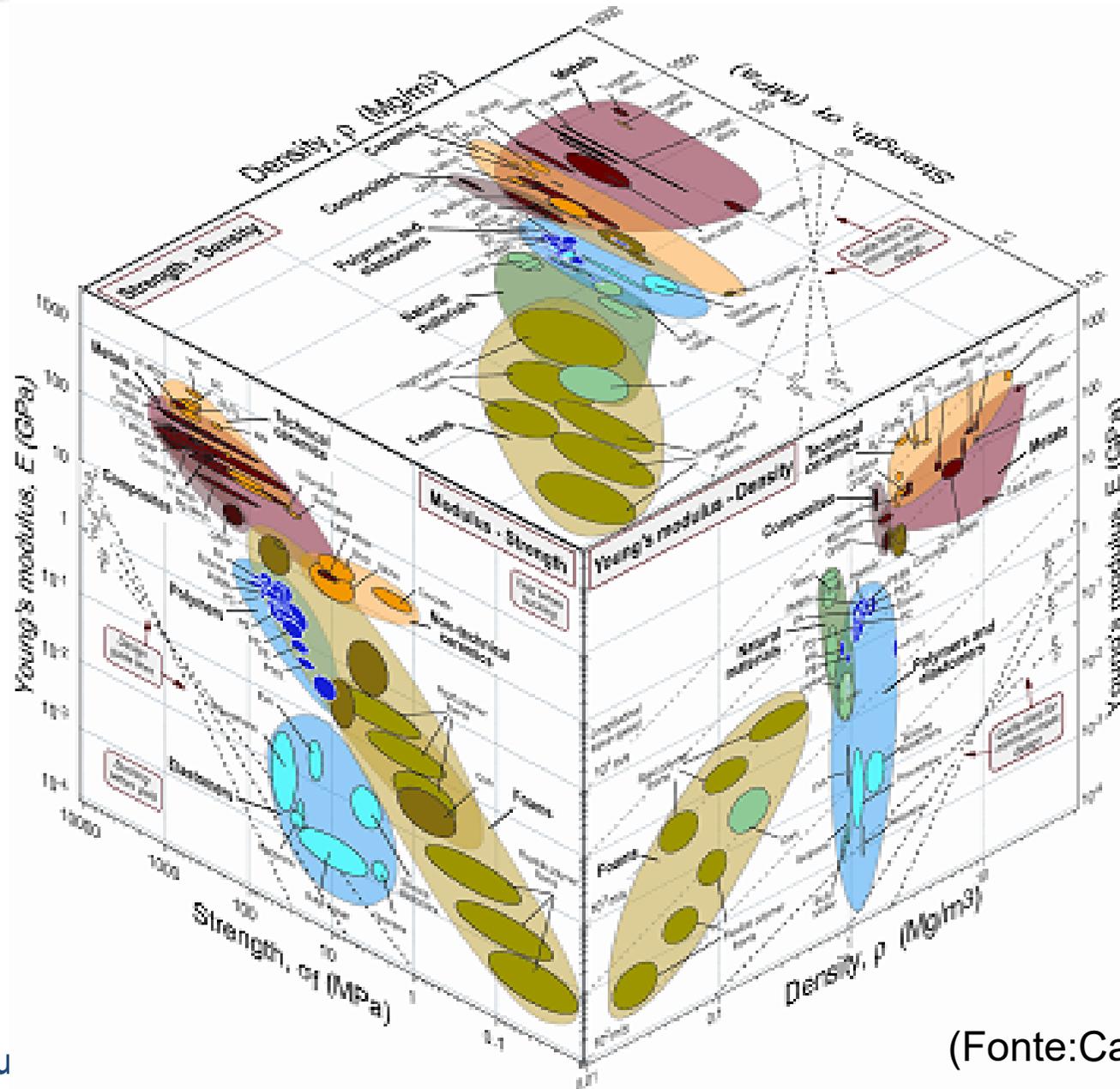


CUSTO

Seleção de Materiais

Material	Preço (US\$/tonelada)
Diamante industrial de alta qualidade	500.000.000
Platina	16.500.000
Ouro	14.500.000
Tungstênio	19.500
Titânio	8.300
Latão (60%Cu - 40%Zn)	3.750
Alumínio	2.400
Aço inoxidável	2.700
Aço doce	350
Carboneto de silício (cerâmica avançada)	27.500
Carboneto de silício (abrasivos)	1.400
Carboneto de silício (refratários)	750
Vidro	750
Borracha sintética	1.400
Borracha natural	870
Polietileno	1.100
PVC	1.000
Fibra de vidro	1.500
Fibra de carbono	45.000
Resina epoxídica	6.000
Madeira compensada dura	1.650
Madeira dura estrutural	530
Madeira mole estrutural	350
Vigas de concreto reforçado	330
Cimento	70
Silício monocristalino ("Wafers")	10.000.000
Silício metalúrgico	1.300

Seleção de Materiais



**QUANDO A SELEÇÃO DO
MATERIAL FALHA...**



Seleção de Materiais

- **Navios Liberty (1943):**
 - 2700 Navios Construídos**
 - 400 Navios com Falhas**
 - 90 Navios com Falhas Severas**
 - 20 Navios com Falhas Catastróficas**

Seleção de Materiais

Navios *Liberty*



**Falhas Catastróficas Associadas a Detalhes Estruturais,
Especificação de Materiais e Soldagem Inadequados**

Seleção de Materiais

TITANIC

13/04/1912



Prof. Dr.

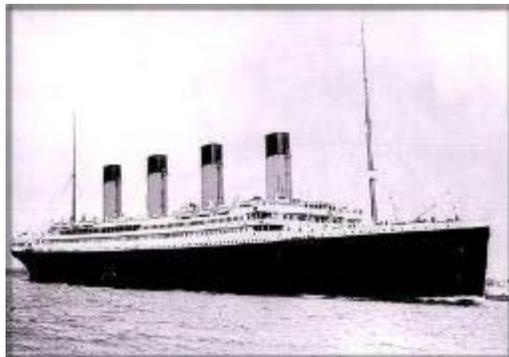
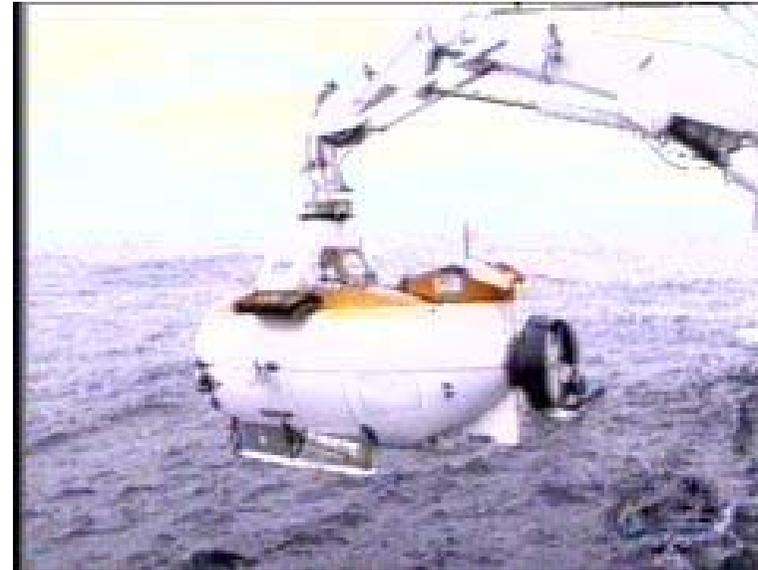
Survivor: *Millie Dean*

R.M.S. TITANIC *Departure from Queenstown*

Colin Varty R.S.M.A.

