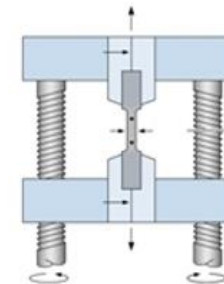
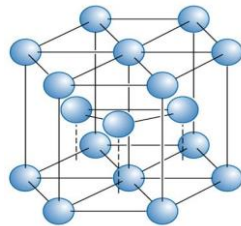
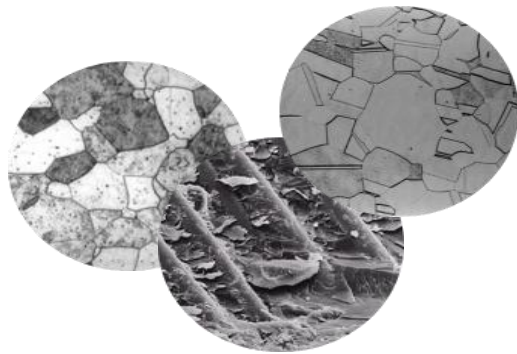


SMM0333 - SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PROJETO MECÂNICO



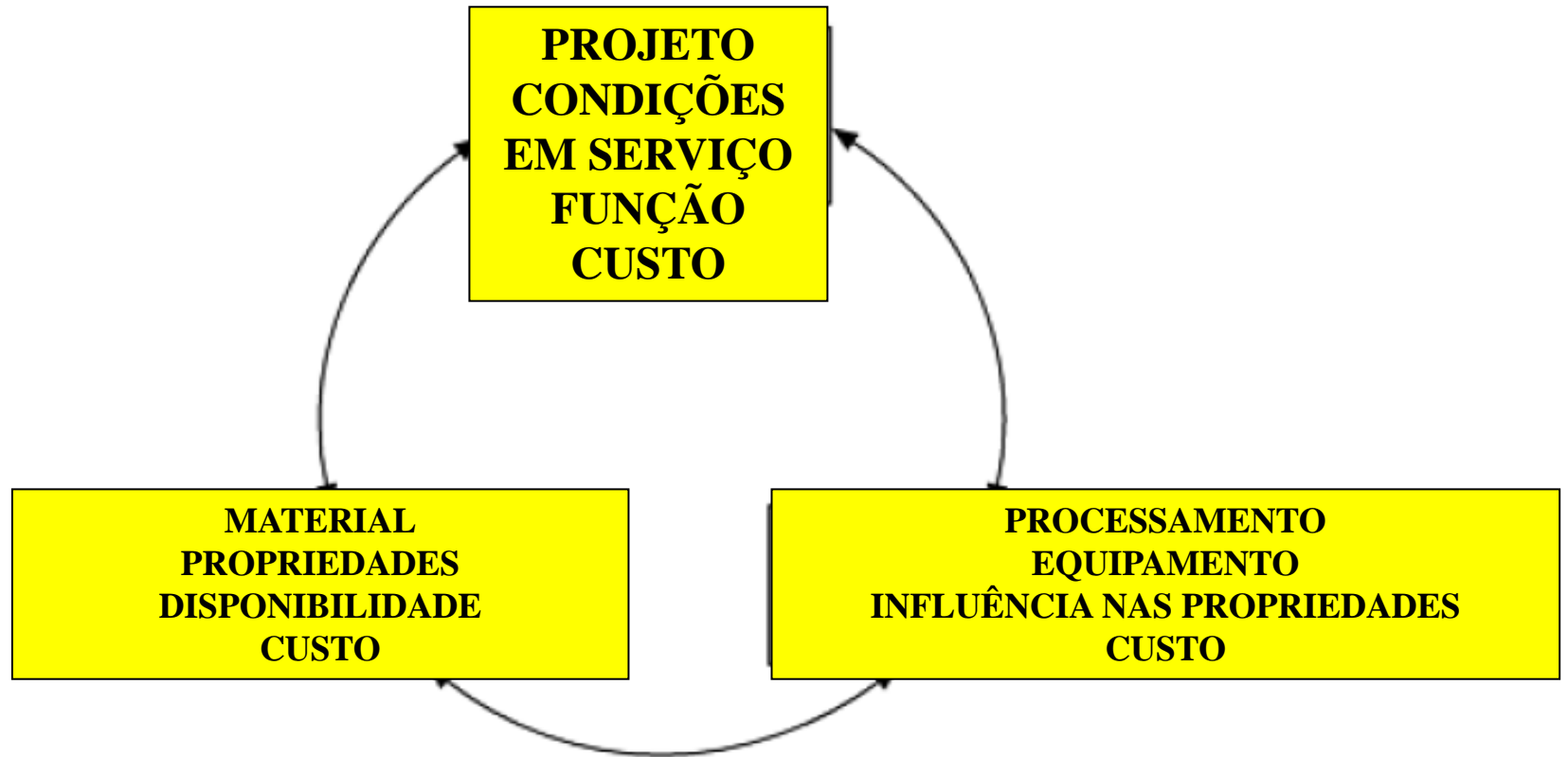


Fig. 1 Interrelationship among design, materials, and processing

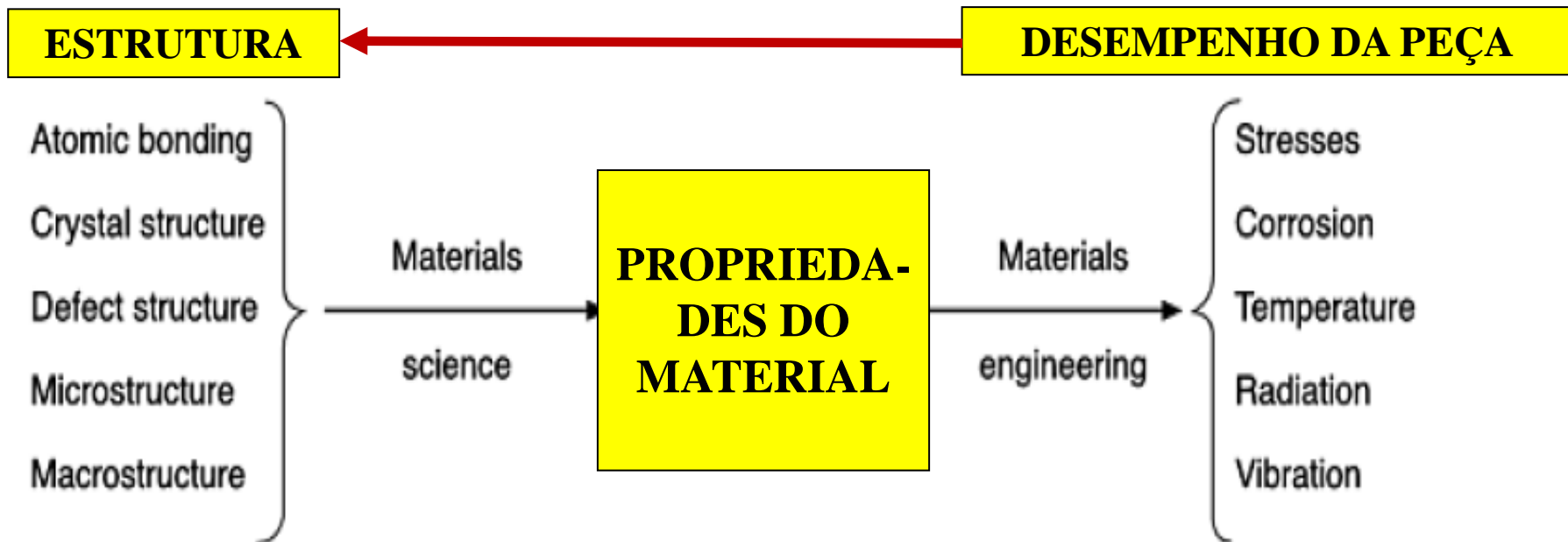


Fig. 3 The role played by material properties in the selection of materials

Table 1 General comparison of properties of metals, ceramics, and polymers

Property (approximate values)	METAIS	CERÂMICAS	POLIMEROS
Density, g/cm ³	2 to 22 (average ~8)	2 to 19 (average ~4)	1 to 2
Melting points	Low (Ga = 29.78 °C, or 85.6 °F) to high (W = 3410 °C, or 6170 °F)	High (up to 4000 °C, or 7230 °F)	Low
Hardness	Medium	High	Low
Machinability	Good	Poor	Good

(ADAPTADO DE ASM METALS HANDBOOK, VOL.20)

