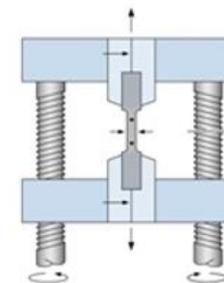
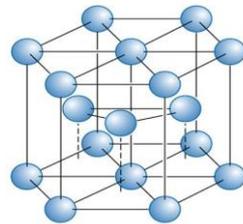
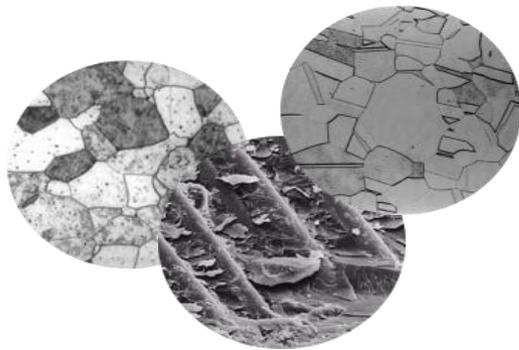
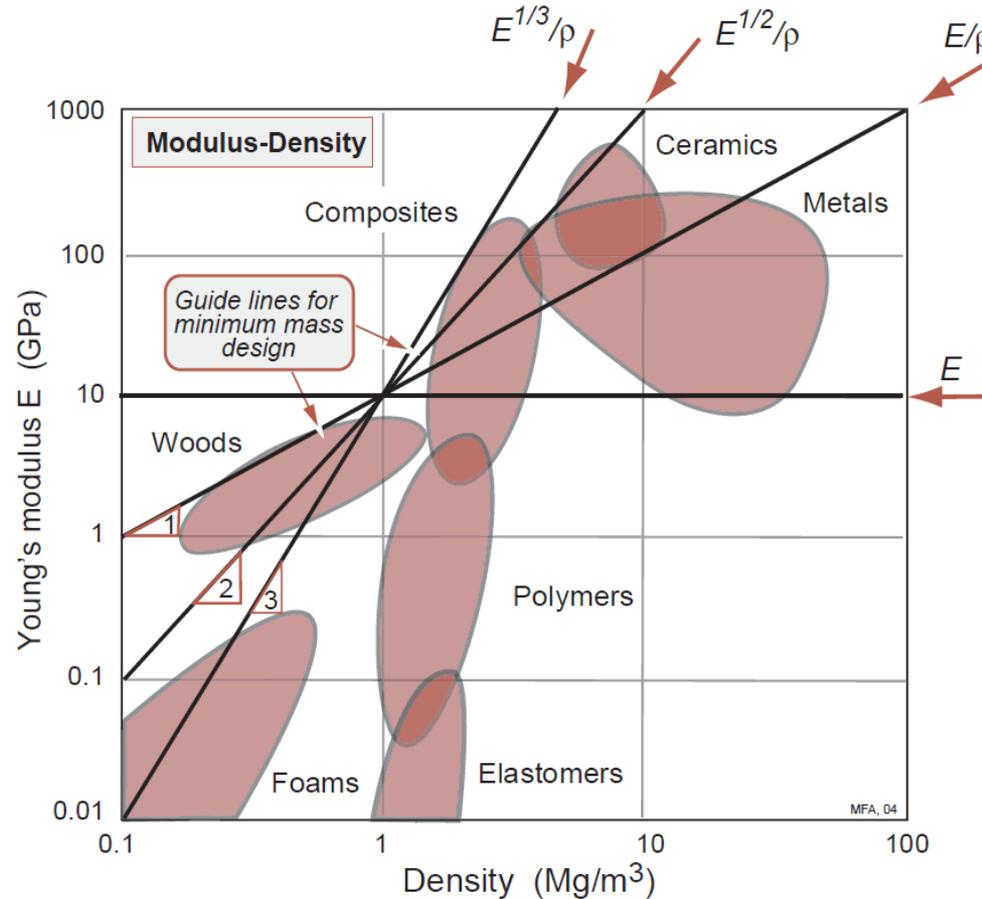


SMM0333 - SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PROJETO MECÂNICO

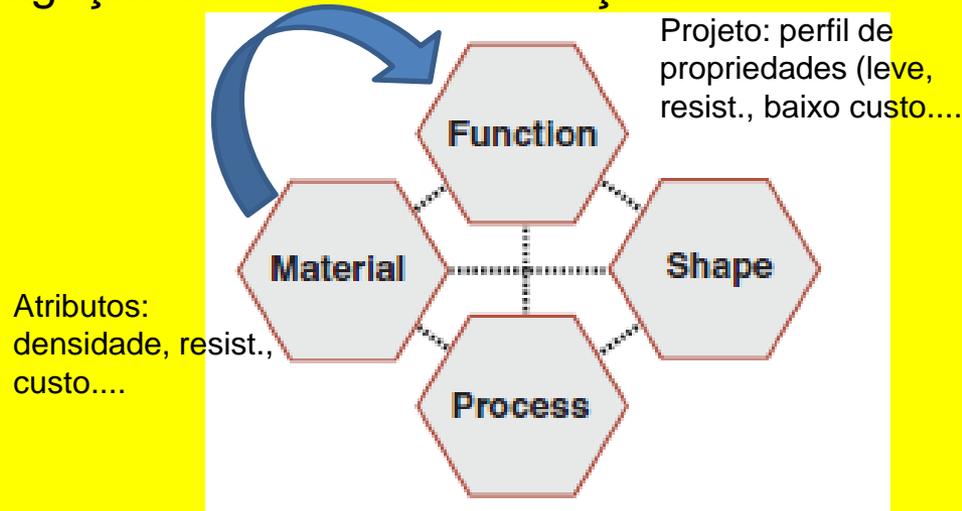


Bases para a Seleção de Materiais



INTRODUÇÃO

- Neste método (Ashby) existem procedimentos básicos para seleção, estabelecendo um ligação entre material e função.



- Lembrando que é importante considerar o menu completo dos materiais para não haver perdas de oportunidades,
- Se uma escolha inovadora será realizada (novo material), esta deve ocorrer nos estágios iniciais do projeto.
- A tarefa é resumida em :
 - Identificação do perfil de atributos desejados
 - Comparação com os materiais de engenharia para selecionar o mais adequado.

- O primeiro passo é a fase de **TRADUÇÃO**: de acordo com as exigências do projeto, **identificar as restrições** que elas impõem sobre a escolha do material;
- A seguir, a fase de **TRIAGEM** com **exclusão dos materiais que não satisfazem as restrições**;
- Posteriormente, a fase de **CLASSIFICAÇÃO**, **reduzindo a lista dos possíveis candidatos, buscando os melhores pela maximização o desempenho**;
- Os critérios da fase de **triagem e classificação** são derivados das exigências do projeto para um componente, pela análise da **FUNÇÃO, RESTRIÇÕES, OBJETIVOS e VARIÁVEIS LIVRES**.

A ESTRATÉGIA DE SELEÇÃO

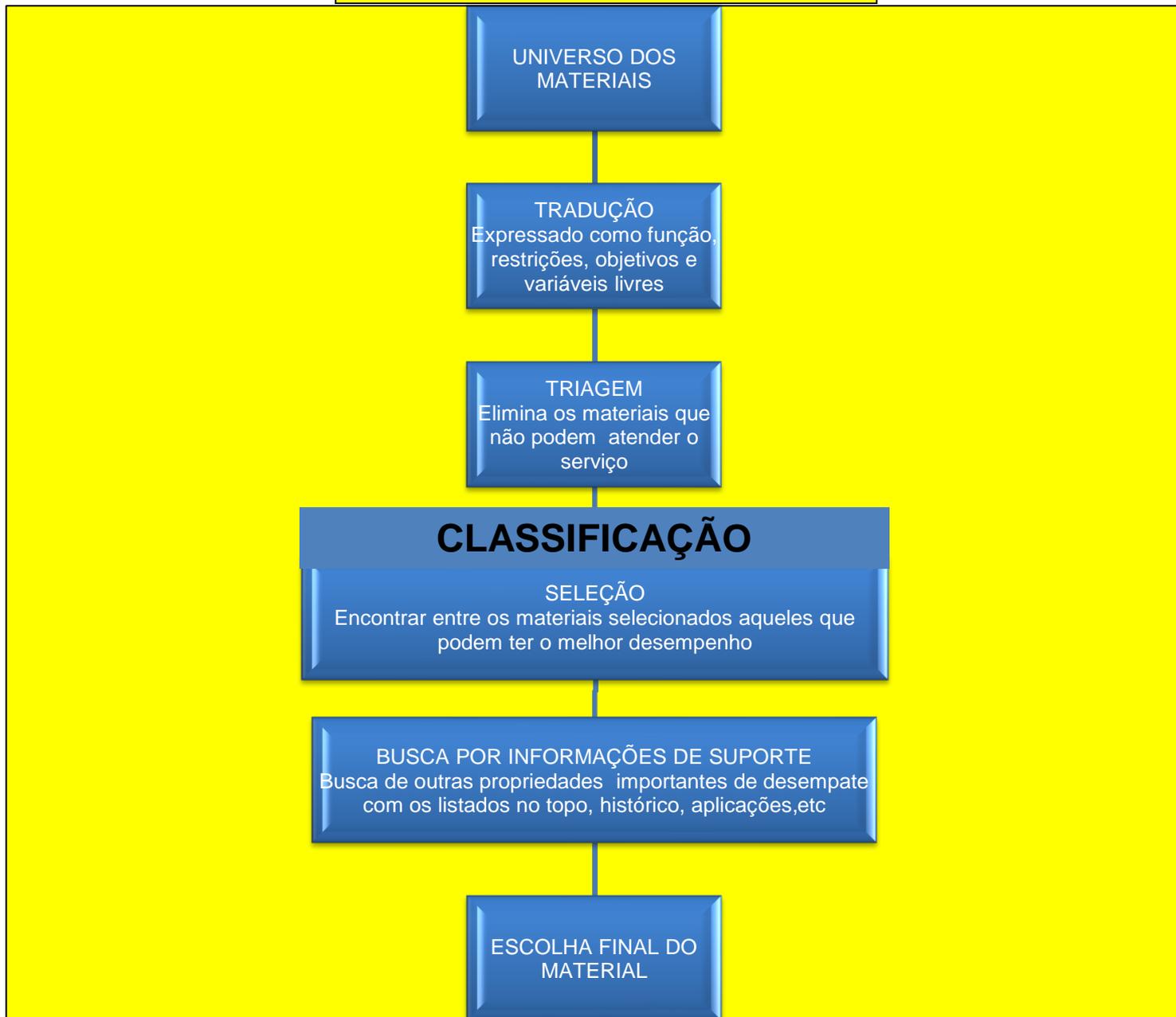
1. UNIVERSO DOS MATERIAIS

Necessidade do projeto ← Perfil de propriedades

Sub-grupos dentro de cada família



4 PASSOS PRINCIPAIS



CANDIDATO PARA EMPREGO

TRADUÇÃO

identificação das habilidades essenciais e experiência requerida: Engenheiro de Materiais com experiência em desenvolvimento e melhoria de produtos.