Obtenção das amostras

- Em 1996, pesquisadores utilizando submarinos robôs trouxeram pedaços de aço do casco do TITANIC para análise metalúrgica.



Seleção de Materiais

TITANIC



Partes do Titanic
(N. Chawla – 2007)

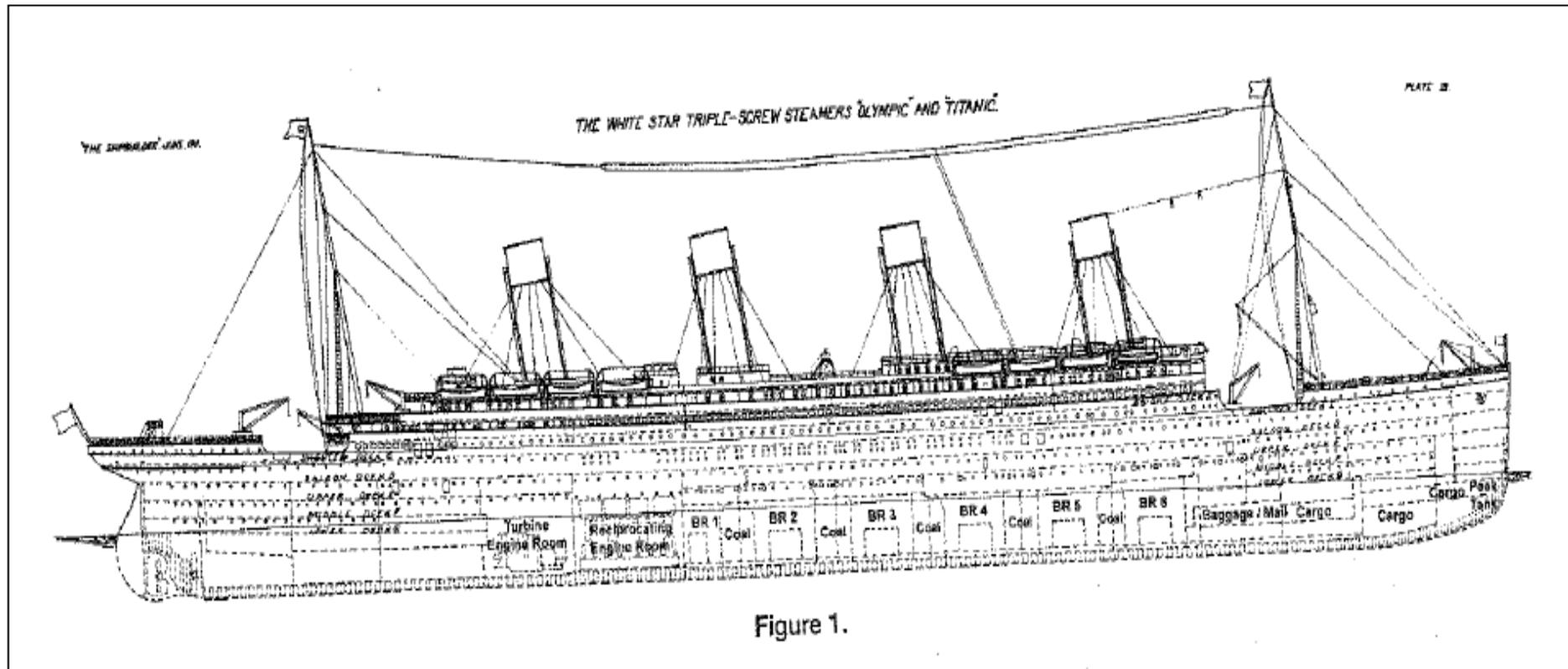


HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

TITANIC- ABRIL, 1912

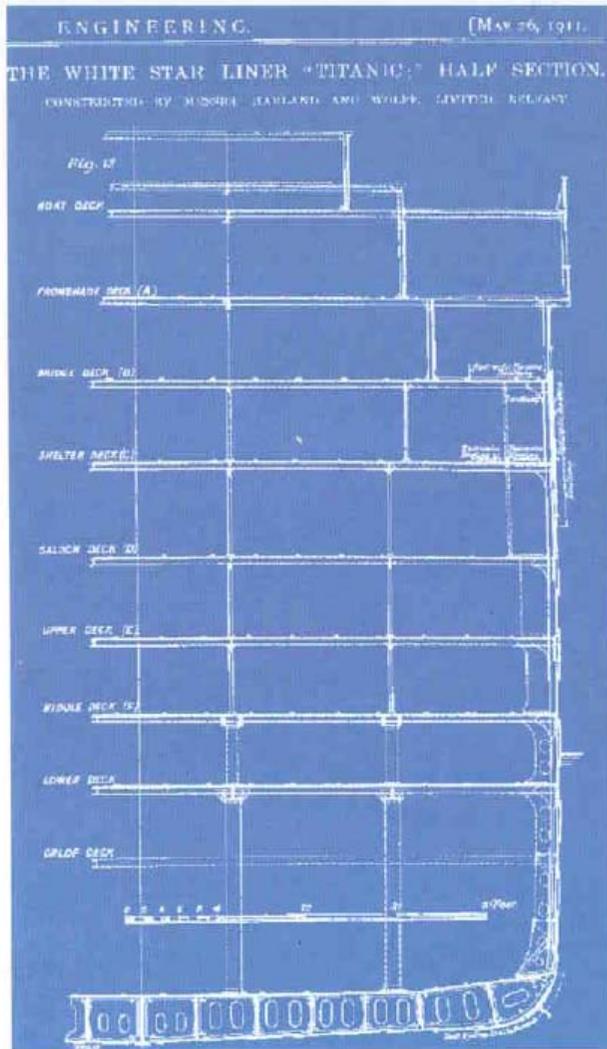


Compartimentado-rebites: compartimentos separados.