METAIS**CERÂMICAS****POLIMEROS**

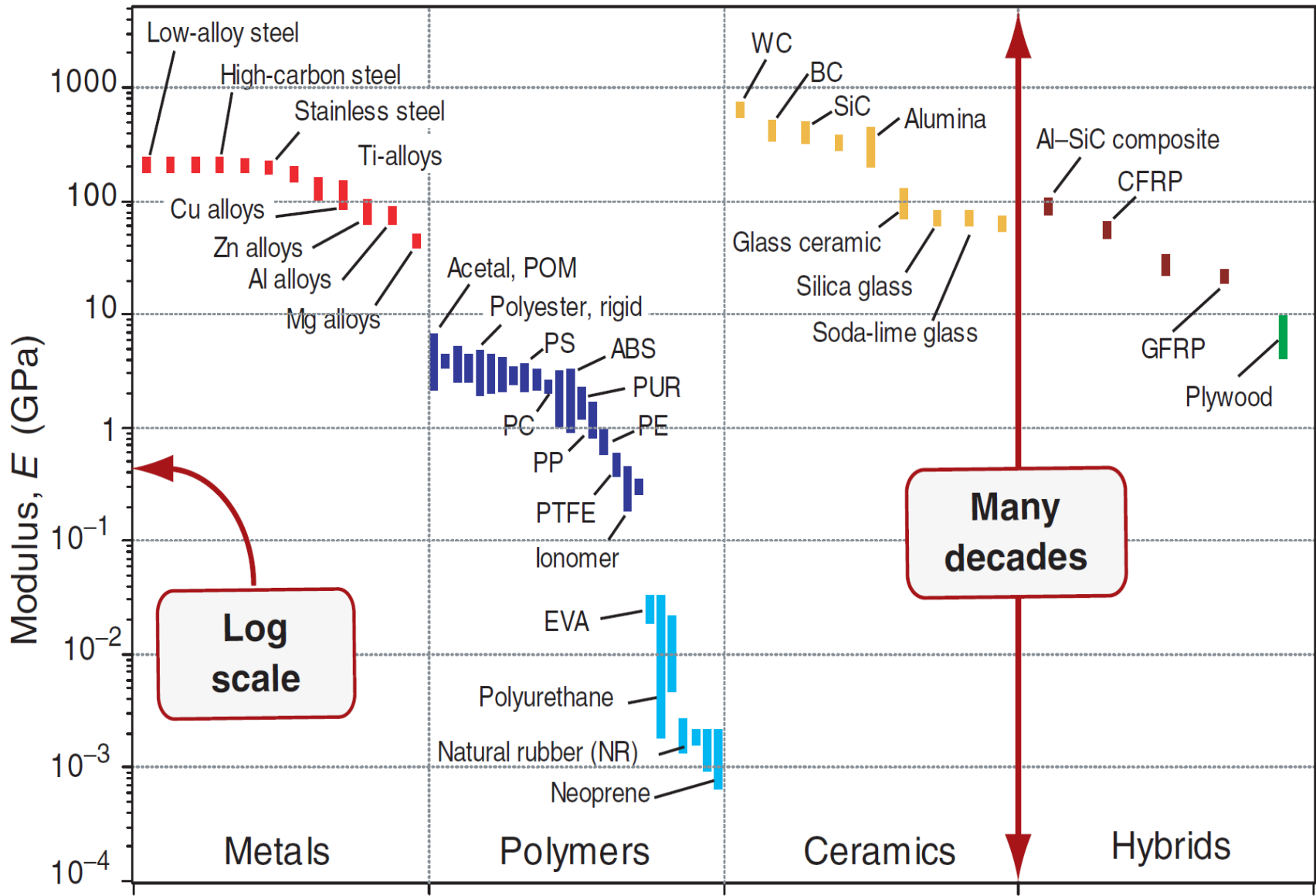
Tensile strength, MPa (ksi)	Up to 2500 (360)	Up to 400 (58)	Up to 140 (20)
Compressive strength, MPa (ksi)	Up to 2500 (360)	Up to 5000 (725)	Up to 350 (50)
Young's modulus, GPa (10 ⁶ psi)	15 to 400 (2 to 58)	150 to 450 (22 to 65)	0.001 to 10 (0.00015 to 1.45)
High-temperature creep resistance	Poor to medium	Excellent	...
Thermal expansion	Medium to high	Low to medium	Very high
Thermal conductivity	Medium to high	Medium, but often decreases rapidly with temperature	Very low
Thermal shock resistance	Good	Generally poor	...
Electrical characteristics	Conductors	Insulators	Insulators
Chemical resistance	Low to medium	Excellent	Good
Oxidation resistance	Generally poor	Oxides excellent; SiC and Si ₃ N ₄ good	...

(ADAPTADO DE ASM METALS HANDBOOK, VOL.20)

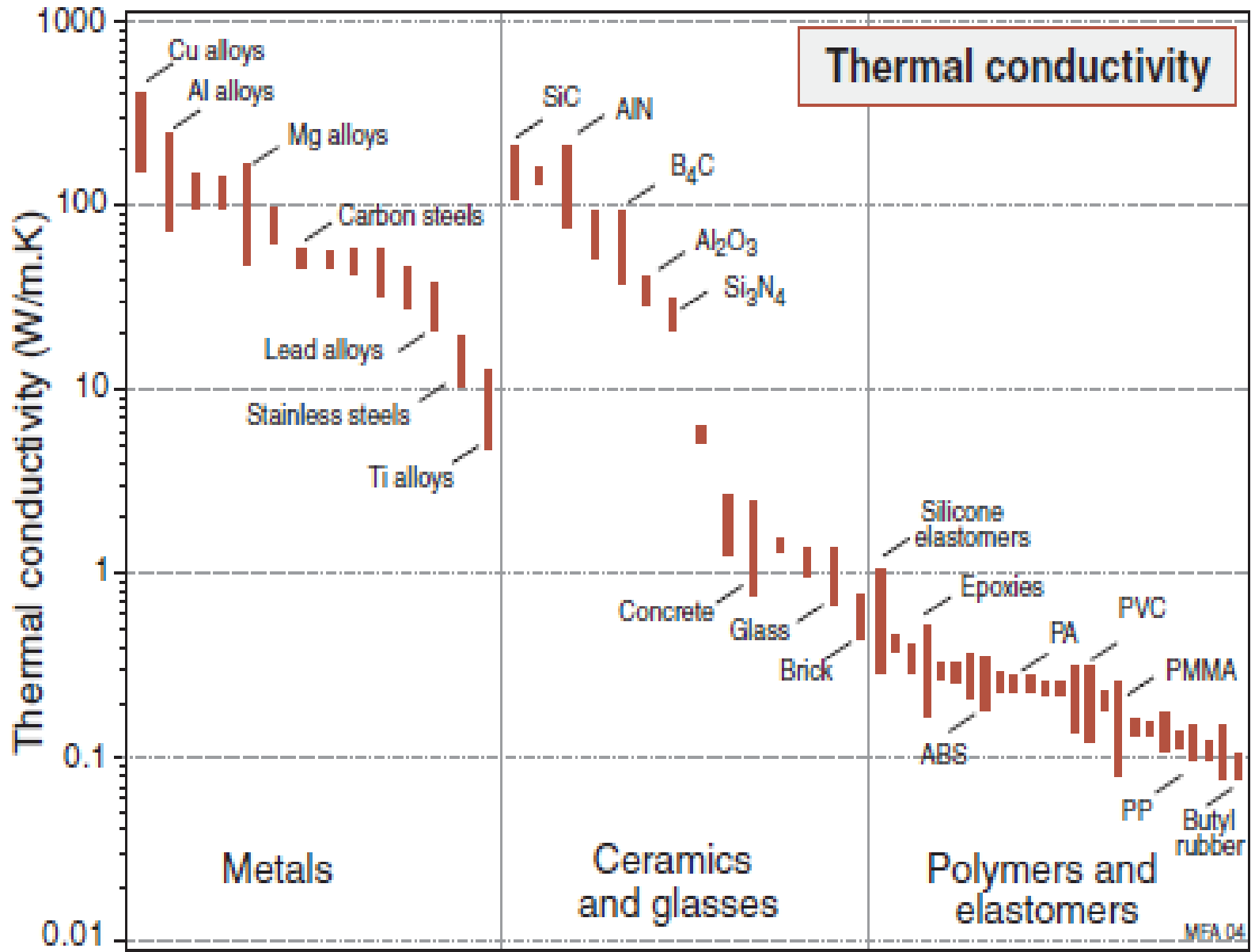
Classe	Propriedade	Símbolo e unidades
Gerais	Densidade	ρ (kg/m ³ ou Mg/m ³)
	Preço	C_m (\$/kg)
Mecânicas	Módulos de elasticidade (de Young, transversal, de elasticidade volumétrica)	E, G, K (GPa)
	Tensão limite de escoamento	σ_y (MPa)
	Limite de resistência	σ_{ts} (MPa)
	Resistência à compressão	σ_c (MPa)
	Resistência à falha	σ_f (MPa)
	Dureza	H (Vickers)
	Alongamento	ϵ (-)
	Limite de fadiga	σ_o (MPa)
	Tenacidade à fratura	K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})
	Tenacidade	G_{Ic} (kJ/m ²)
	Coeficiente de perda (capacidade de amortecimento)	η (-)
Taxa de desgaste (constante de Archard)	K_A MPa ⁻¹	
Térmicas	Ponto de fusão	T_m (°C ou K)
	Temperatura de transição vítrea	T_g (°C ou K)
	Temperatura de serviço máxima	T_{max} (°C ou K)
	Temperatura de serviço mínima	T_{min} (°C ou K)
	Condutividade térmica	λ (W/m.K)
	Calor específico	C_p (J/kg.K)
	Coeficiente de expansão térmica	α (K ⁻¹)
	Resistência a choque térmico	ΔT_s (°C ou K)