TRIAGEM

Aqueles que não possuem formação em Engenharia de Materiais são eliminados

CLASSIFICAÇÃO

São Classificados pela experiência em desenvolvimento de produtos.

BUSCA POR INFORMAÇÕES DE SUPORTE

Referências, entrevistas com candidatos do topo da lista

ESCOLHA DO NOVO ENGENHEIRO

2. TRADUÇÃO

- Como as exigências do projeto para um componente (definido pela aplicação) são traduzidas para a seleção de um material?
- Componente de engenharia: uma ou mais **FUNÇÕES** (suportar carga, transmitir calor, etc).
- Considerar as **RESTRICÇÕES** (dimensões, não ocorrência de falhas, isolante, condutor, meio ambiente, etc).
- O projetista tem um **OBJETIVO**: fazer o componente o **mais barato** possível, ou o **mais leve possível**, ou o mais seguro, ou talvez uma **combinação destes**.
- Certos parâmetros podem ser ajustados para otimizar o OBJETIVO, o projetista está livre para variar esses **parâmetros que não foram restringidos** pelas exigências do projeto – **VARIÁVEIS LIVRES**.
- As condições de contorno são definidas pela **FUNÇÃO, RESTRIÇÃO, OBJETIVO, VARIÁVEIS LIVRES**

FUNÇÃO:	O que se espera do componente dentro do sistema?
RESTRICÇÕES:	Quais as condições não negociáveis devem ser definidas ?
OBJETIVO:	O que deve ser minimizado ou maximizado?
VARIÁVEIS LIVRES:	Quais parâmetros estão livres para ajuste do projetista?

3. TRIAGEM

ATRIBUTOS LIMITES

- Elimina os candidatos que **não atendem** o projeto, devido a **um ou mais atributos** fora dos limites estipulados pelas **RESTRIÇÕES**;
- Por ex. é necessário que o componente funcione em água fervente, ou que seja transparente, isto impõe limites óbvios nos atributos de temperatura máxima de serviço e transparência ótica. São definidos como **ATRIBUTOS LIMITES**.

4. CLASSIFICAÇÃO

ÍNDICES DE MÉRITO (Ferrante)

- Os atributos limites **não ajudam** na ordenação dos materiais remanescentes;
- Para fazê-lo, é necessário um **critério de otimização**, que será obtido através do uso dos **índices de mérito**, que é um índice de adequação do material ao projeto. Com esse índice pode-se classificar o mais e o menos adequado.

5. INFORMAÇÕES DE SUPORTE

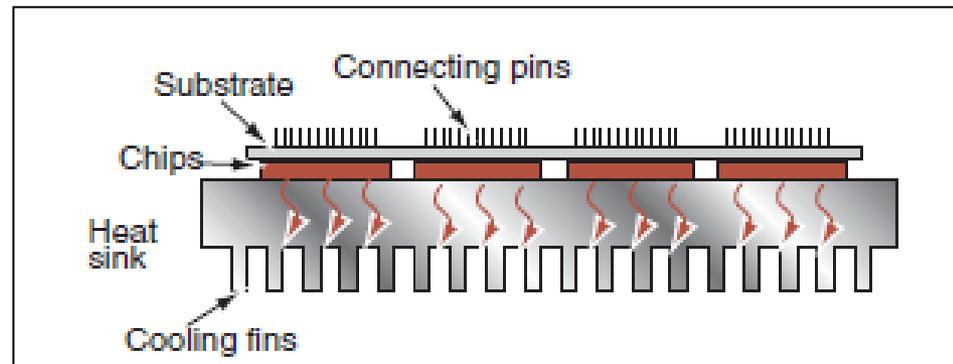
Você pode escolher o material do topo da lista, mas qual seriam as suas características frágeis em relação aos outros?
Qual seriam as fraquezas e as qualidades?

ATRIBUTOS LIMITES E ÍNDICES DE MÉRITO

- As restrições determinam as propriedades limites;
- O objetivo define os **índices de mérito** com o qual buscaremos valores extremos;
 - Quando o objetivo não é acoplado às restrições, o índice de mérito é simplesmente uma propriedade do material;
 - Quando o objetivo está acoplado às restrições, o índice torna-se um grupo de propriedades.

Dissipador de Calor para microchips aquecidos (objetivo não acoplado)

Os **microchips** consomem **somente alguns miliwatts**, mas a energia deve ser **dissipada** em um **volume minúsculo**, ou seja, a **densidade de energia é elevada**. A medida que o computador é mais exigido, mais calor deve ser dissipado. Assim, os microchips são conectados a um **dissipador de calor**, que se torna um **componente crítico**. Como o seu desempenho pode **ser maximizado**?



- Deve-se prevenir contato elétrico e correntes parasitas entre o chip e o dissipador de calor. O material do dissipador deve ser um **bom isolante elétrico**, significa **alta resistividade, ρ_e , $> 10^{19}$ mW.cm**.
- Deve **drenar calor** do chip o **mais rápido possível**. **condutividade térmica mais elevada possível**

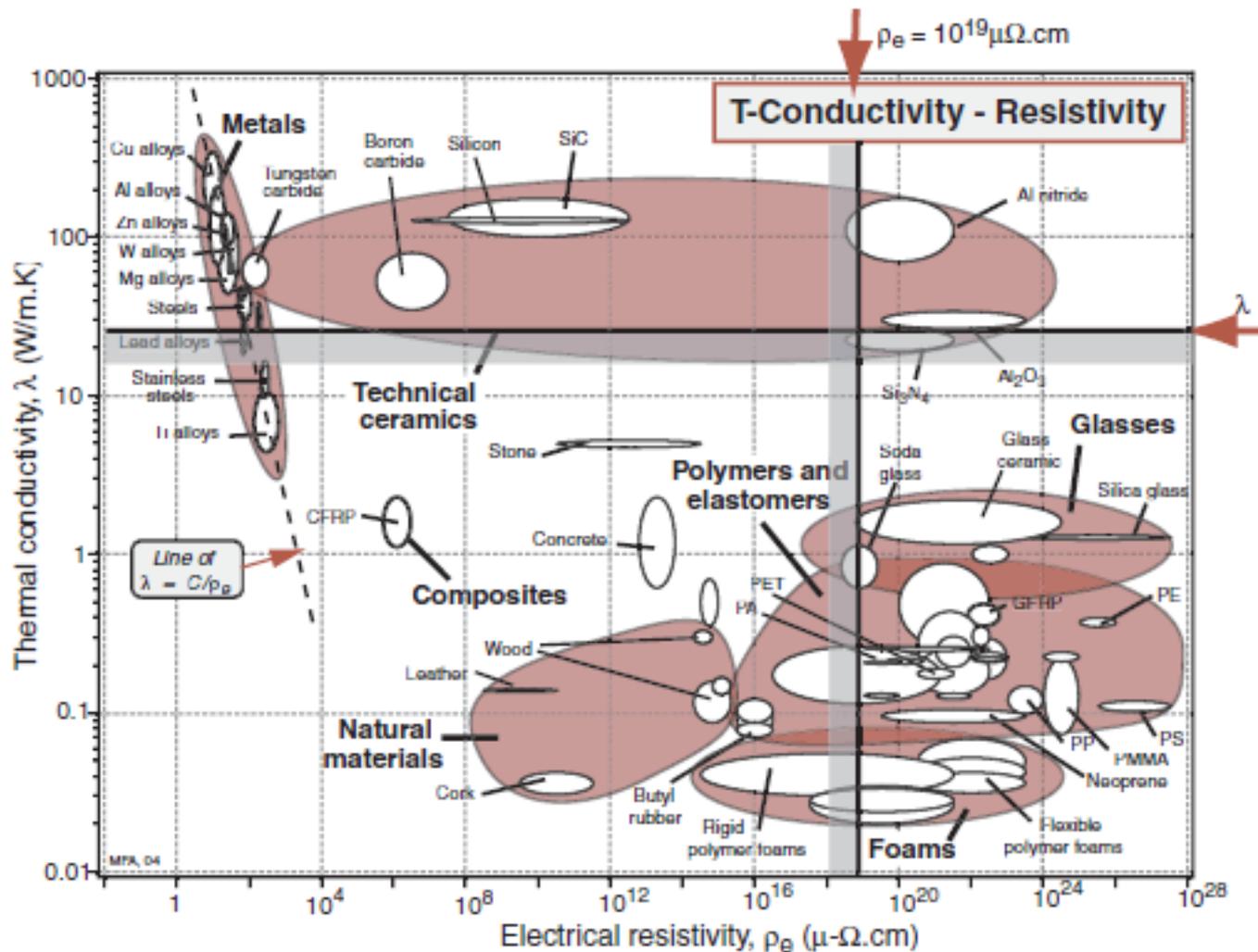
FUNÇÃO: Fossa de calor/ **dissipar calor.**

RESTRICÇÕES: - Deve ser um bom isolante elétrico, **significa alta resistividade**
 $\rho_e = 10^{19} \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}.$
- Dimensões especificadas.

OBJETIVO: **Maximizar a condutividade térmica**

VARIÁVEIS LIVRES: Escolha do material

- **Resistividade** será tratada como uma **RESTRICÇÃO (critério passa/não passa)**. Assim, os materiais que não são bons isolantes, ou possuem a resistividade menor que o valor estabelecido estarão fora da **seleção**;
- A condutividade térmica será tratada como **OBJETIVO**, ou seja, para os materiais que atenderem à restrição, será feita uma **CLASSIFICAÇÃO** colocando no topo **o que tiver maior condutividade**. Se assumirmos que todas as características estão estabelecidas pelo projeto, existirá somente uma **VARIÁVEL LIVRE** na procura da maximização do fluxo de calor: **A ESCOLHA DO MATERIAL**;
- O procedimento será **fazer a triagem** baseado na **resistividade** e **classificar** baseado na **condutividade**.



- Os materiais mais adequados seriam: Nitreto de Al ou Alumina;
- Devemos ainda procurar as informações suportes para esses dois materiais: desempate.

INFORMAÇÕES SUPORTE:

Nitreto de Al: material cerâmico

Histórico

Cerâmica técnica descoberta há 100 anos e **tem sido utilizado há mais de 20 anos** como material comercialmente viável, com propriedades que podem ser controladas e reproduzidas.

Informações gerais

- **Boas propriedades dielétricas;**
- **Alta condutividade térmica;**
- Baixo coeficiente de expansão térmica (similar ao Si)
- Não reativo.