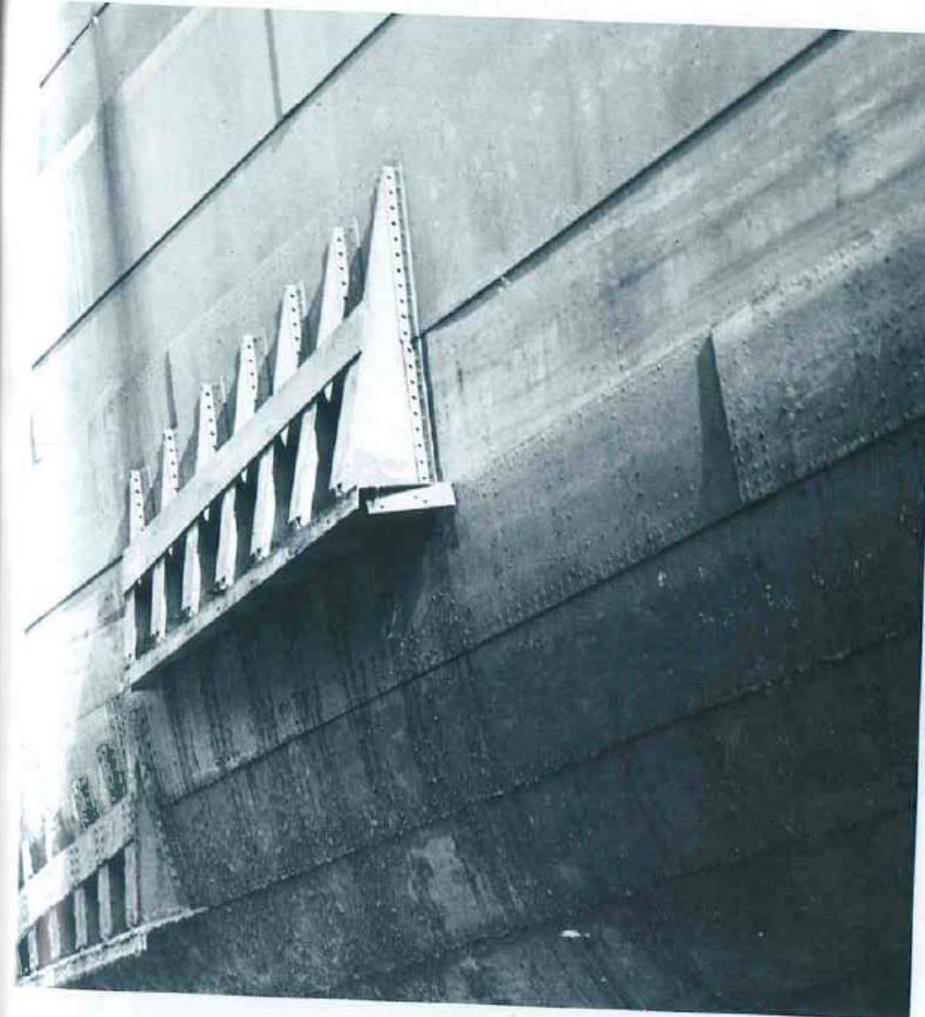


Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

TITANIC- ABRIL, 1912



A blueprint of the *Titanic's* hull showing all nine decks in cross section.



This photo taken during *Titanic's* construction shows the joggled surface that was created by *Titanic's* overlapping steel plates. (Harland and Wolff Photographic Collection, © National Museums Northern Ireland, Ulster Folk Transport Museum)

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS



TITANIC- ABRIL, 1912

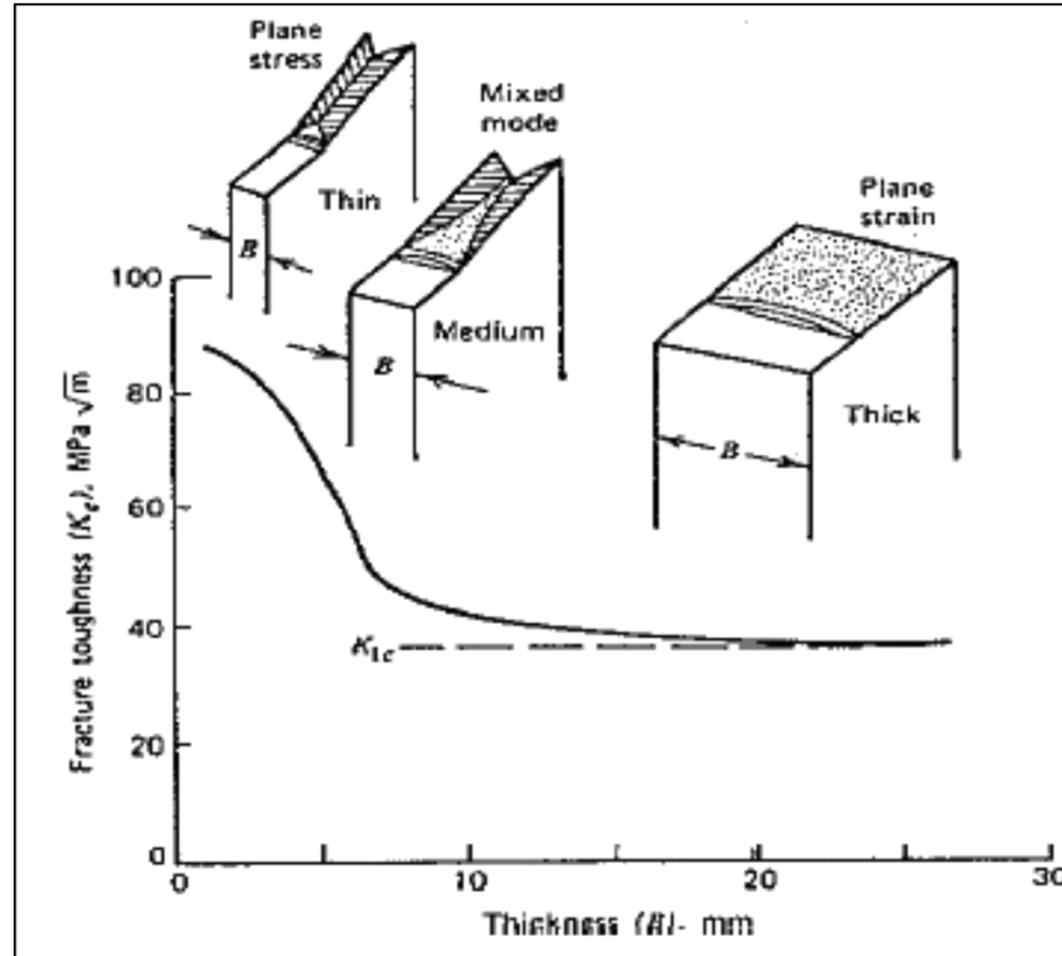
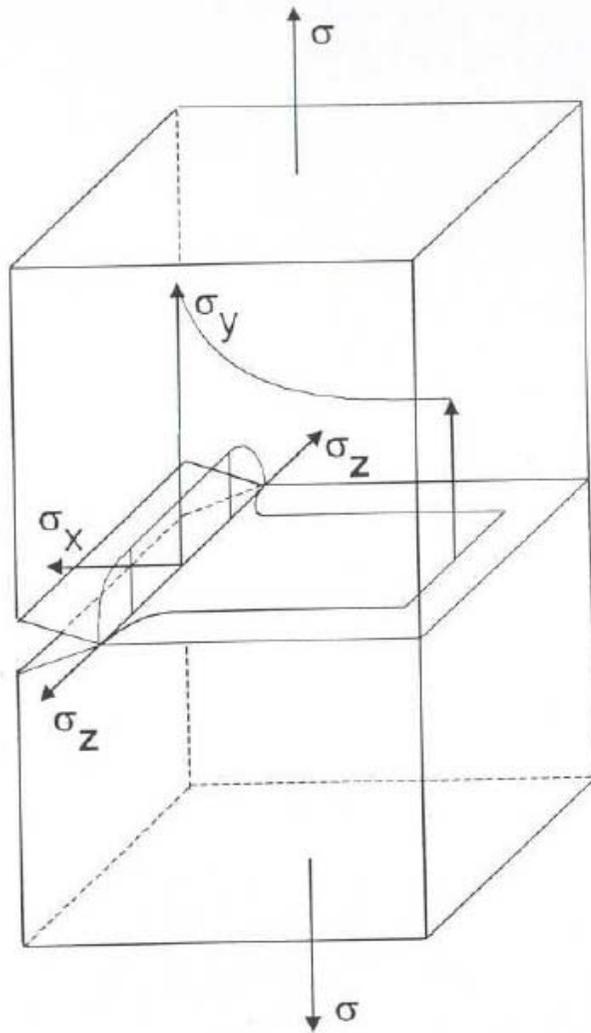
- Fatos: na noite de 14 de abril de 1912 às **23h40min** a tripulação visualizou o Iceberg de 50 a 300.000 ton- **após 40 s** houve a colisão;
- Às **2h20min** ocorreu o afundamento com mais de 1500 vítimas.
- Análise do Titanic (1991-2008): **Dr. Tim Foeck e Dra. Jennifer Hooper McCarty**;
- Duas **principais** teorias:
 - **Qualidade do aço** do casco somado à **falta de conhecimento da mecânica de fratura**;
 - **Qualidade dos rebites**.