Classe	Propriedade	Símbolo e unidades
Elétricas	Resistividade elétrica	ρ_e ($\Omega.m$ ou $\mu\Omega.cm$)
	Constante dielétrica	ϵ_r (-)
	Força dielétrica	V_b ($10^8 V/m$)
	Fator de potência	P (-)
Óticas	Índice de refração	n (-)
Propriedades ecológicas	Energia incorporada	H_m (MJ/kg)
	Pegada de carbono	CO_2 (kg/kg)

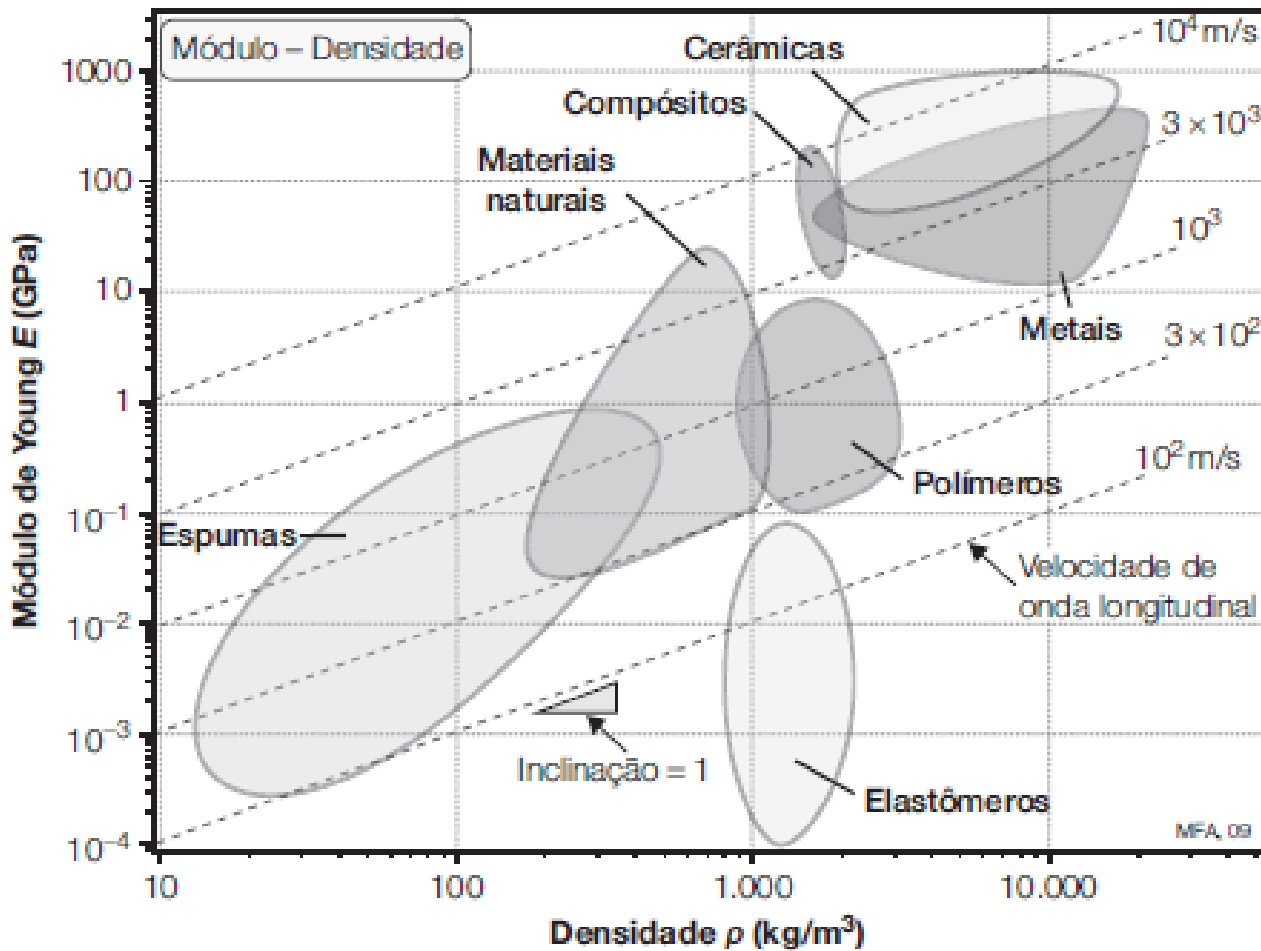
As propriedades dos materiais delimitam o desempenho do componente. Estas possuem um intervalo de valores.



Thermal conductivity



- **É raro** que o **desempenho** de um componente dependa **apenas de uma propriedade**;
- Quase sempre é **uma combinação (ou várias combinações) de propriedades**: ideia do **mapa de propriedades** para **facilitar a seleção**;
- Cada **material de engenharia** tem uma **faixa de propriedades** que pode ser colocada **em gráfico**;
- Esses materiais podem **ser divididos em classes** de acordo com suas **propriedades**;
- **Essas classes** podem ser devidamente **“envelopadas”**.



**Velocidade de ondas
sonoras/mecânicas/elásticas
longitudinais**

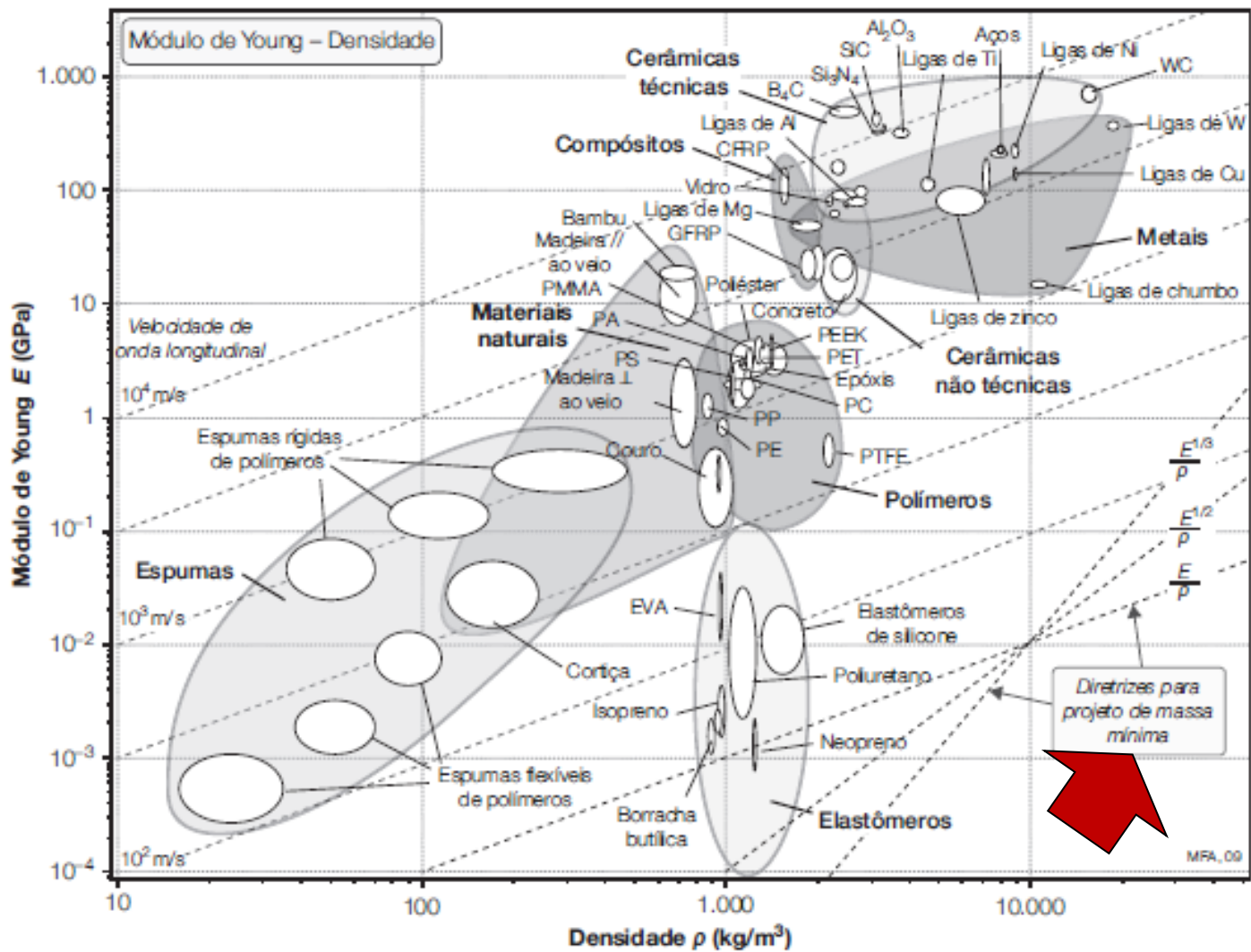
$$v = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$\log E = \log \rho + 2 \log v$$