Usos típicos

- Substrato para eletrônica;
- **Dissipador de Calor;**
- Invólucro de chips;
- Base para transistor de potência;
- Estojo para dispositivos de microondas;
- Isolante em câmaras de processamento de semicondutores;
- **Dispositivos para manuseio de metal fundido.**

Referência: <http://accuratus.com/alumni.html>

JOHN G. SPEER, E. DE MOOR, K.O. FINDLEY, D.K. MATLOCK, B.C. DE COOMAN, and D.V. EDMONDS

DOI: 10.1007/s11661-011-0869-7

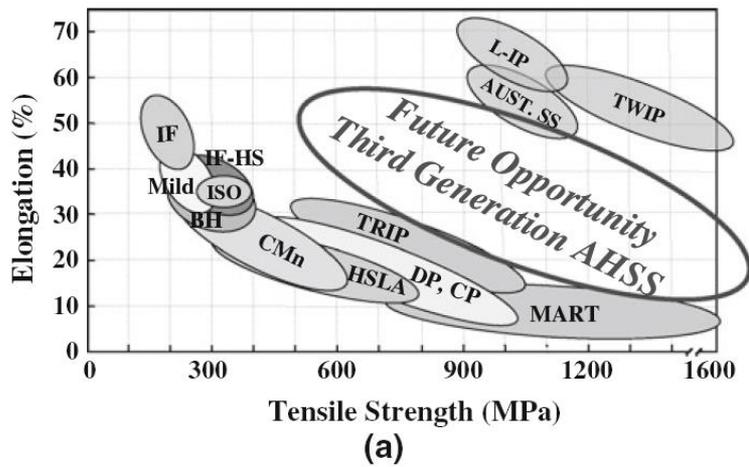
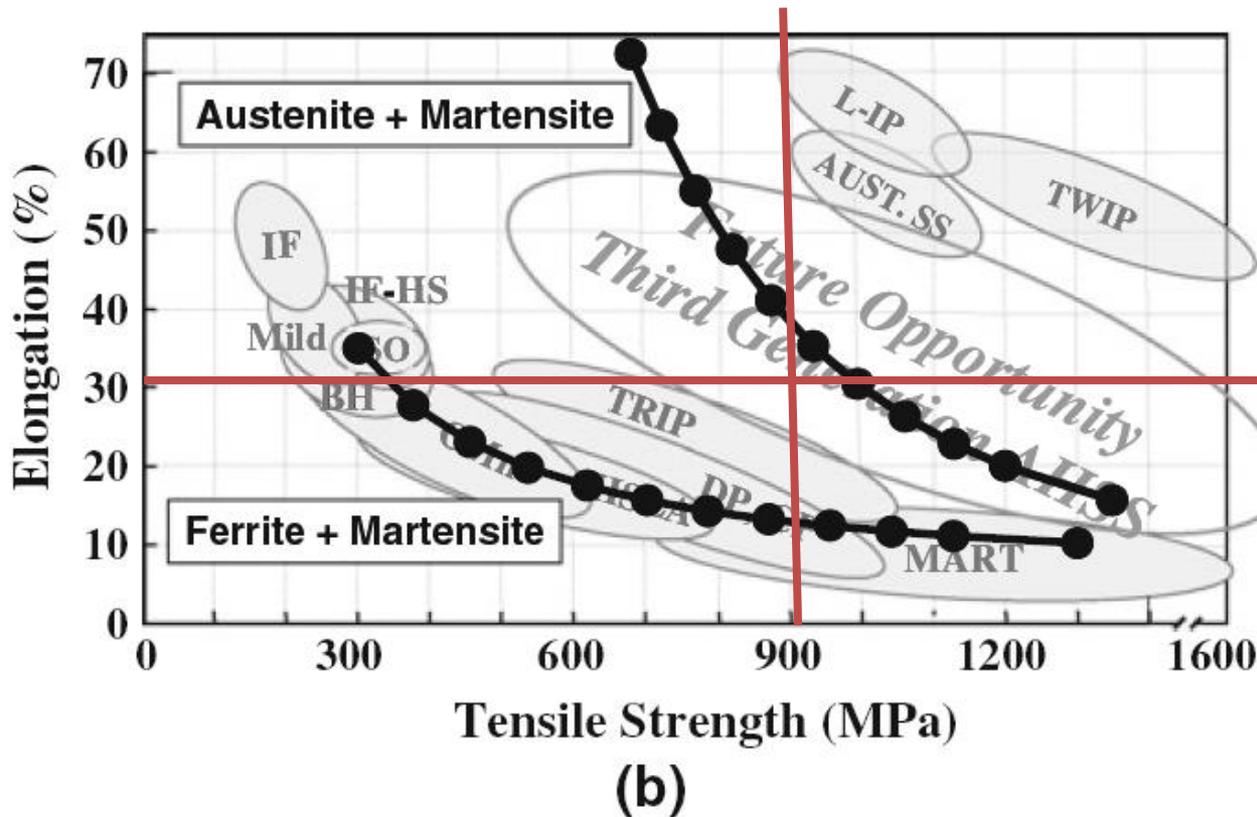
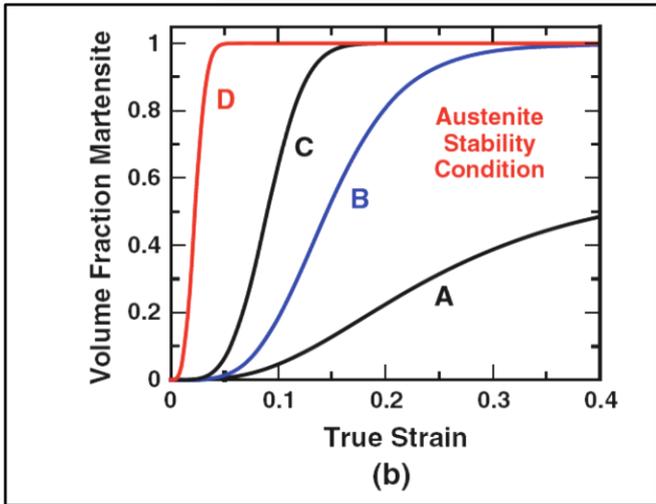
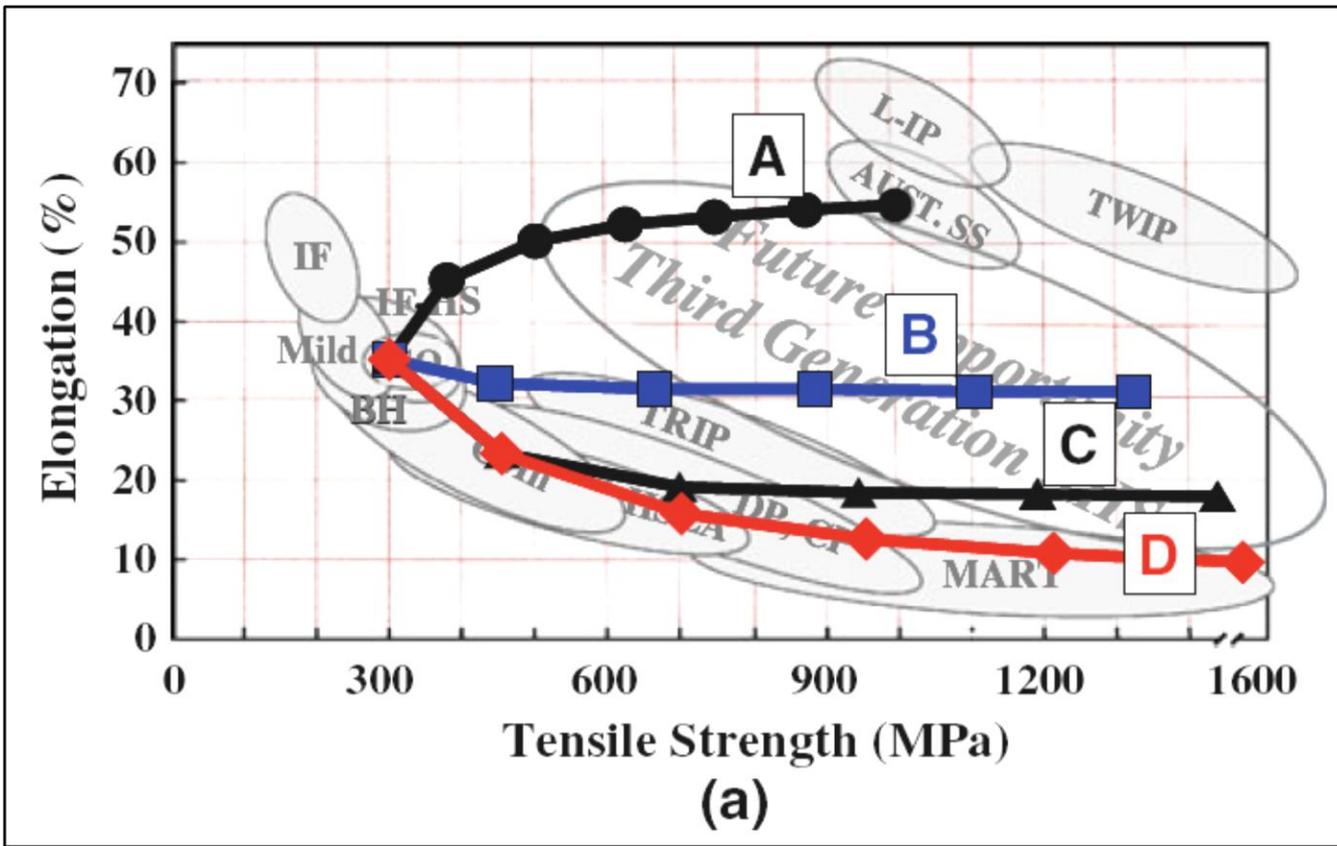


Fig. 1—Tensile elongation/strength combinations for various steel families, with (a) First Generation AHSS in the lower right, Second Generation AHSS in the upper right, and a wide region representing the opportunity for Third Generation AHSS. This figure is overlaid in (b) with property combinations predicted for various combinations of martensite and ferrite or (stable) austenite.^[2]



**OBJETIVO:
MAXIMIZAR LR**

**LIMITANTE:
ALONGAMENTO
30% MÍNIMO**



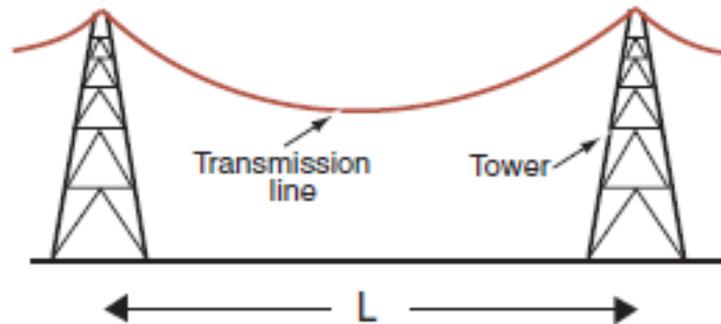
METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A