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

Desconhecimento da Mecânica de Fratura:

- **Temperatura de transição frágil-dúctil é levantado com cp de impacto- secção de (10x10)mm;**
- **Baseados nisso aumentaram a espessura das chapas para construção no navio (50mm)- maior espessura- estado plano de tensões passa para estado plano de deformações-aumenta a criticidade do estado triaxial de tensões.**

ESTADO TRIAXIAL



Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

TITANIC- ABRIL, 1912



Análise do aço:

Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N	Mn-to-S Ratio
<i>Titanic Hull Plate</i>	0.21	0.47	0.045	0.069	0.017	0.024	0.013	0.0035	6.8:1
ASTM 36	0.20	0.55	0.012	0.037	0.007	0.01	0.079	0.0032	14.9:1

- No aço do casco do TITANIC constata-se teores elevados de P, S que associados ao baixo teor de Mn (baixa relação Mn/S) são responsáveis pela maior tendência ao comportamento frágil em baixas temperaturas .

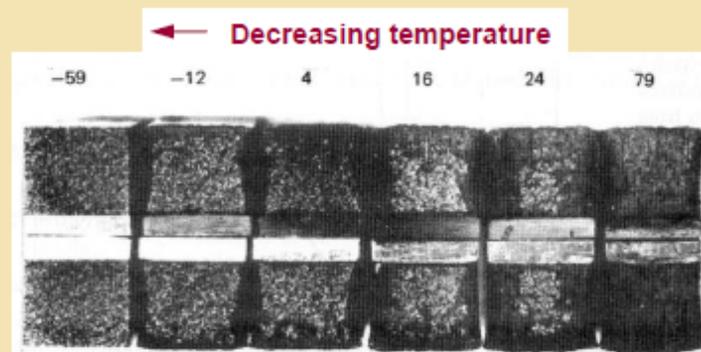
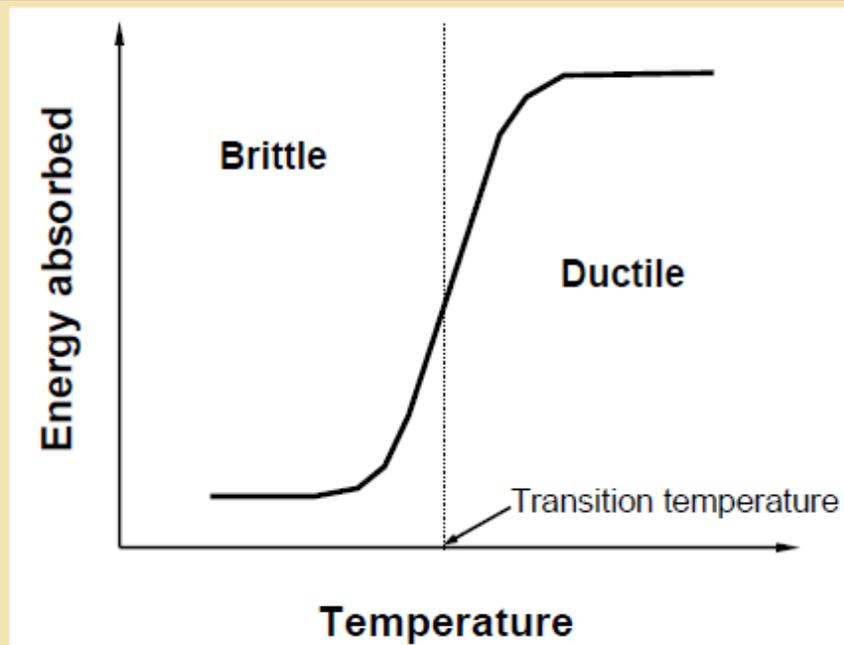
Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

Análise do aço:

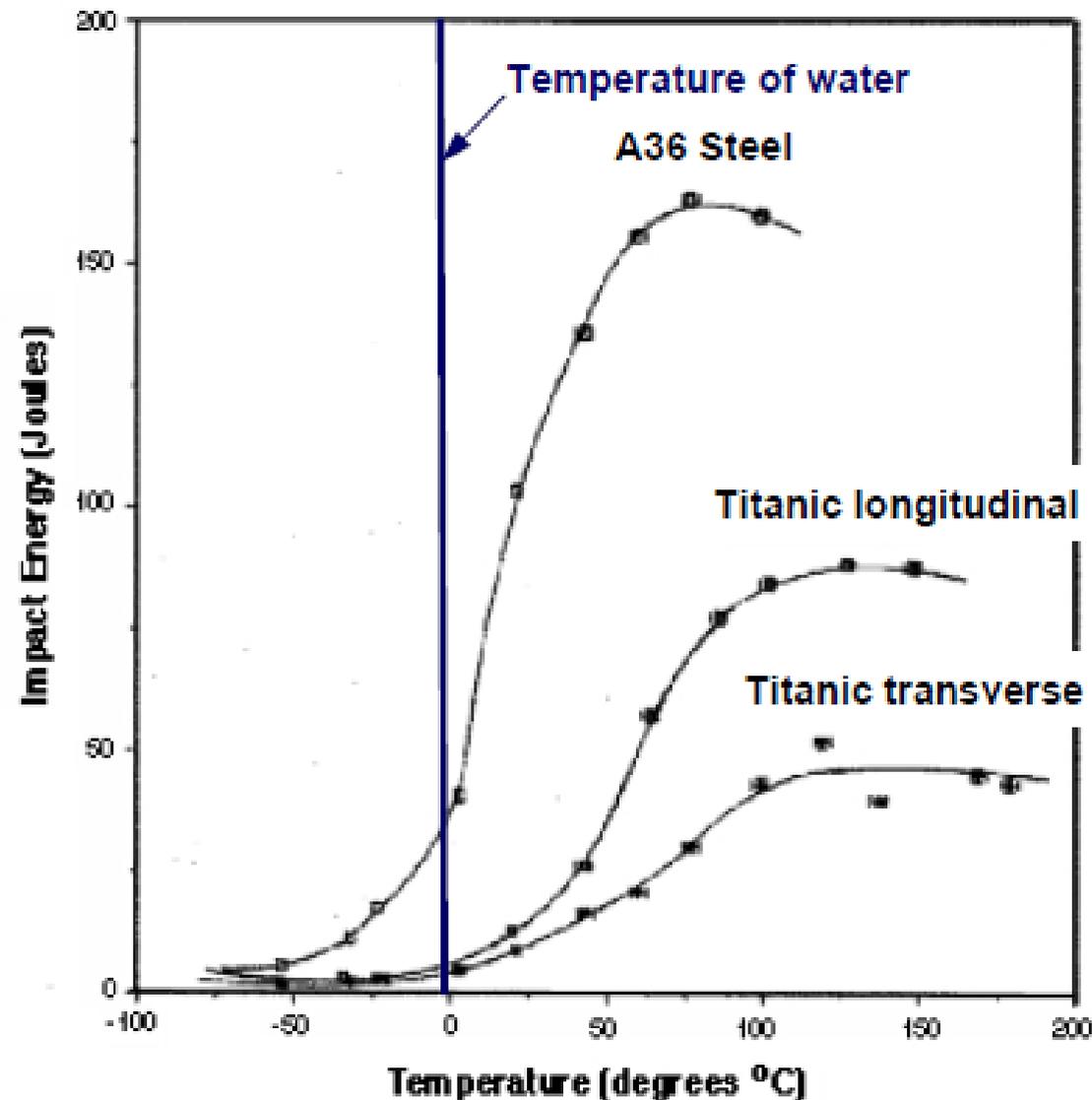


Ductile-to-Brittle Transition



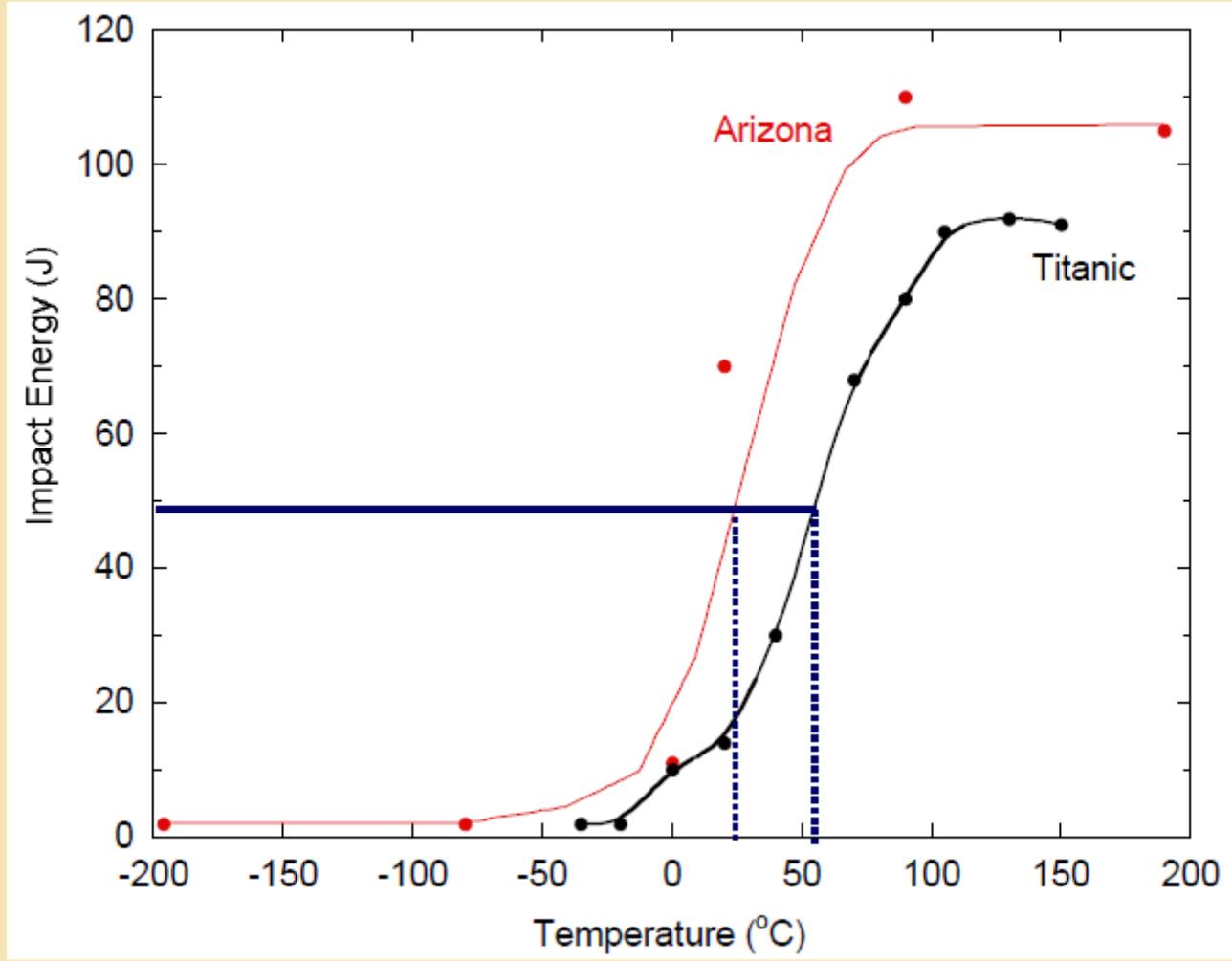
Fracture is more "brittle" with decreasing temperature

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert



Temperature of the water was -2°C !!

Impact Toughness of Steel in *Titanic* vs. *U.S.S. Arizona*

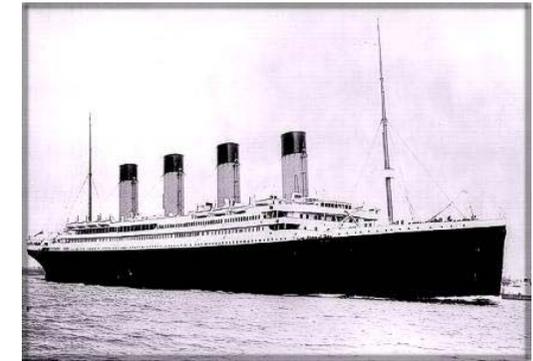


Steel of U.S.S. Arizona had lower DBTT!