Para um **valor fixo de v** , o gráfico dessa equação é uma linha reta de inclinação 1. Isso nos permite acrescentar **família de linhas diagonais paralelas** que ligam materiais nos quais as **ondas longitudinais** viajam com a **mesma velocidade (linhas guia)**. Todos os diagramas permitem a apresentação de relações fundamentais adicionais desse tipo. Parâmetros de otimização de projeto denominados **índices de materiais ou índices de mérito (IM)** também são representados nos diagramas

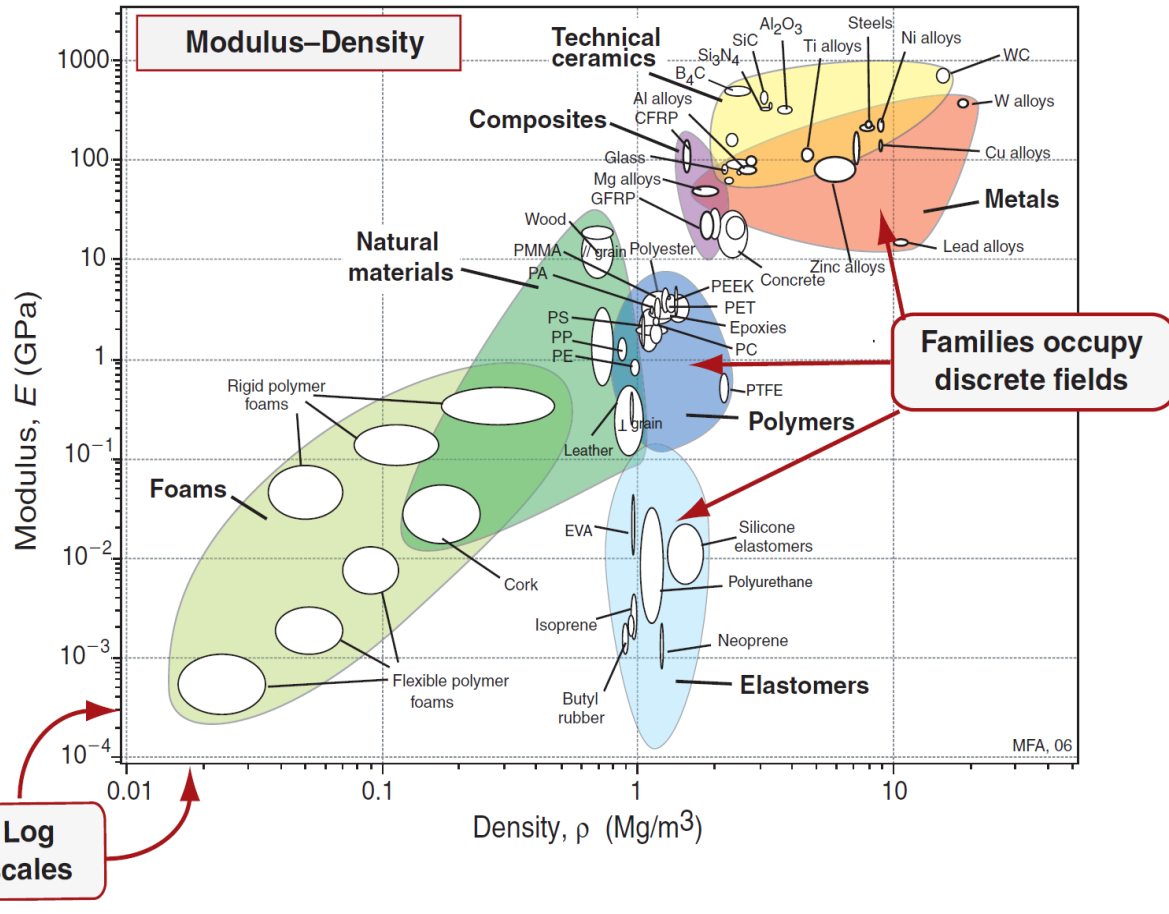
Para projetos limitados pela deformação plástica, é usual a utilização de mapas de propriedades **módulo (E) - densidade(ρ)**.

Materiais acima das linhas-guia apresentarão melhor desempenho, e os abaixo pior. Para desempenho similar (ex: mesma deflexão sob mesma carga), os que estão acima da linha terão menor massa do que os que estão ao longo da linha ou abaixo dela.



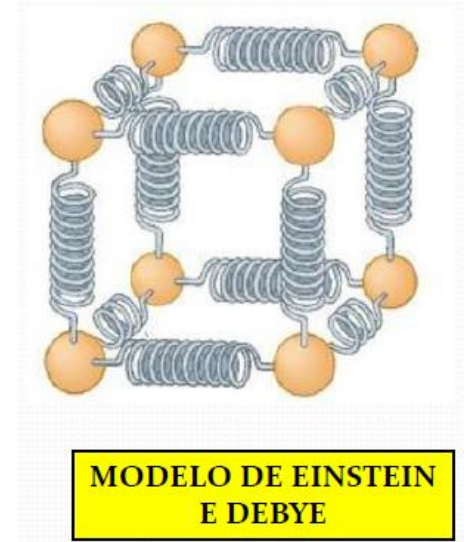
Os envelopes englobam dados para uma determinada classe de material. As linhas diagonais mostram a velocidade de onda longitudinal. As diretrizes de E/ρ , $E^{1/2}/\rho$ e $E^{1/3}/\rho$ constantes permitem a seleção de materiais para projeto de peso mínimo, limitado por deflexão.