JOHN G. SPEER, E. DE MOOR, K.O. FINDLEY, D.K. MATLOCK, B.C. DE COOMAN,
and D.V. EDMONDS

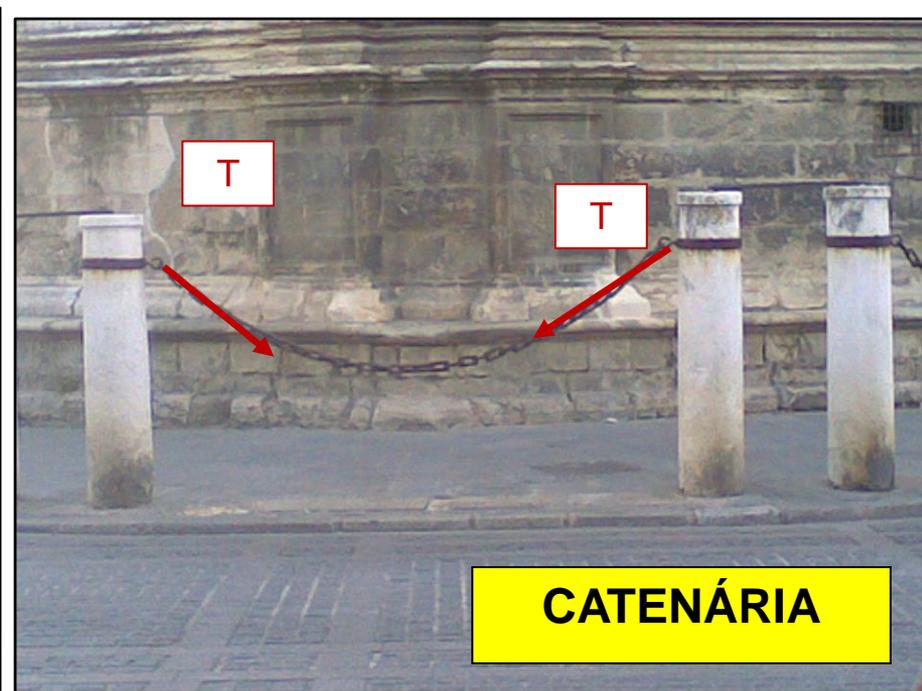
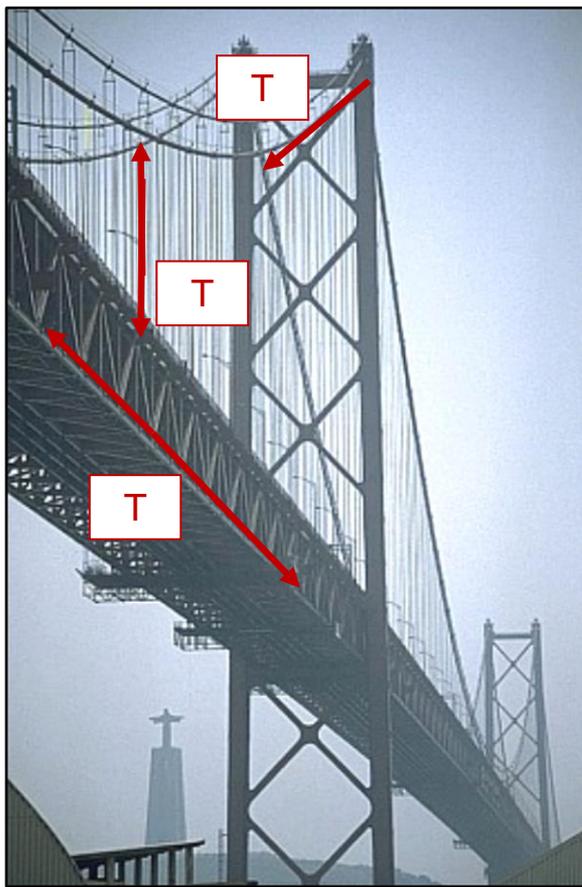
Fig. 2—Tensile ductility/strength combinations (a) for mixtures of martensite and metastable austenite, with austenite mechanical stability varying as shown in (b).^[6]

Material para uma linha de transmissão aérea.

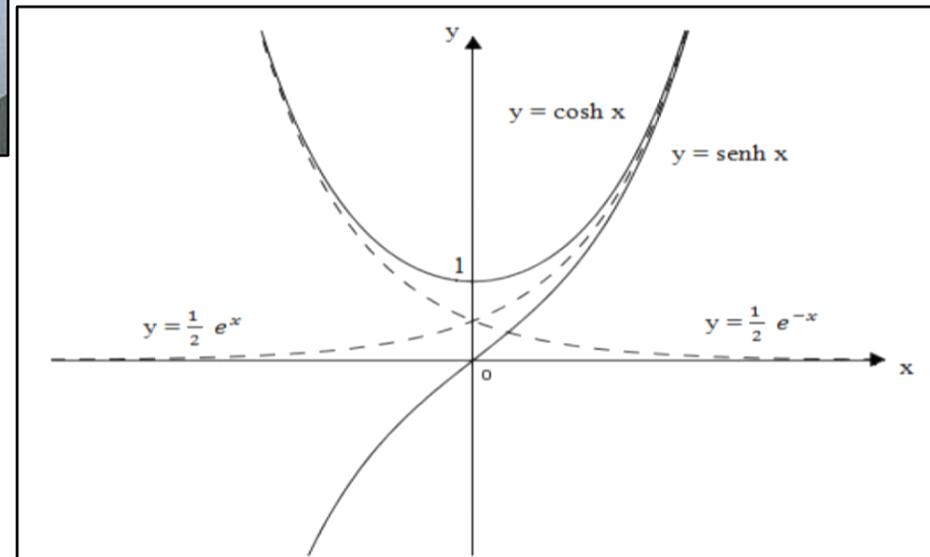
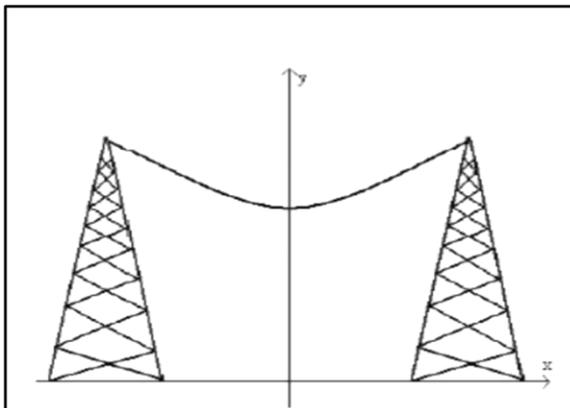
- A linha de transmissão de energia elétrica pode ser aérea ou aterrada (elevado custo);
- Um **grande intervalo entre torres (L)** é **desejável** (as torres são caras). O material deve ser um bom condutor elétrico (**baixa resistência elétrica**);
- O intervalo entre as torres deve ser tal que permita suportar a tensão necessária para limitar o “embarrigamento” (Catenária) dos cabos, forças devido aos ventos, acúmulo de neve.....).



A transmission line. The cable must be strong enough to carry its supporting tension, together with wind and ice loads. But it must also conduct electricity as well as possible.



CATENÁRIA



Jesuíta Italiano Vincenzo Riccati (1707 – 1775)

- Imagine o caso onde o comprimento L foi definido e que os cabos para diminuir o embarrigamento necessitam de um **pré-tensionamento de 80 MPa**, **RESTRIÇÃO**;
- O **OBJETIVO** se torna a **minimização da perda elétrica**. Assim, a **SELEÇÃO** procurará materiais que possuem o menor ρ_e .

FUNÇÃO: Linhas de transmissão com grande espaçamento entre as torres

RESTRIÇÕES:

- Distância L
- Resistência maior que 80MPa

OBJETIVO: - Minimizar a resistividade elétrica

VARIÁVEIS LIVRES: Escolha do material

- Assim, devemos fazer a **triagem na resistência e ranquear na condutividade térmica**;
- Assim, usaremos a **carta Condutividade x Resistividade** e minimizamos a resistividade para **materiais que tenham pelo menos 80 Mpa de LR**;
- **Ligas de Cu e de Al**;
- Devemos ainda procurar as informações suportes para esses dois materiais.

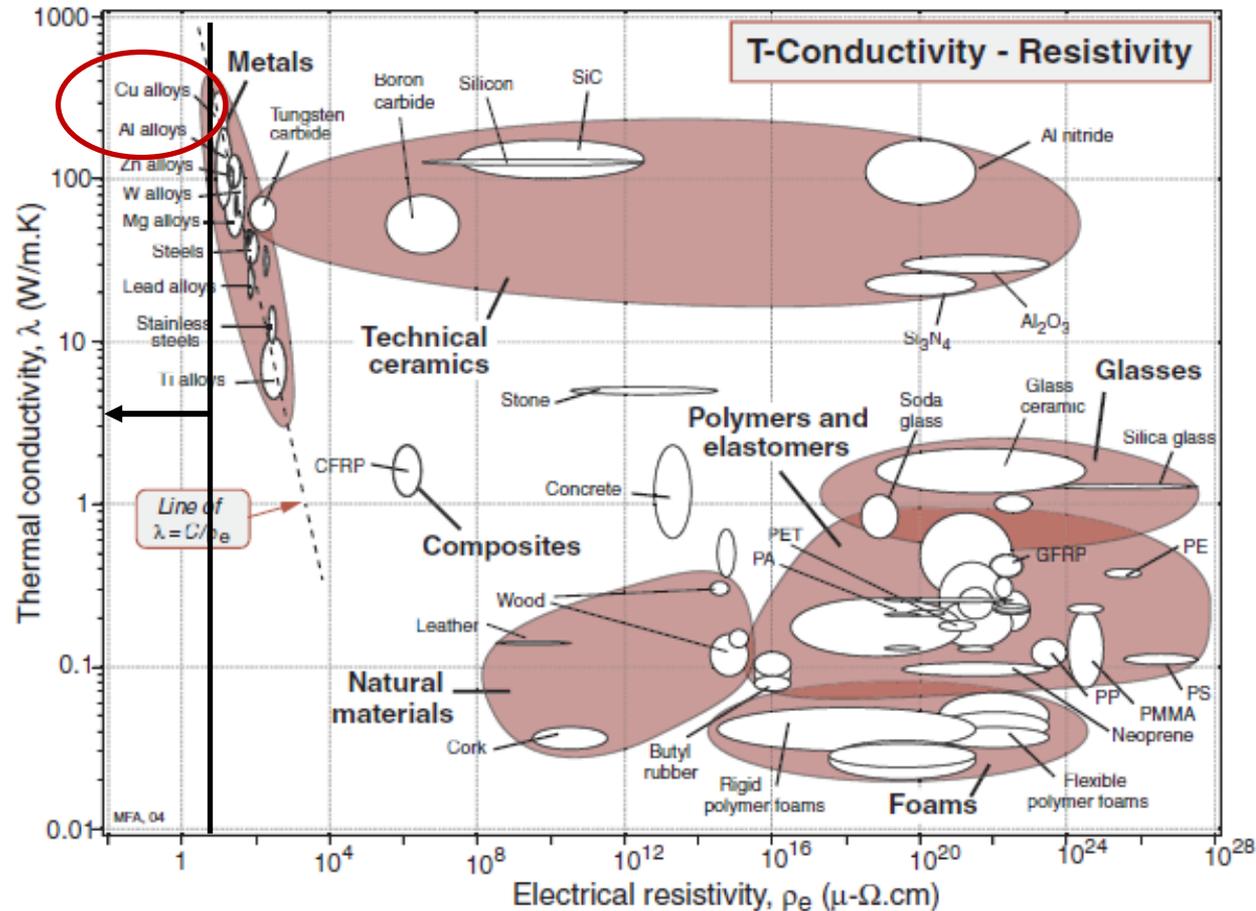


Figure 4.10 Thermal conductivity, λ , plotted against electrical resistivity, ρ_e . For metals the two are related.