PROF. CASSIUS CIVIC INGENHO DE TERRA RUCHEM

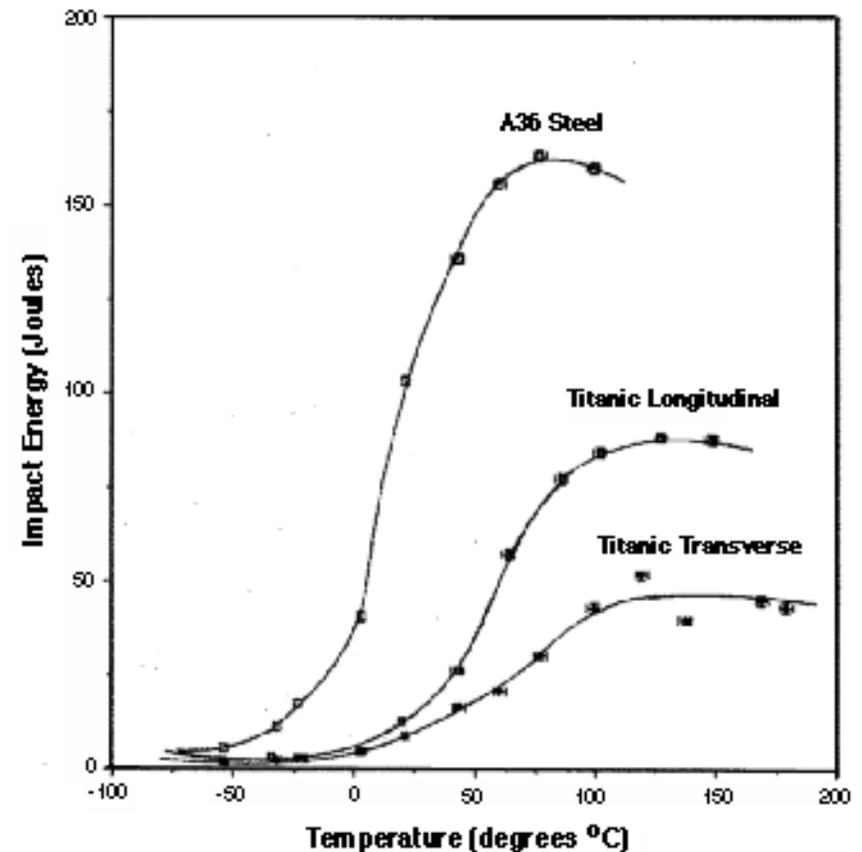


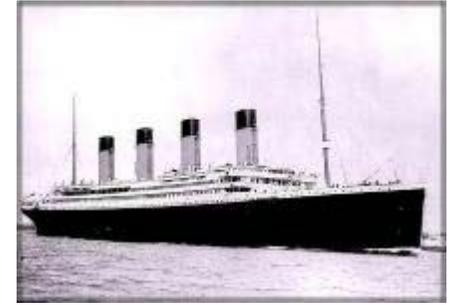
Ensaio de impacto: Charpy



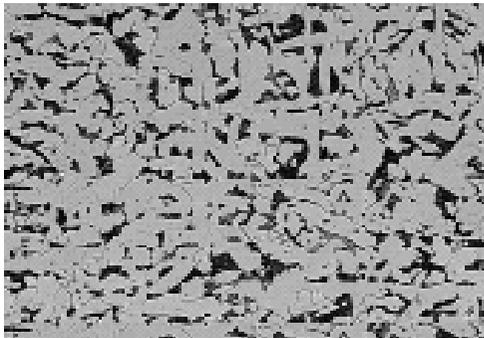
Os resultados de impacto das três séries de CPs :

- Em altas temperaturas, as amostras longitudinais do casco tem melhor propriedade que as transversais.
- Em baixa temperatura, as amostras longitudinais e transversais tem a mesma energia de impacto.
- A temperatura de transição dúctil frágil para energia de impacto de 20J é de -27°C (ASTM A 36), 32°C (casco longitudinal) e 56°C (casco transversal).
- Durante a colisão, a temperatura da água do mar era de -2°C

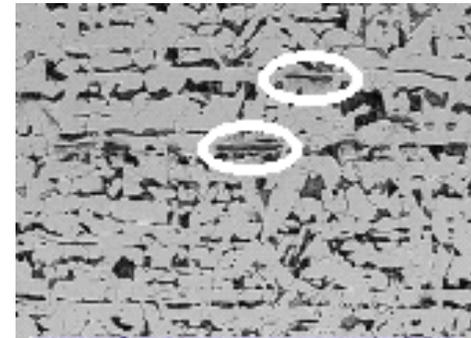




- Através de análise metalográfica convencional pode-se notar severo bandeamento, principalmente na seção longitudinal.
- Na seção longitudinal constata-se também grandes quantidades de partículas de sulfeto de manganês (dentro das elipses).



Seção transversal



Seção longitudinal

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

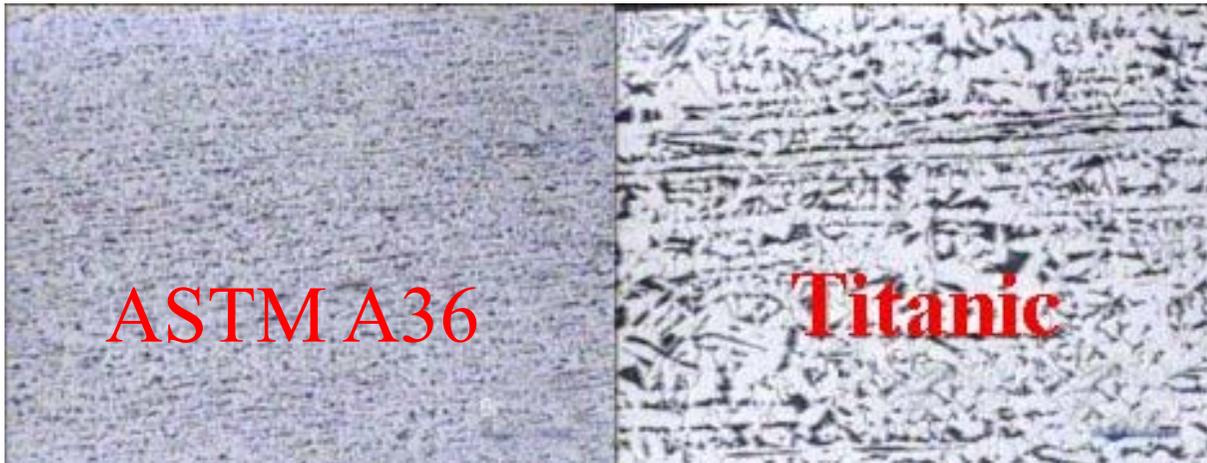
TITANIC- ABRIL, 1912



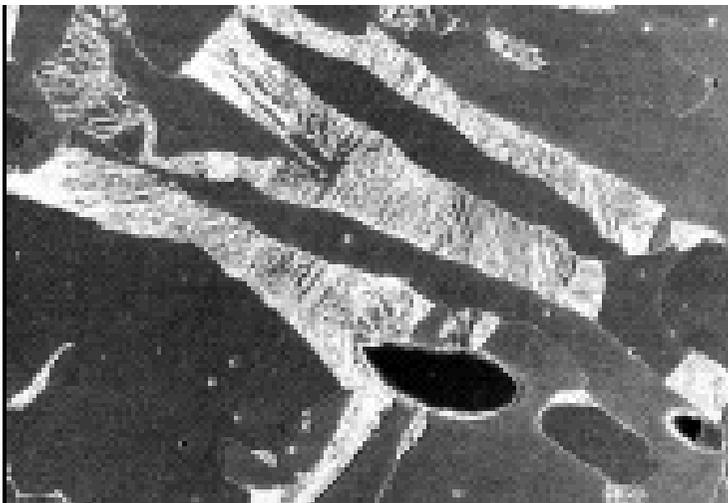
- **Pela composição química, a baixa relação Mn/S leva a formação de mais MnS, o que aumenta a fragilidade e aumenta a temperatura de transição frágil-dútil;**
- **O aço do Titanic era semi- acalmado, baixa desoxidação, o que fragiliza o aço;**
- **Foram encontrados sulfetos tanto na micrografia da estrutura quanto na superfície de fratura, na análise de MEV.**

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

Microestrutura (A36 x Titanic)



Na micrografia pode-se notar o tamanho de grão bem maior no aço do TITANIC em comparação ao aço A36.