Mapa de Módulo - Densidade

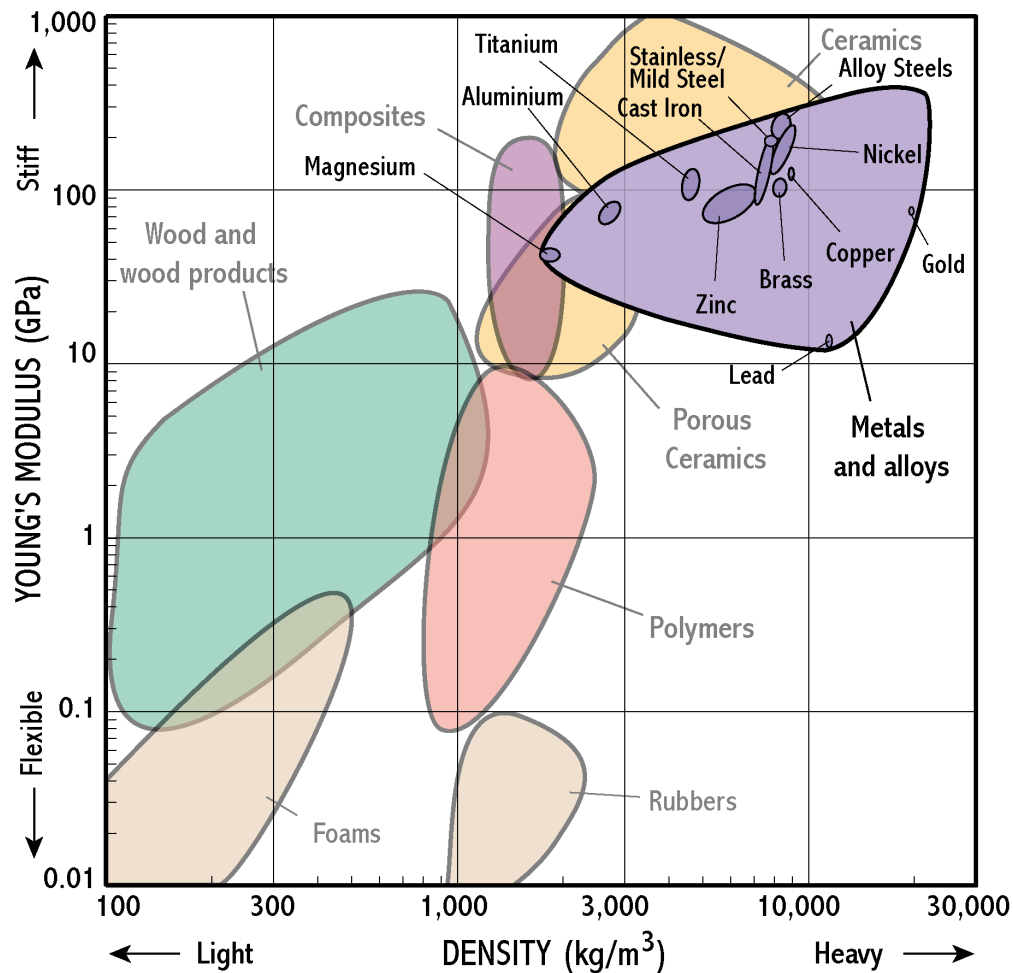


$$E \approx \frac{S}{r_0}$$

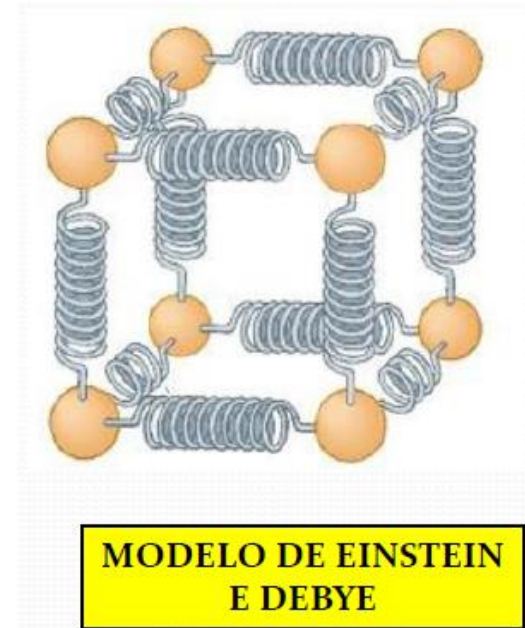
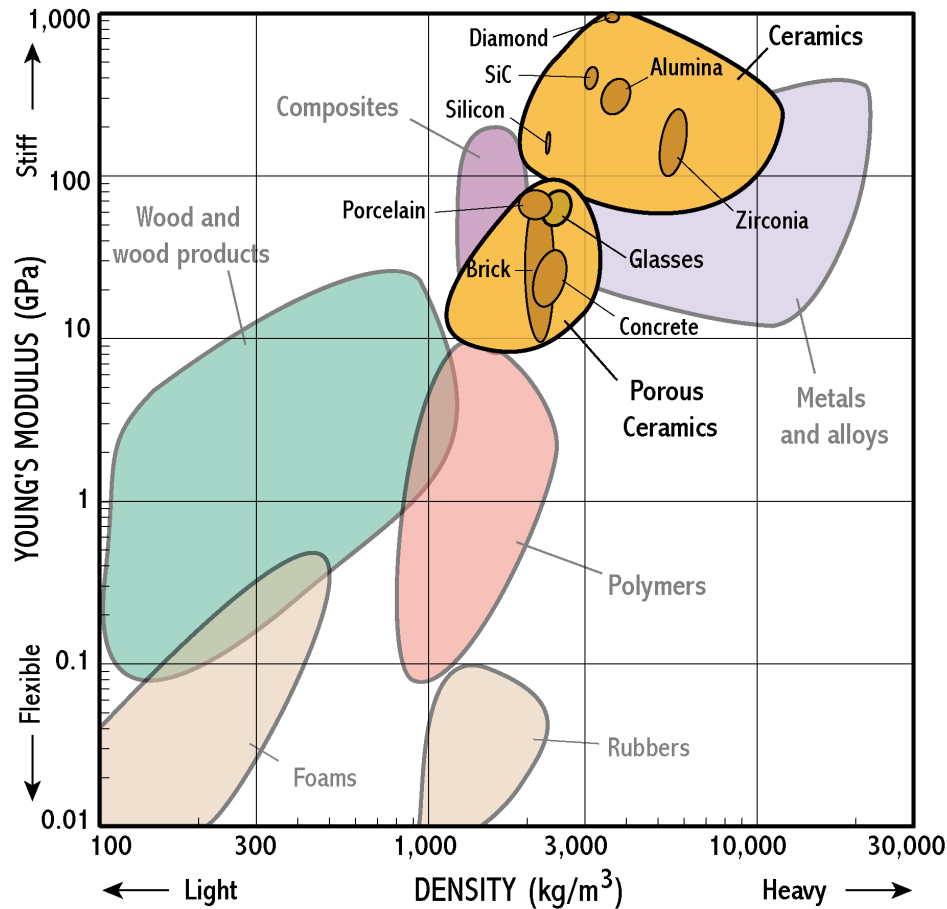
r_0 = raio atômico
S = Const. de mola, N/m



- **Densidade** depende do **peso atômico** (toda gama da tabela periódica), do **tamanho** e do **empacotamento** (FEA);
- O **Módulo** depende: **rigidez das ligações** (covalente de 20 a 200 N/m; iônica 15- 100) e da **densidade** delas por unidade de volume.

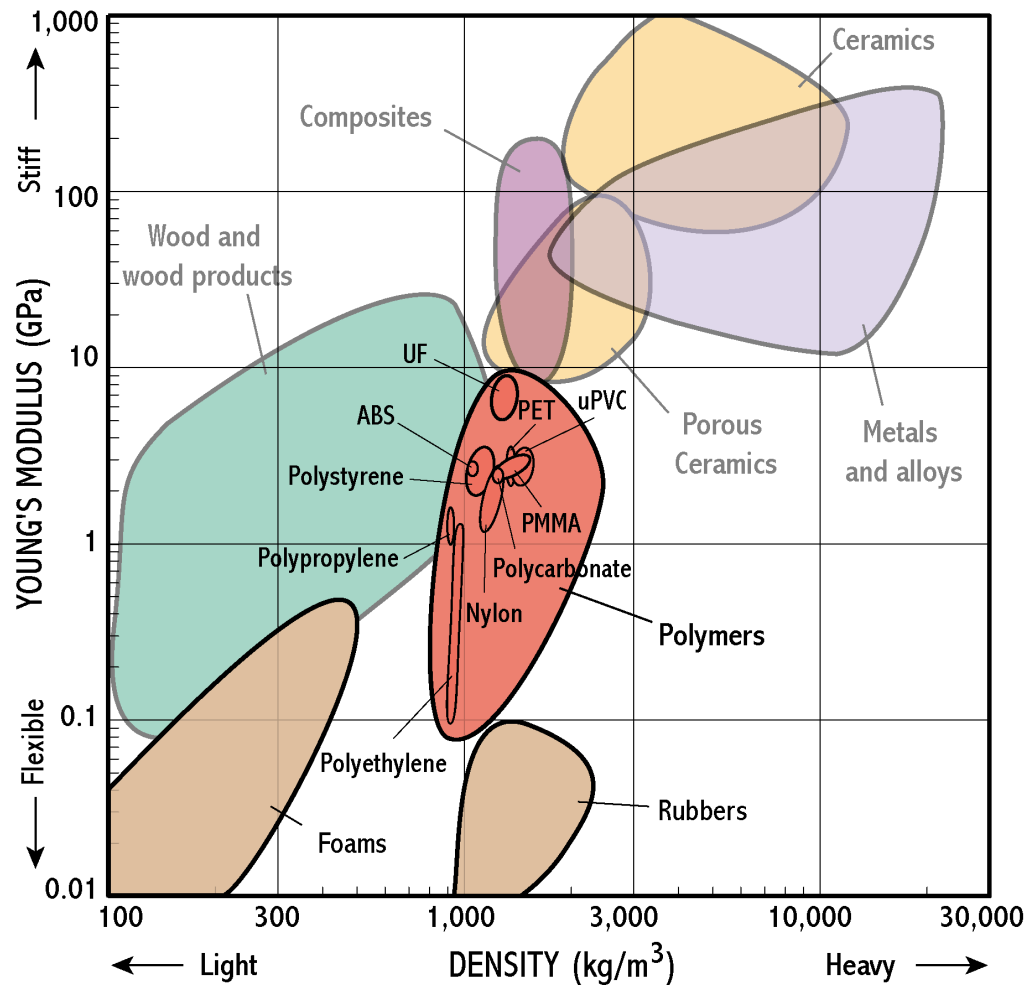


- **Metais são densos: átomos “pesados” empacotados densamente;**
- **Os metais possuem alto módulo de elasticidade por que o empacotamento compacto fornece alta densidade de ligações e as ligações são fortes.**