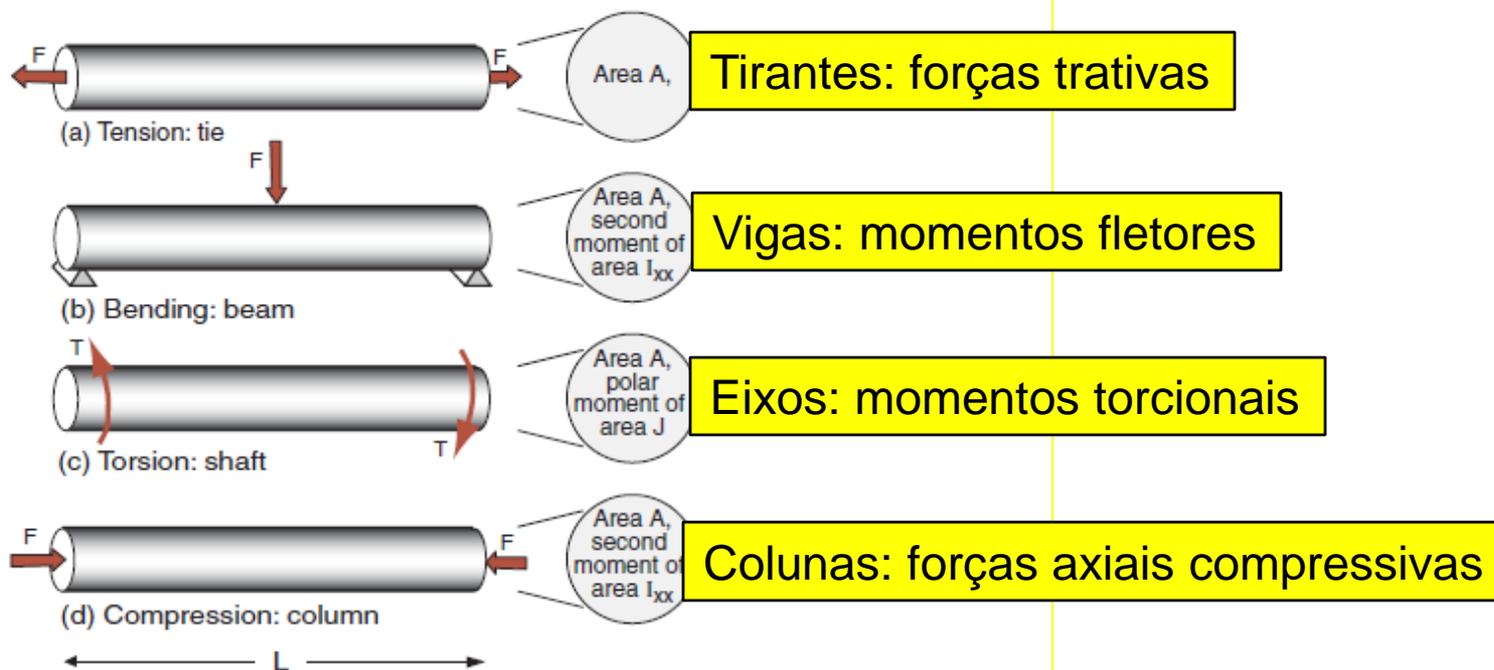
- Tradicionalmente, **condutores de alumínio têm sua utilização restrita às linhas de transmissão de energia**, cabos de distribuição aérea e algumas poucas utilizações em instalações de potência mais elevada. Nas demais aplicações, o cobre é utilizado.

Características dos dois metais em análise:

- - **densidade do cobre (d_{Cu}) = 8,89g/cm³**
- - **densidade do alumínio (d_{Al}) = 2,703 g/cm³**
- - **resistividade do cobre (ρ_{Cu}) = 17,241 Ω .mm²/km**
- - **resistividade do alumínio (ρ_{Al}) = 28,264 Ω .mm²/km**
- Como a **resistividade do alumínio é maior que a do cobre**, para conduzir a mesma corrente, a **seção do condutor de alumínio deve ser maior que a do cobre**. Mesmo assim, a **massa de alumínio será menor que a do cobre**, uma vez que a **densidade do alumínio é 30% da densidade do cobre**.
- **(Peso do cobre)/(Peso do Alumínio) = (17,241 x 8,89)/(28,264 x 2,703) = 2**
- Ou seja, o **condutor de alumínio teria a metade do peso do condutor de cobre**.
- **O custo do quilograma de cobre é maior que o de alumínio**.
- Assim, o **material a ser selecionado seria o alumínio**.
- Referência: <http://www.allcab.com.br/condutor-de-aluminio-ou-de-cobre/>

Objetivo Acoplado às Restrições

- O carregamento de um componente pode ser decomposto em alguma combinação de tração, flexão, torção e compressão;
- O nome funcional dos componentes está relacionado ao tipo de solicitação mecânica ao qual serão submetidos em serviço:

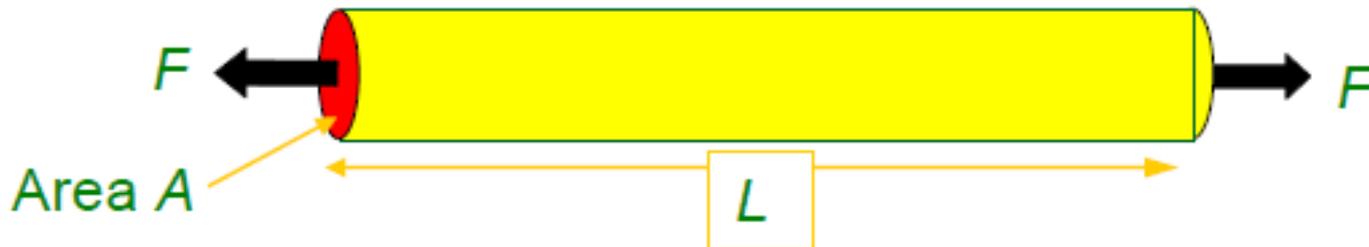


7 A cylindrical tie-rod loaded (a) in tension, (b) in bending, (c) in torsion and (d) axially, as a column. The best choice of materials depends on the mode of loading and on the design goal; it is found by deriving the appropriate material index.

Índices de Mérito (Material)

Tirante leve e resistente

- O projeto requer um tirante cilíndrico de comprimento especificado L para suportar uma força trativa F , sem a ocorrência de falha e deve ser leve, ou seja, ter uma massa mínima.
- A área transversal A não é fixada, assim maximizar o desempenho significa minimizar a massa mas que suporte a carga F .



FUNÇÃO:

Tirante

RESTRICÇÕES:

Foi especificado o comprimento L
O tirante deve suportar carga trativa axial F

OBJETIVO:

Minimizar a massa m do tirante

VARIÁVEIS LIVRES:

Área transversal, A
Escolha do material

- Primeiramente devemos procurar uma **equação descrevendo a quantidade a ser maximizada ou minimizada**. Esta equação é chamada de FUNÇÃO OBJETIVO, no caso atual seria a massa m , e o mínimo seria a o nosso objetivo:

$$m = AL\rho$$

- O comprimento L e a força F são especificados e portanto fixados;
- A área A está livre para variar. Pode-se reduzir a massa pela redução de A , mas existe uma **RESTRIÇÃO**: A deve ser suficiente para resistir a F :

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

- O “acoplamento” se dá pela substituição da variável livre na FUNÇÃO OBJETIVO:

The diagram illustrates the objective function $m \geq (F)(L) \left(\frac{\rho}{\sigma_f} \right)$. Three callouts identify the variables: a cyan callout labeled 'Carga' points to F ; a red callout labeled 'Geometria' points to L ; and a blue callout labeled 'Prop. Do material' points to the fraction $\frac{\rho}{\sigma_f}$.

- O tirante mais leve que suportará a carga F (considerando o fator de segurança) será aquele fabricado do material que possuir o menor ρ/σ_f . **O índice de mérito é o inverso**, que é mais usual, isto é, **utilizar o σ_f no numerador**:

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

- Pode-se combinar propriedades por exemplo, impondo uma outra restrição: uma **pequena deformação (δ)**.