- Através da análise com um microscópio eletrônico de varredura pode-se observar partículas de MnS (estruturas elípticas)

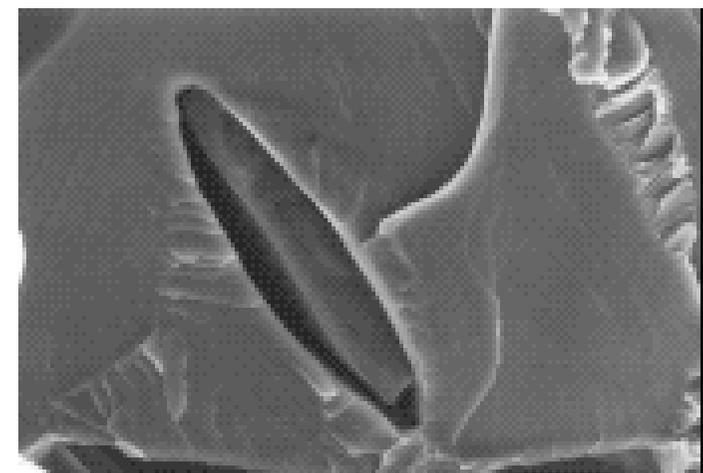
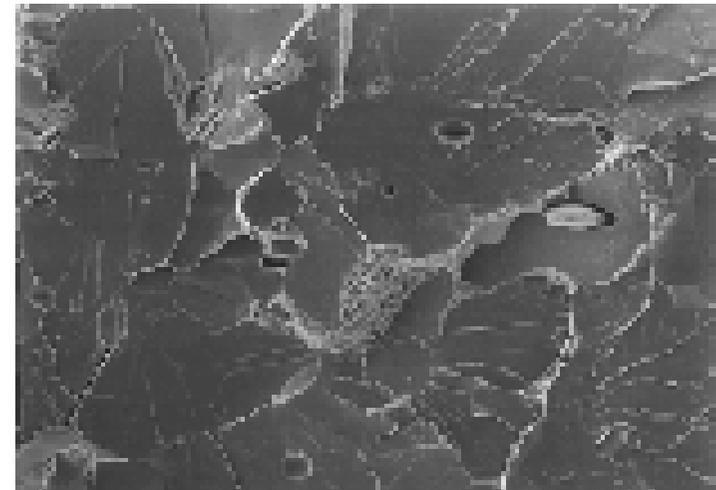
Ensaio de impacto: Charpy

- Realizou-se ensaios Charpy em uma faixa de temperaturas entre -55°C e 179°C em três séries de corpos de prova de dimensões padrão.

➤ A figura ilustra uma superfície Charpy recém fraturada a 0°C . Planos de clivagem na ferrita são bastante evidentes

➤ A figura ilustra uma região da superfície contendo MnS

Prof. Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert



TITANIC- ABRIL, 1912
Ensaio de tração



Table III. A Comparison of Tensile Testing of *Titanic* Steel and SAE 1020

	<u><i>Titanic</i></u>	<u>SAE 1020¹¹</u>
Yield Strength	193.1 MPa	206.9 MPa
Tensile Strength	417.1 MPa	379.2 MPa
Elongation	29%	26%
Reduction in Area	57.1%	50%

Conclusão Geral

Fatores que contribuíram para o naufrágio do TITANIC:

- Detecção tardia da presença de iceberg (sem tempo para manobras evasivas);
- Velocidade de navegação elevada;
- Ângulo de impacto que propiciou aberturas em vários compartimentos;
- Aço com grande tendência ao comportamento frágil (porém o melhor da época).



TITANIC- ABRIL, 1912



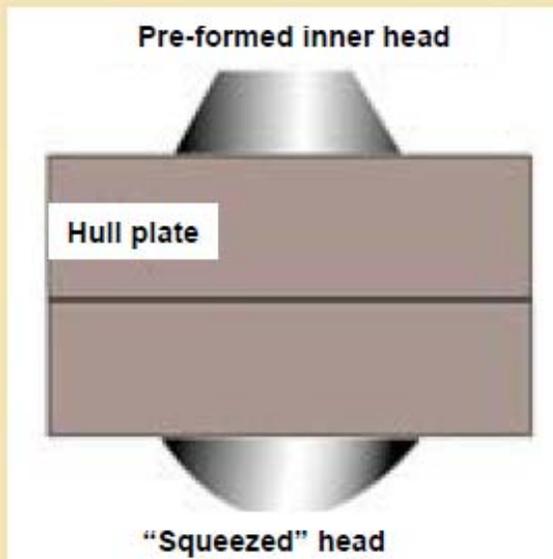
- **A primeira conclusão** apresentada no livro [4] é que a **teoria do aço frágil estava errada: a amostra do casco** retirada para o ensaio de impacto, em 1991, era de uma **região já fraturada em três pontos**, tratando-se, portanto, de uma **chapa particularmente frágil**;
- **O alongamento** do ensaio de tração encontrava-se **muito bom**, retirado de outra região, provavelmente;
- **O ensaio de impacto não** seria o melhor método para avaliação da fragilidade do aço **pois a taxa de deformação envolvida é muito maior do que a que ocorreu de fato**;

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES



e n a

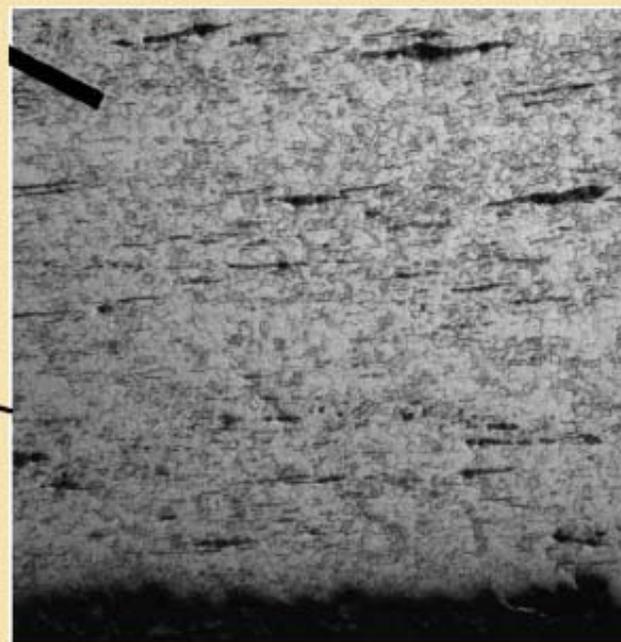
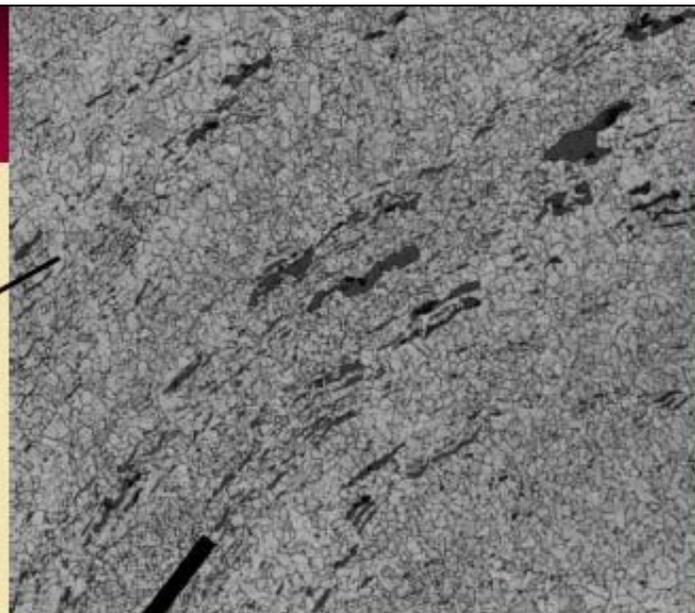
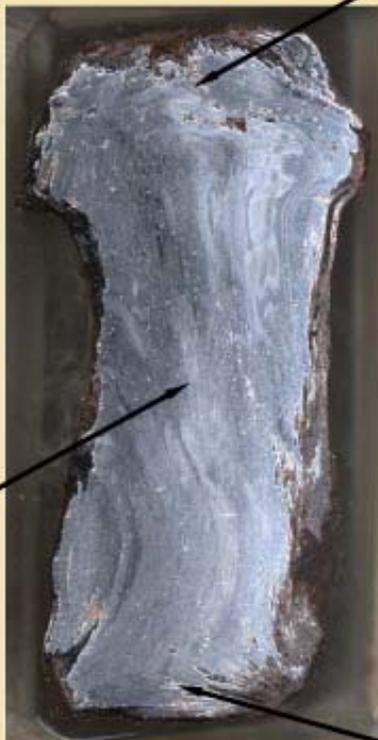
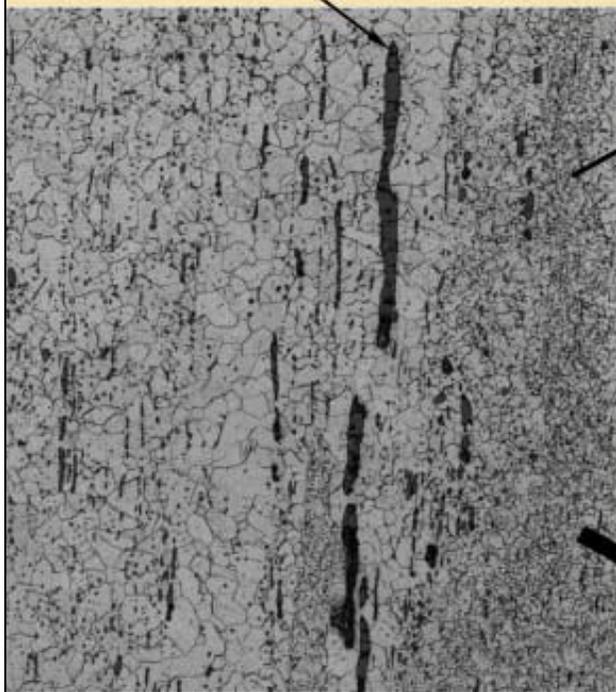