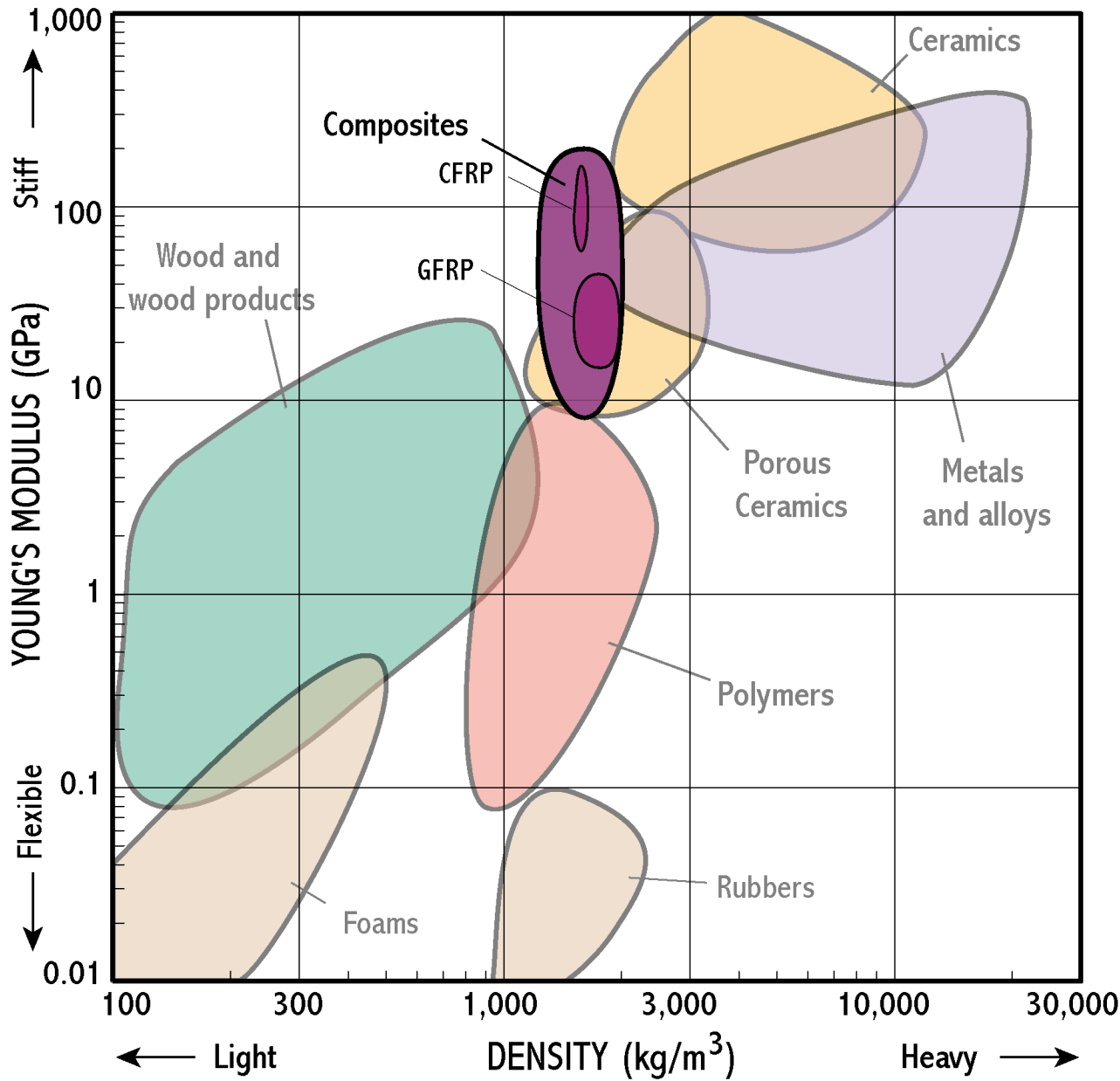


Os materiais cerâmicos possuem densidade mais baixa do que os metais porque contêm O, N ou C.

Possuem maior rigidez. O diamante possui alto módulo porque os átomos de carbono são pequenos (dando alta densidade de ligações) e seus átomos são unidos por “molas” muito fortes ($S=200\text{N/m}$).

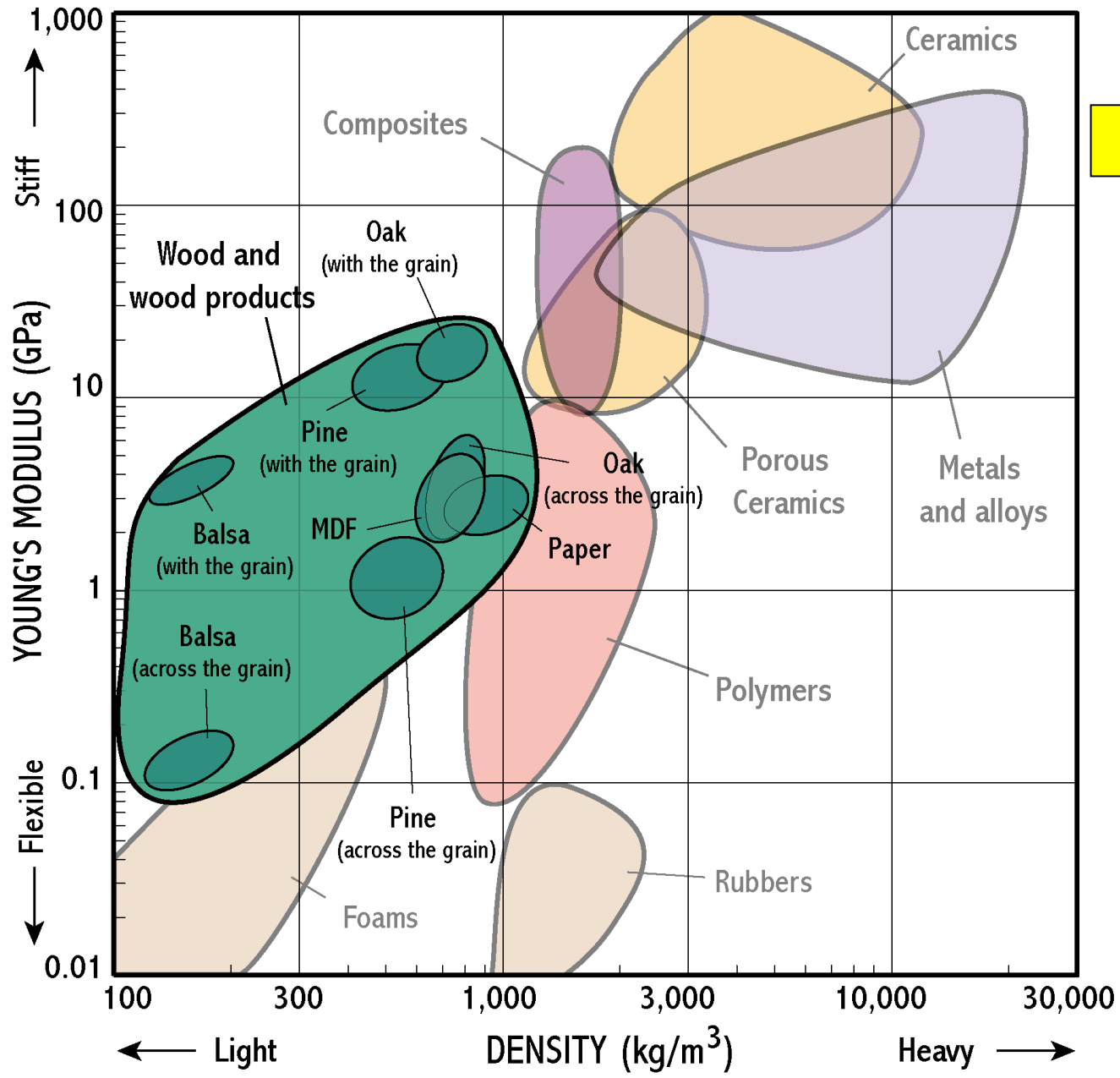


- Os polímeros possuem baixa densidade porque eles são basicamente feitos de carbono e hidrogênio, em um arranjo amorfo ou cristalino de baixa densidade;
- Os polímeros possuem ligações covalentes como as do diamante e ligações entre cadeias fracas por pontes de hidrogênio ou Forças de Van der Waals ($S=0,5$ a 2 N/m).