$$\delta = L\varepsilon = L\frac{\sigma}{E} = L\frac{F}{E(A)}$$

$$m = AL\rho$$

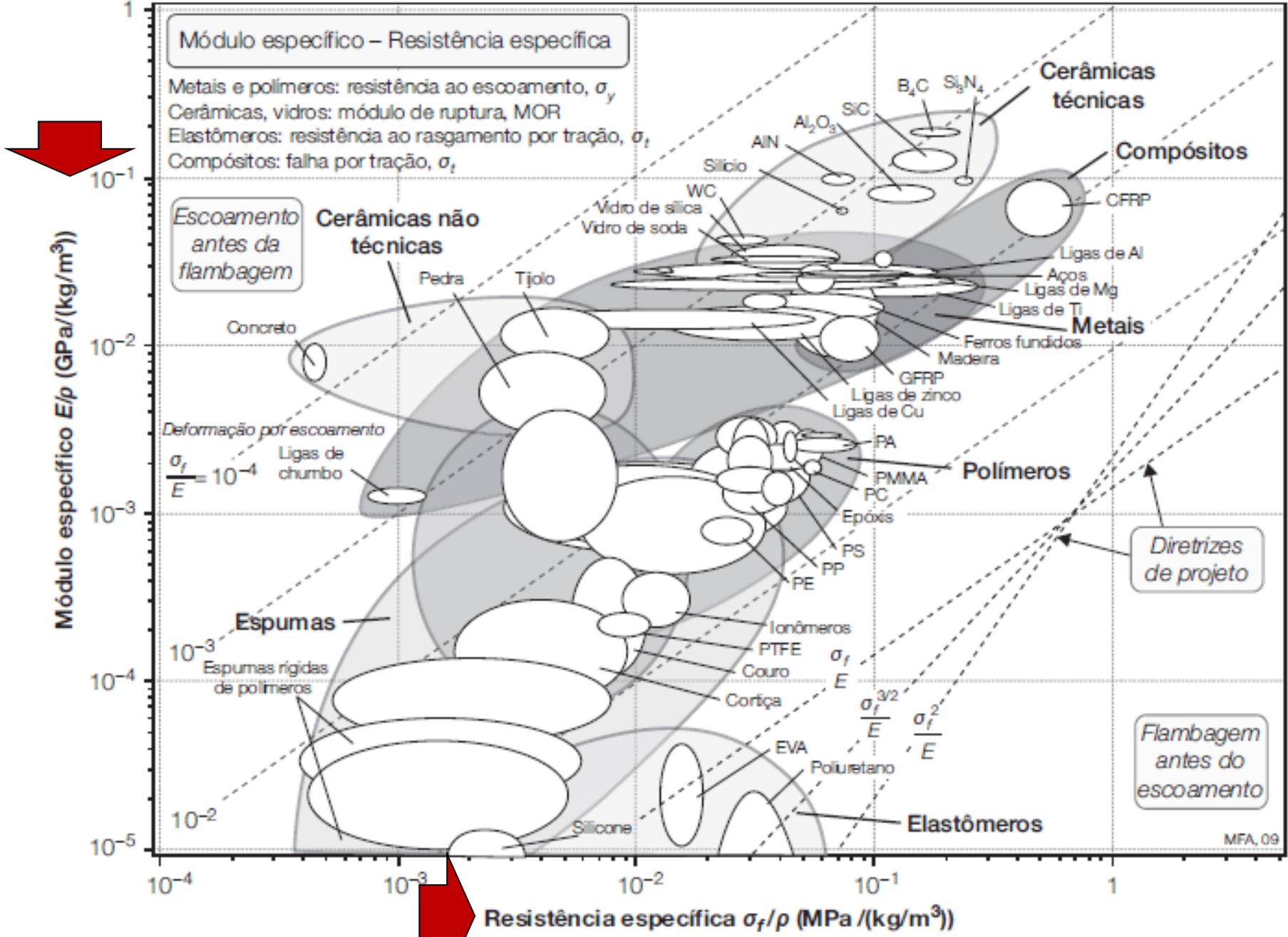
$$\delta = L\frac{F}{E(A)}$$

$$m \geq (F) \left(\frac{L^2}{\delta} \right) \left(\frac{\rho}{E} \right)$$



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

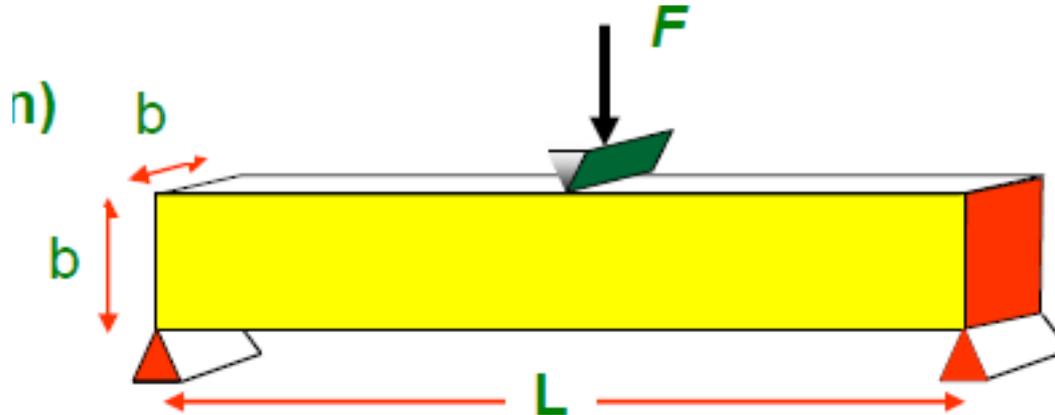
- Obtêm-se um novo índice com a **combinação de propriedades**;
- A **minimização da massa m (o objetivo)** está acoplada a uma restrição, que é **suportar a carga F sem falhar e com uma pequena deformação (limite δ)**.



ATRIBUTOS LIMITES E INDICES DE MÉRITO

Objetivo acoplado às restrições

- **Viga Leve e Rígida:** Considere uma viga com seção $b \times b$ e comprimento L carregada em flexão. Deve satisfazer a restrição da rigidez, S , o que significa que não pode defletir mais do que d sob a carga F



FUNÇÃO:

Viga

RESTRICÇÕES:

Foi especificado o comprimento L

A viga deve suportar carga fletora F sem fletir muito, significando que a rigidez à flexão S é especificada

OBJETIVO:

Minimizar a massa m da viga

VARIÁVEIS LIVRES:

Área transversal, A
Escolha do material

A.3 Deflection of beams

	C_1	C_2	
	3	2	$\delta = \frac{FL^3}{C_1EI} = \frac{ML^2}{C_1EI}$
	8	6	
	2	1	$\theta = \frac{FL^2}{C_2EI} = \frac{ML}{C_2EI}$
	48	16	
	$\frac{384}{5}$	24	$I = \text{See Table A.2 (m}^4\text{)}$ $E = \text{Youngs modulus (N/m}^2\text{)}$ $\delta = \text{Deflection (m)}$ $F = \text{Force (N)}$ $M = \text{Moment (Nm)}$ $L = \text{Length (m)}$ $b = \text{Width (m)}$ $t = \text{Depth (m)}$ $\theta = \text{End slope (-)}$ $y = \text{Distance from N.A. (m)}$ $R = \text{Radius of curvature (m)}$
	192	-	
	384	-	
	6	-	$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} = \frac{M}{R}$
	-	4	
	-	3	

- A rigidez S e o comprimento L são especificados; a seção de área A pode ser alterada:

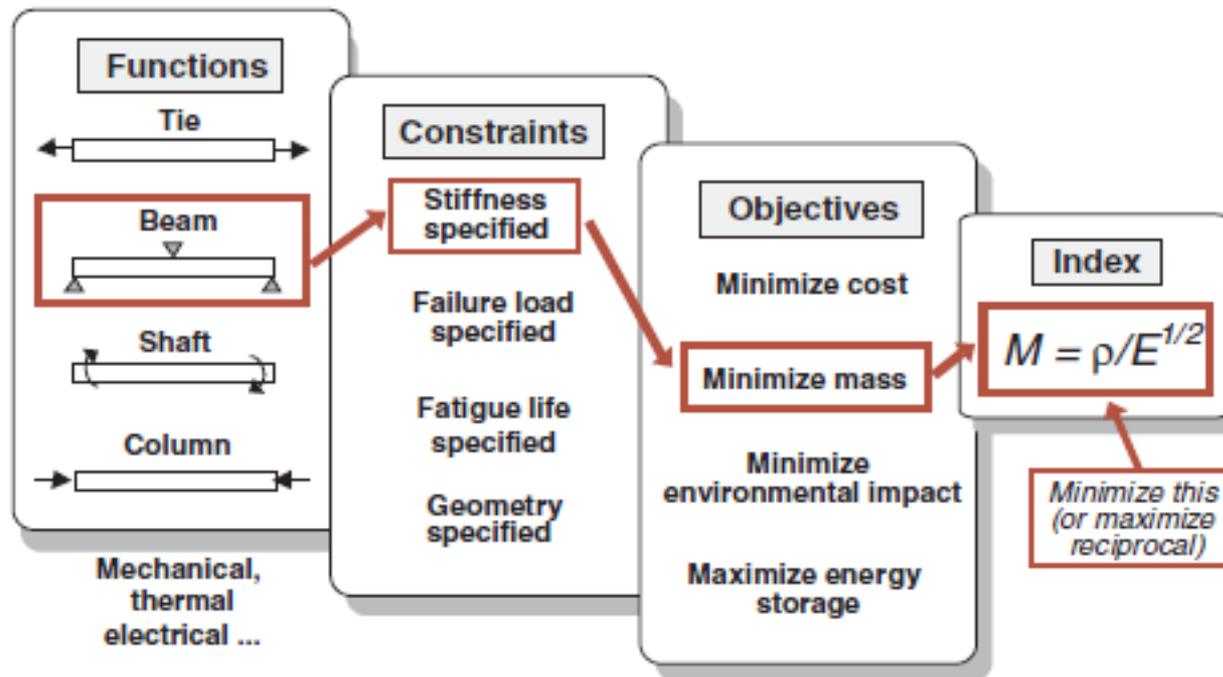
$$\left. \begin{aligned} m &= AL\rho = b^2 L\rho \\ S &= \frac{F}{\delta} \leq \frac{C_1}{EI L^3} \\ I &= \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12} \end{aligned} \right\} m \geq \left(\frac{12S}{C_1 L} \right)^{1/2} (L^3) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

Necessidade Funcional
Geometria
Prop. Do material

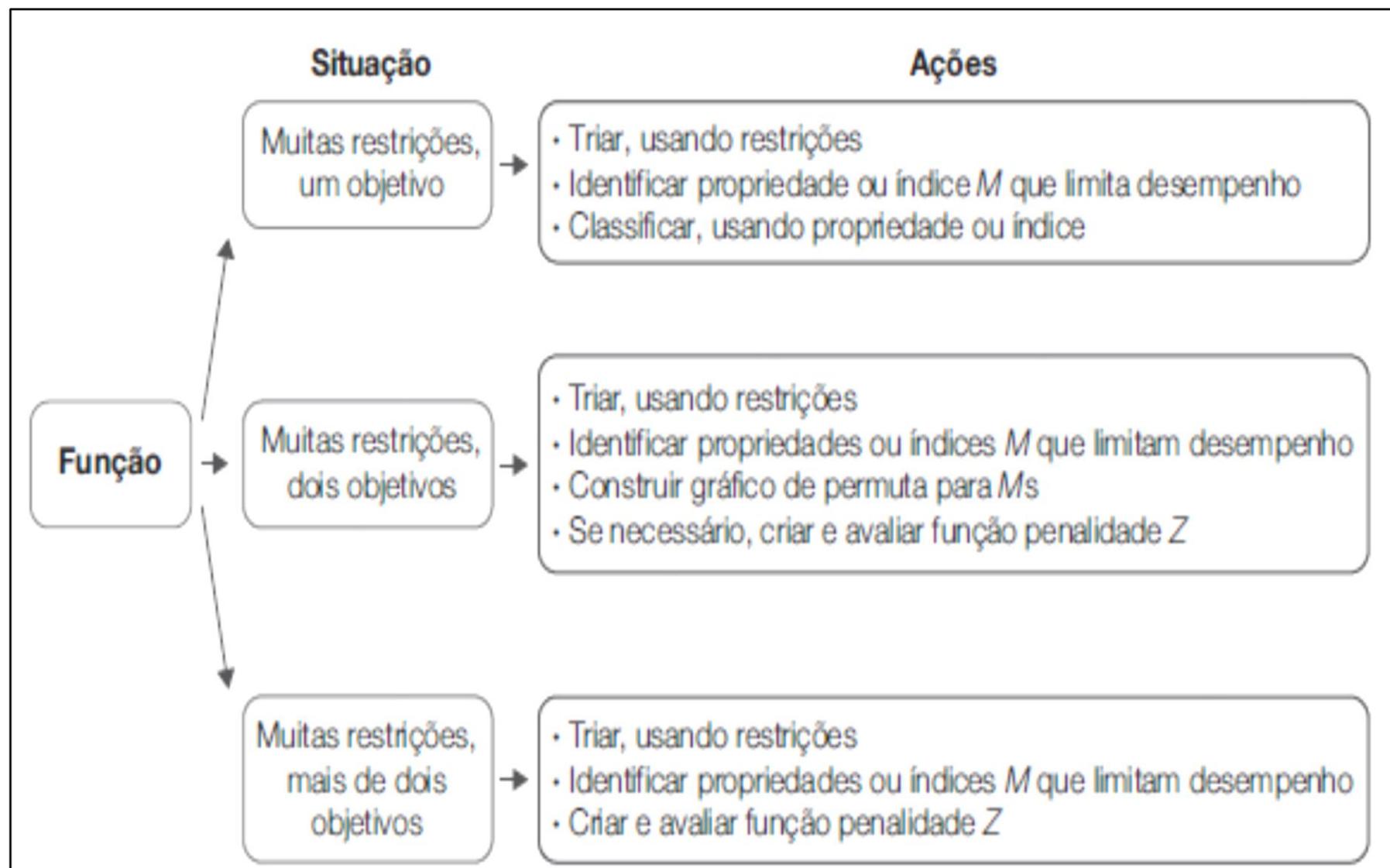
- A viga mais leve que suportará a carga F (considerando o fator de segurança) será aquele fabricado do material que possuir o menor $\rho/E^{1/2}$. Este poderia ser o **índice de mérito**, mas é mais usual expressar em termos da propriedade específica, assim:

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

- Cada combinação da Função, Restrição e Objetivo leva a um índice de mérito.