Hull of the *Olympic*, *Titanic's* sister ship after a collision in 1911.

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

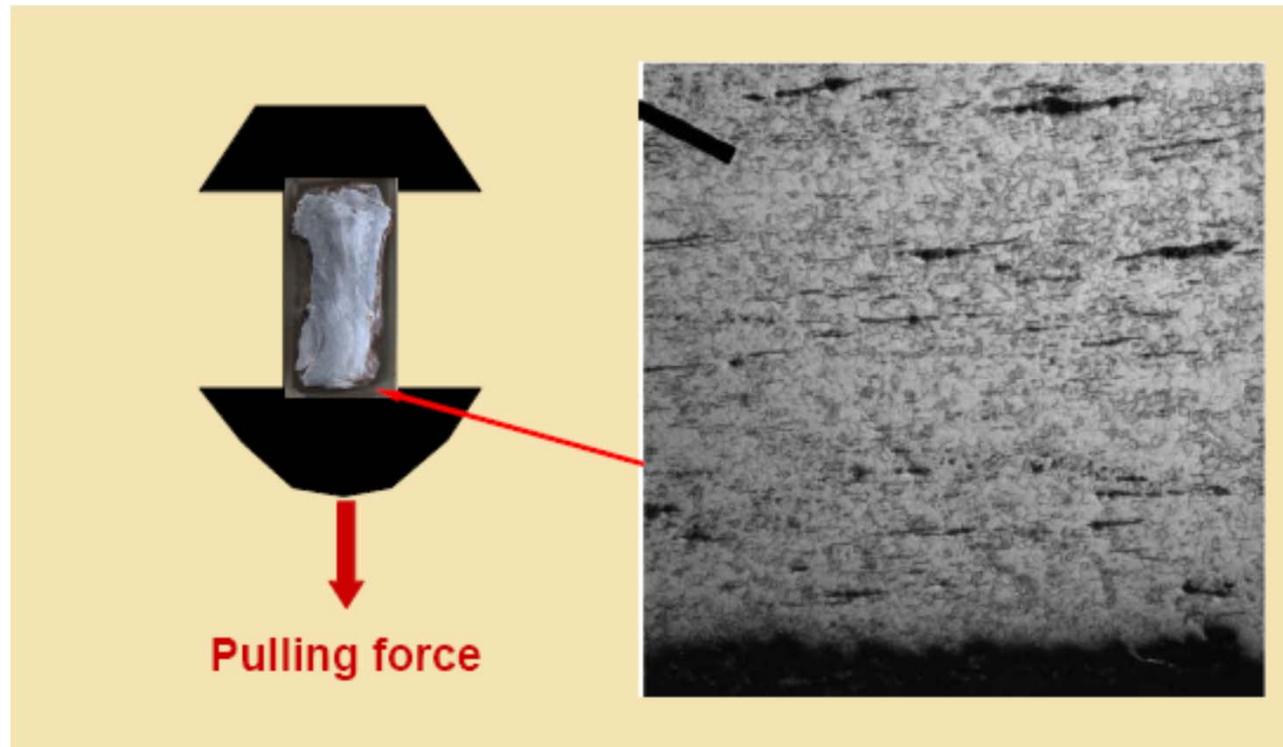
Microstructure of Titanic Rivet

Fe-silicate "stringers"



Seleção de Materiais

TITANIC

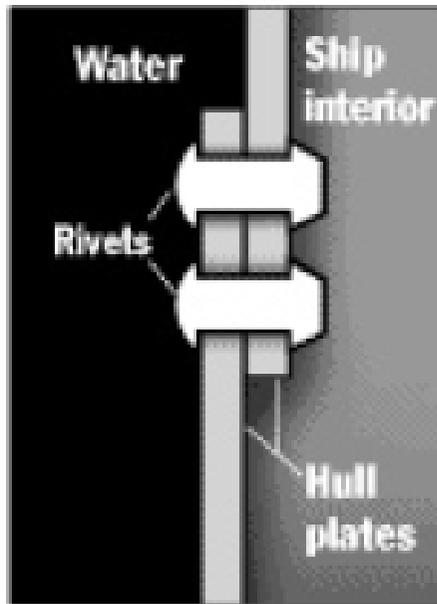


Rebites com silicatos alinhados

(N.Chawla – 2007)

TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

HOW THE RIVETS MAY HAVE CONTRIBUTED TO DISASTER



1. The rivets were used to seal the hull plates together, with the hammered end on the exterior.



2. Pressure from the iceberg collision may have caused the rivets to pop along some hull plates, causing the seams to open.



3. The total area open to the sea may have been no bigger than a closet door, through which 34,000 tons of water seeped.

Prof.Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

APÓS TITANIC

- **Desenvolvimento da Mecânica de Fratura;**
- **Desenvolvimento do ecobatímetro/sonar;**
- **Desenvolvimento do ensaio de ultrassom**

Bibliografia Recomendada

- Ashby, M; Shercliff, H; Cebon, D. - Materials: engineering, science, processing and design.
- CALLISTER JR, W.D. - Ciência e engenharia e materiais: uma introdução. 5 ed.; LTC, Rio de Janeiro, 2000. 259p.
- Ferrante, M. – Seleção de Materiais. 2 Edição. Edufscar
- Shackelford, J.F - Ciência dos Materiais, Editora Pearson Pratince Hall
- ASKLAND, D.R. - The Science and Engineering of Materials - Solution manual, Chapman & Hall, 1996. 400p.