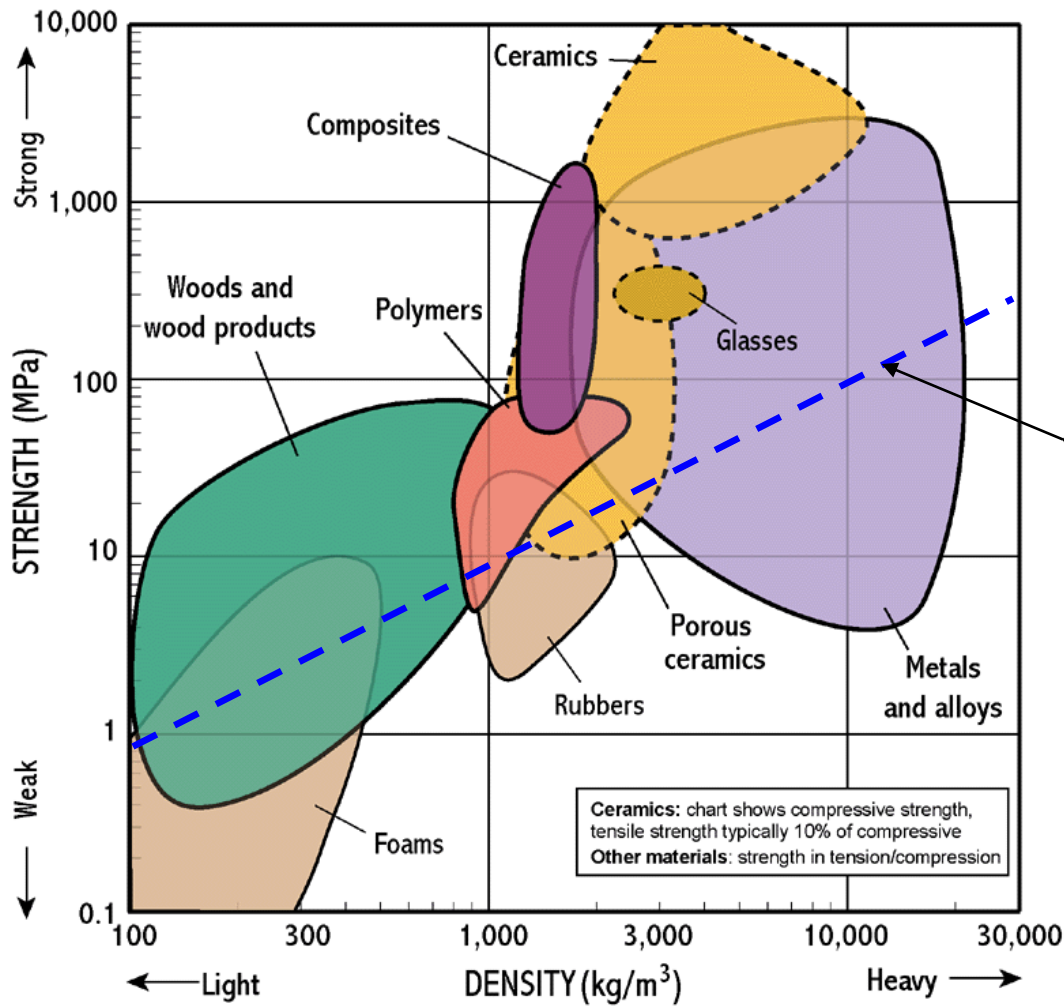


COMPÓSITOS

MADEIRA



Mapa de Resistência(σ) – Densidade (ρ)

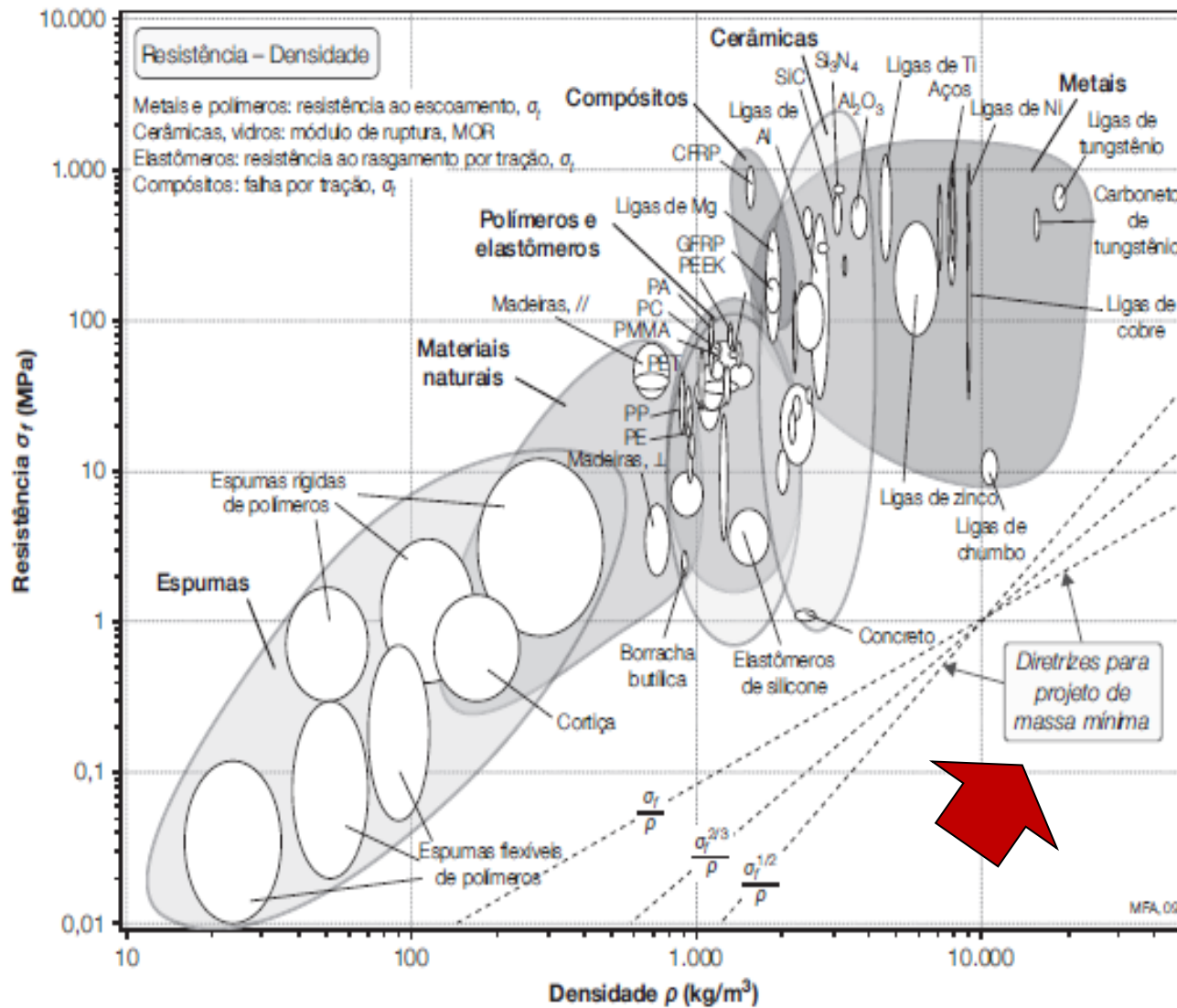


O grande espalhamento vertical é devido aos diversos processos de endurecimento.

- Este grande intervalo está associado com a resistência ao cisalhamento:

trat. Térmicos, conformação, carregamento de polímeros, tratamento de vidros e cerâmicas, etc.

Podem ser definidos índices de mérito (IM), como $\frac{\sigma}{\rho}$.