The specification of function, objective, and constraint leads to a materials index. The combination in the highlighted boxes leads to the index $E^{1/2}/\rho$.



- Triar, usando **cada restrição** por vez;
- **Classificar**, usando a métrica **de desempenho** que descreve o objetivo (muitas vezes massa, volume ou custo) ou simplesmente pelo valor do índice do material que aparece na equação para a métrica;
- Procurar **documentação** para os candidatos mais bem-classificados e usá-la para fazer a **escolha final**.

ÍNDICE DE DESEMPENHO: ÍNDICE DE MÉRITO + DESEMPENHO

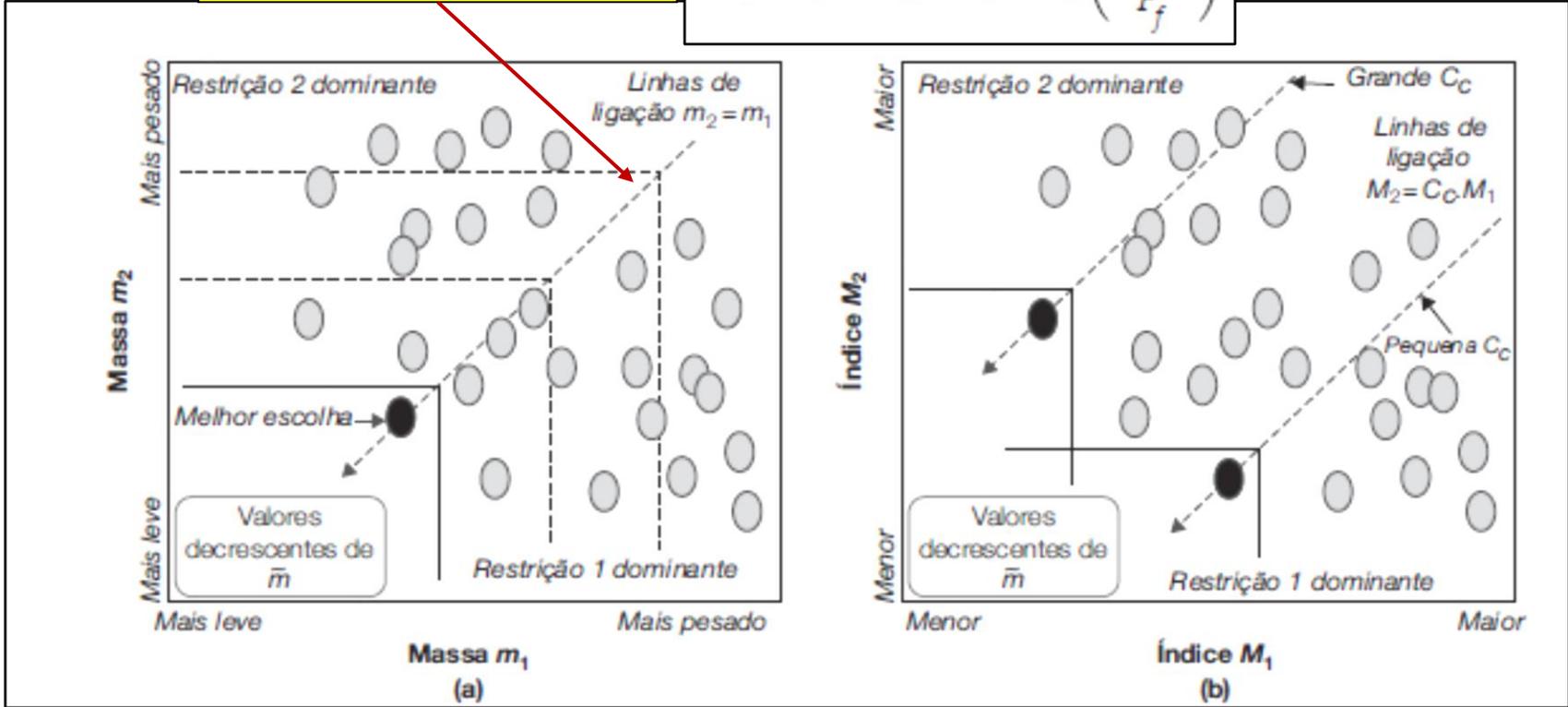
- Utiliza-se quando tenho uma **combinação de restrições/ propriedades;**
- O desempenho de um elemento estrutural é determinado por:
 - Requisitos funcionais
 - Geometria
 - Propriedades do Material
- **O desempenho P do elemento pode ser descrito pela seguinte equação:**

$$P = [(\text{Requisitos Funcionais, } F), (\text{Parâmetros Geométricos, } G), (\text{Propriedades do Material, } M)], \text{ ou } P = f(F, G, M)$$

- Onde **\underline{P}** é a **métrica do desempenho**, descreve alguns aspectos do desempenho do componente: como por exemplo a sua massa, ou volume, ou custo, ou vida e **\underline{f}** significa “a função de”.
- **O projeto ótimo é a seleção de material e geometria que maximiza ou minimiza \underline{P} , de acordo com o desejo.**

Linha de ligação

$$\log(M_2) = \log(M_1) + \log\left(\frac{L^* S^*}{F_f^*}\right)$$



ÍNDICE DE DESEMPENHO (P)



$$M_2 = \left(\frac{L^* S^*}{F_f^*}\right) M_1$$

EXEMPLO: SELEÇÃO DE UM MATERIAL COM ÍNDICE DE MÉRITO + DESEMPENHO

Selecione um material leve e resistente (a resistência deve ser superior a 300 MPa) para um eixo cilíndrico sólido abaixo:

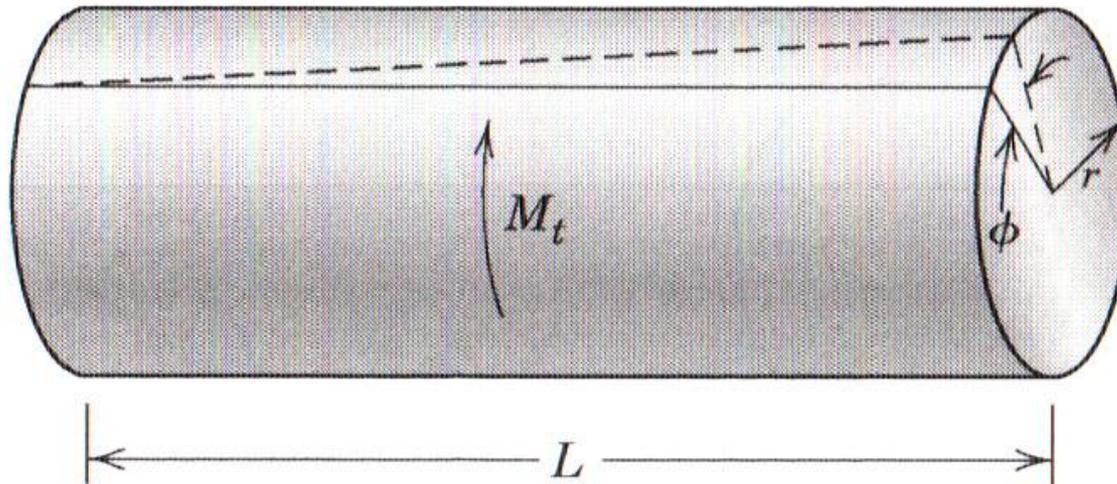


Figura 20.1 Um eixo cilíndrico sólido que experimenta um ângulo de torção ϕ em resposta à aplicação de um momento de torção M_t .

FUNÇÃO:

Eixo (transmitir torque)

RESTRIÇÕES:

Foi especificado o comprimento L
O eixo deve suportar momento torcional sem falhar

OBJETIVO:

Minimizar a massa m do eixo

VARIÁVEIS LIVRES:

Área transversal, A (raio)
Escolha do material

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, que, para um cilindro sólido é dado por:

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

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

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

(3)

Inserção de um parâmetro de desempenho



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 e τ_f (Parâmetro de desempenho), conforme:

$$\frac{\tau_f}{N} = \frac{2M_t}{\pi r^3}$$

(4)

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

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

Assim, 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 na 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:

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

Requisitos
Funcionais

Parâmetro
geométrico

Propriedades
do Material
+
Parâmetro de
desempenho

Conclusão: Melhores materiais serão os que possuírem baixas razões $\rho/\tau_f^{2/3} = 1/P$

Em termos de adequação de um material, algumas vezes é preferível trabalhar com o **índice de desempenho (mérito- relacionado ao desempenho e não somente a uma propriedade intrínseca)** que consiste simplesmente **no inverso da razão $\rho/\tau_f^{2/3}$** , ou seja:

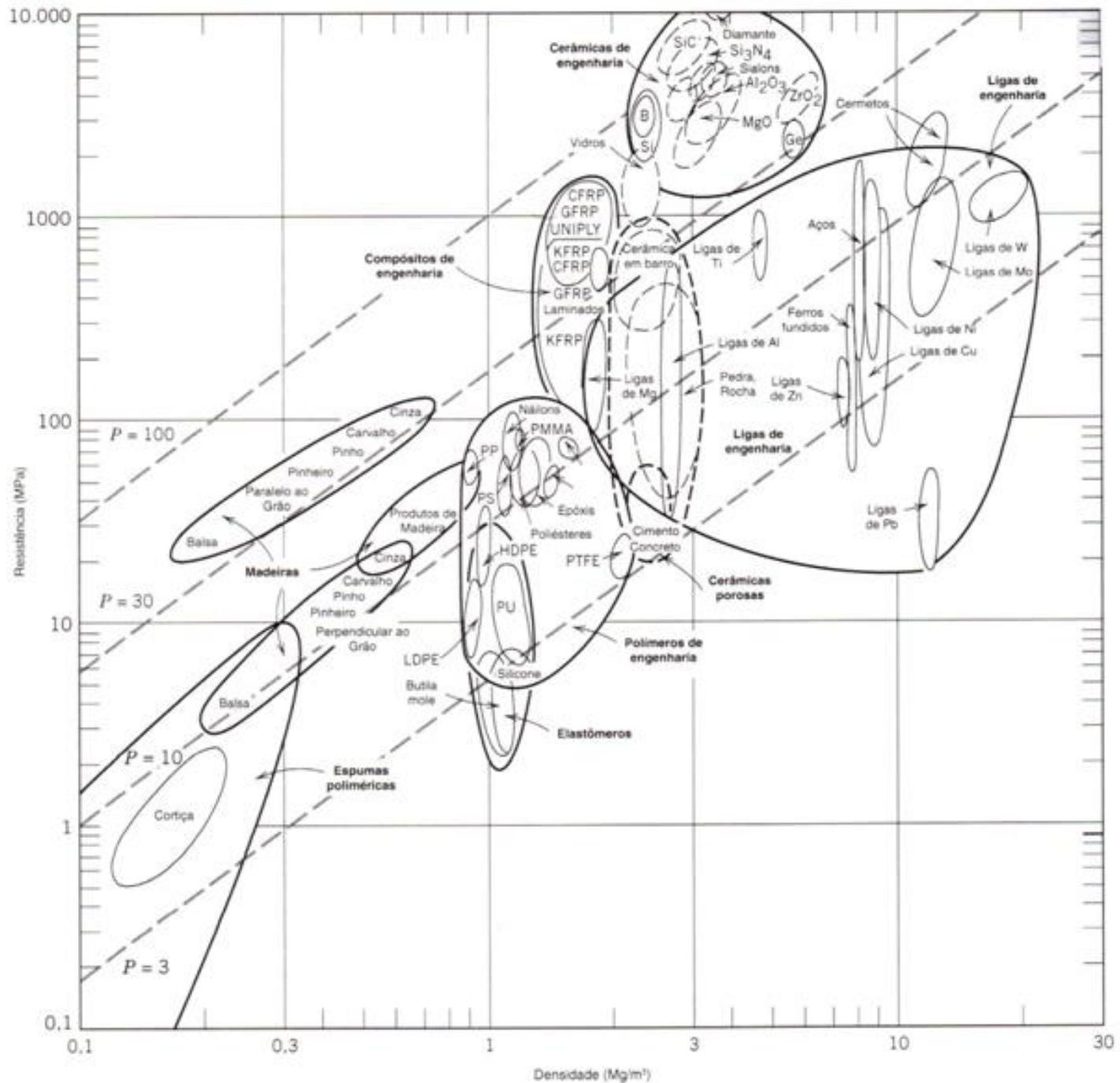
$$M = \frac{\tau_f^{2/3}}{\rho} = P \quad (9)$$



Tomando o logarítmo da equação (9) teremos:

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

Coef. angular



Restrição: a resistência deve ser superior a 300 MPa

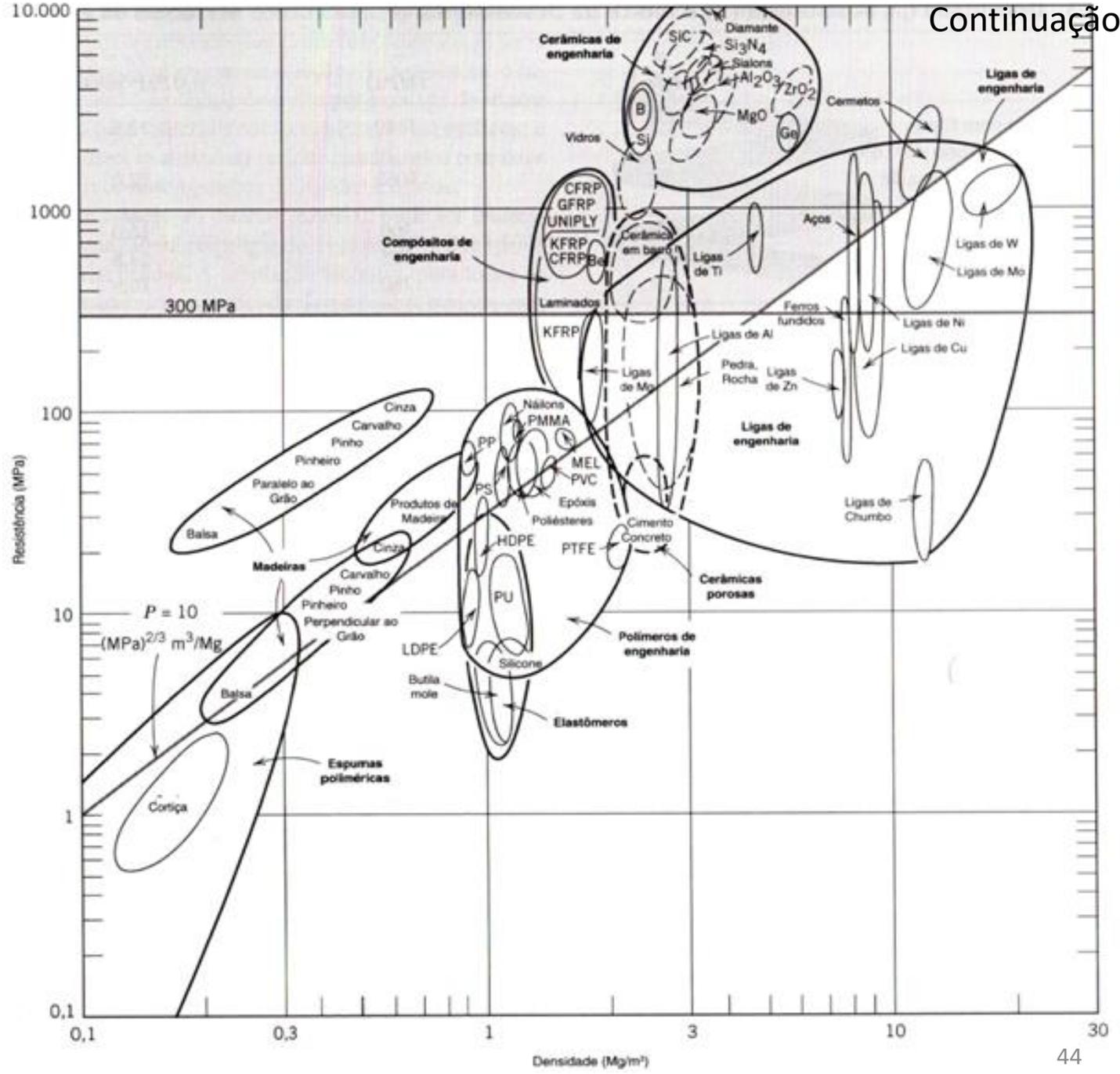


Tabela 20.1 Densidade (ρ), Resistência (τ_f) e Índice de Desempenho (P) para Cinco Materiais de Engenharia

<i>Material</i>	ρ (Mg/m^3)	τ_f (MPa)	$\tau_f^{2/3}/\rho = P$ [(MPa) ^{2/3} m^3/Mg] $M=IM$
Compósito reforçado com fibras de carbono (fração de fibras de 0,65) ^a	1,5	1140	72,8
Compósito 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.

INCREMENTO DE DESEMPENHO

- O desempenho de um elemento estrutural é determinado por:
 - Requisitos funcionais
 - Geometria
 - Propriedades do Material
 - **Custo por unidade de propriedade. Ex: custo por unidade de massa minimizada**
- **O incremento de desempenho P do elemento pode ser descrito pela seguinte equação:**
$$IP = [(Requisitos\ Funcionais,\ F),\ (Parâmetros\ Geométricos,\ G),\ (Propriedades\ do\ Material,\ M),\ (custo\ por\ unidade\ de\ propriedade\ (C))],\ \text{ou}\ P = f(F, G, M, C)$$
- **O projeto ótimo é a seleção de material e geometria que maximiza ou minimiza IP , de acordo com o desejo.**
- **Estes casos envolvem também a seleção de processos.**
- **Em casos onde o custo é muito alto, o maior interesse é o custo do incremento por unidade de propriedade, em contraposição ao custo total.**

$$\text{US\$/kg ganho} = \{f_c P_c [100 (\lambda f - 1) - \lambda Q]\} \div Q$$

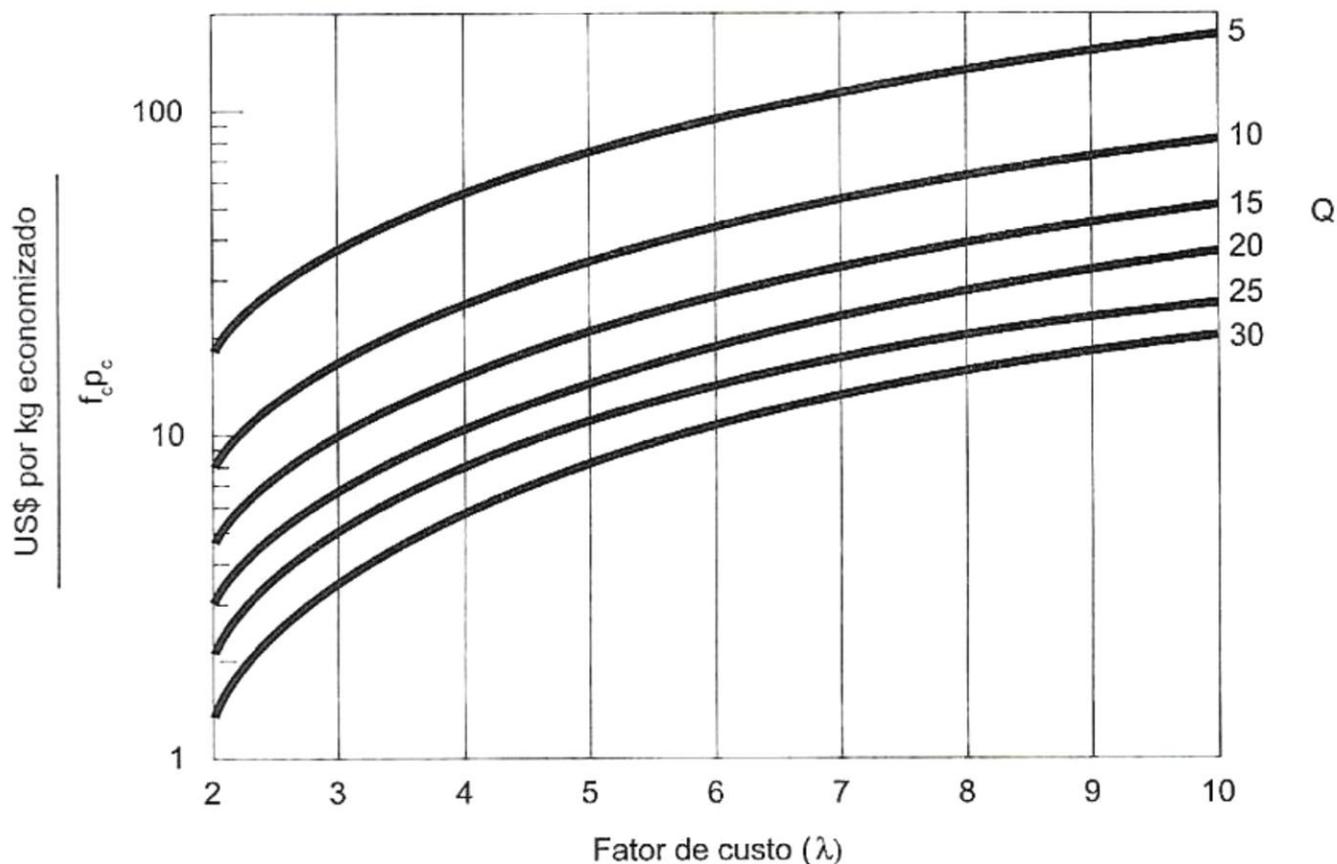


Figura 6.10 Solução gráfica da equação 6.3. O custo por kg ganho é calculado para diversos valores do fator de custo (λ) e da redução percentual de peso (Q).

FUNÇÃO PENALIDADE

Uma outra **função** relacionada ao **custo** pode ser utilizada para **facilitar a seleção**: a **função penalidade**.

$$Z_1 = C_1 + \alpha m_1$$

$$Z_2 = C_2 + \alpha m_2$$

$$M_2 = \left(\frac{L^* S^*}{F_f^*} \right) M_1$$

FIM