- σ/ρ índice de mérito para barra em tração;
- $\sigma^{2/3}/\rho$ índice de mérito para barra em flexão
- $\sigma^{1/2}/\rho$ índice de mérito para placa em flexão

Todos os materiais que estiverem **acima e à esquerda** das linhas dos IM terão **IM mais favoráveis** dos que estão **ao longo da linha**

O termo “**resistência**” necessita de uma **definição específica** para cada material:

- **Metais e polímeros**, é a **resistência ao escoamento**;
- **Cerâmicas frágeis**: **módulo de ruptura em flexão**, ou **resistência à compressão** que, para cerâmicas é 10 a 15 vezes maior do que a resistência à tração;
- **Elastômeros**: a **resistência ao rasgamento** por tração;
- **Compósitos**: **resistência à falha** por tração;

Como já mencionado, utiliza-se σ_f para permitir uma **comparação de primeira ordem**

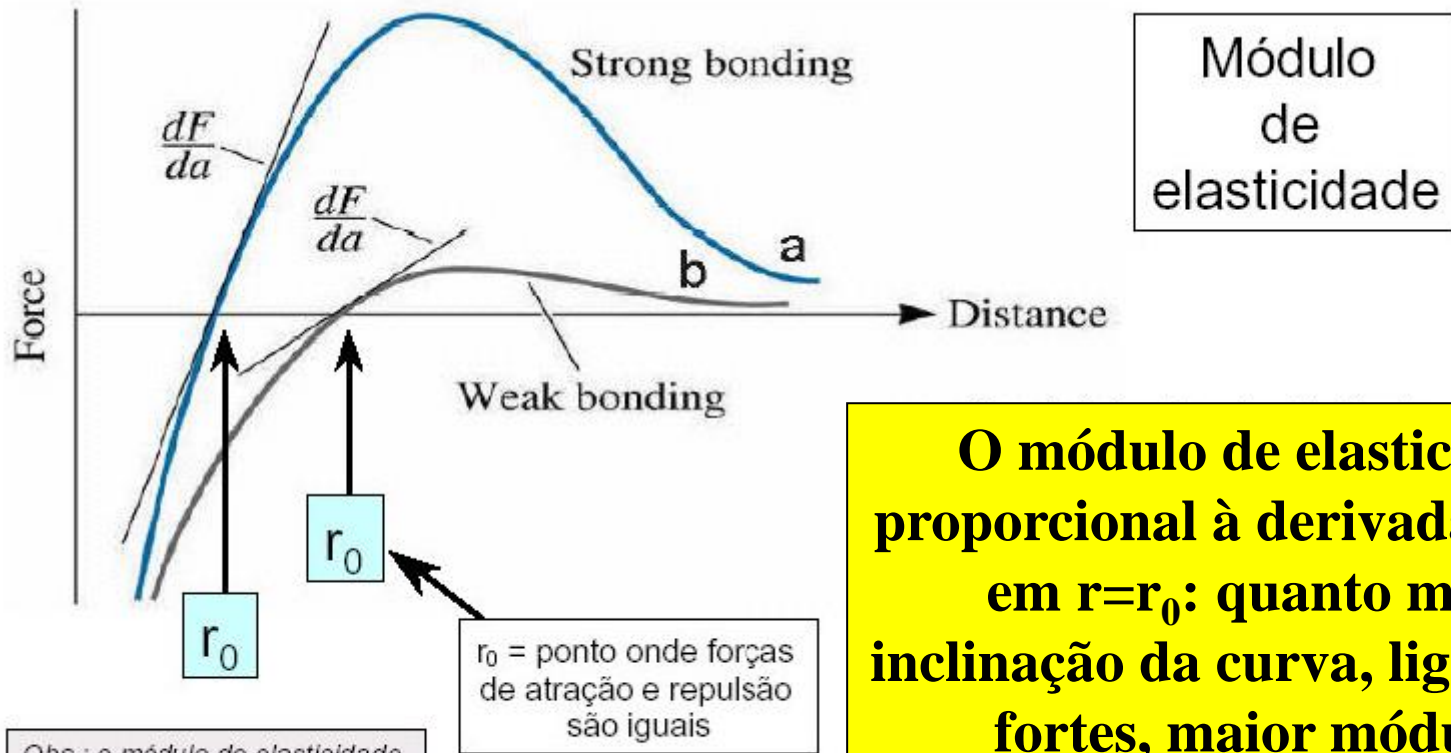
Mapa de Módulo (E)-Resistência(σ_f)

Relacionado à **deformação por escoamento** ou deformação por **fratura**, σ_f / E (que significa a **deformação** à qual o material **deixa de ser linearmente elástico**): família de **linhas retas paralelas**

Para alguns **polímeros** este valor é **próximo**, mas para a **maioria** dos sólidos **não**:

- **Ligações não localizadas não são quebradas** quando a estrutura é **cisalhada**;
- Existência de **defeitos**;
- O caso de dos **elastômeros** é **anômalo** porque o **módulo não é derivado do alongamento das ligações dentro da cadeia**, mas das **ligações entre as cadeias moleculares**.

Lembrando: módulo de Elasticidade



Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso

O módulo de elasticidade é proporcional à derivada da curva em $r=r_0$: quanto maior a inclinação da curva, ligações mais fortes, maior módulo de elasticidade. Material a tem maior módulo que material b!

**PARA ELASTÔMEROS É MAIS COMPLEXO:
LIGAÇÃO ENTRE AS CADEIAS!!!**

A fratura inicia com o rompimento das ligações químicas. Uma ligação pode ser rompida por tensão, quando for estirada acima de 10% do comprimento da ligação original. Então, considerando S a rigidez (força de ligação) da ligação e r_0 a distância interatômica de equilíbrio, a força (F) necessária para quebrar a ligação seria:

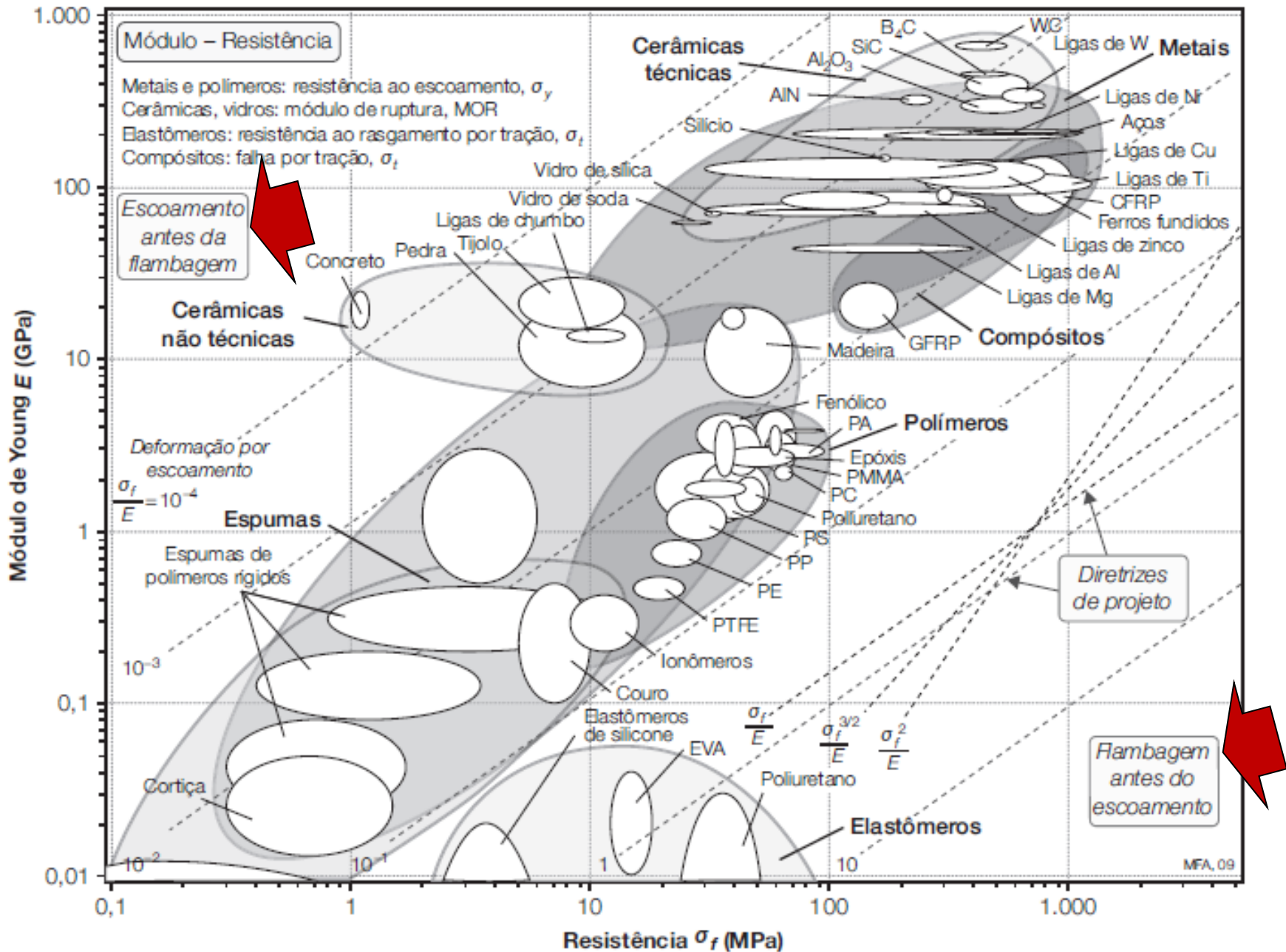
$$F^* \approx \frac{S r_0}{10}$$

A deformação para falha de um sólido deve ser:

$$\frac{\sigma_f}{E} \approx \frac{F^*}{r_0^2} / \left(\frac{S}{r_0} \right) = \frac{1}{10}$$

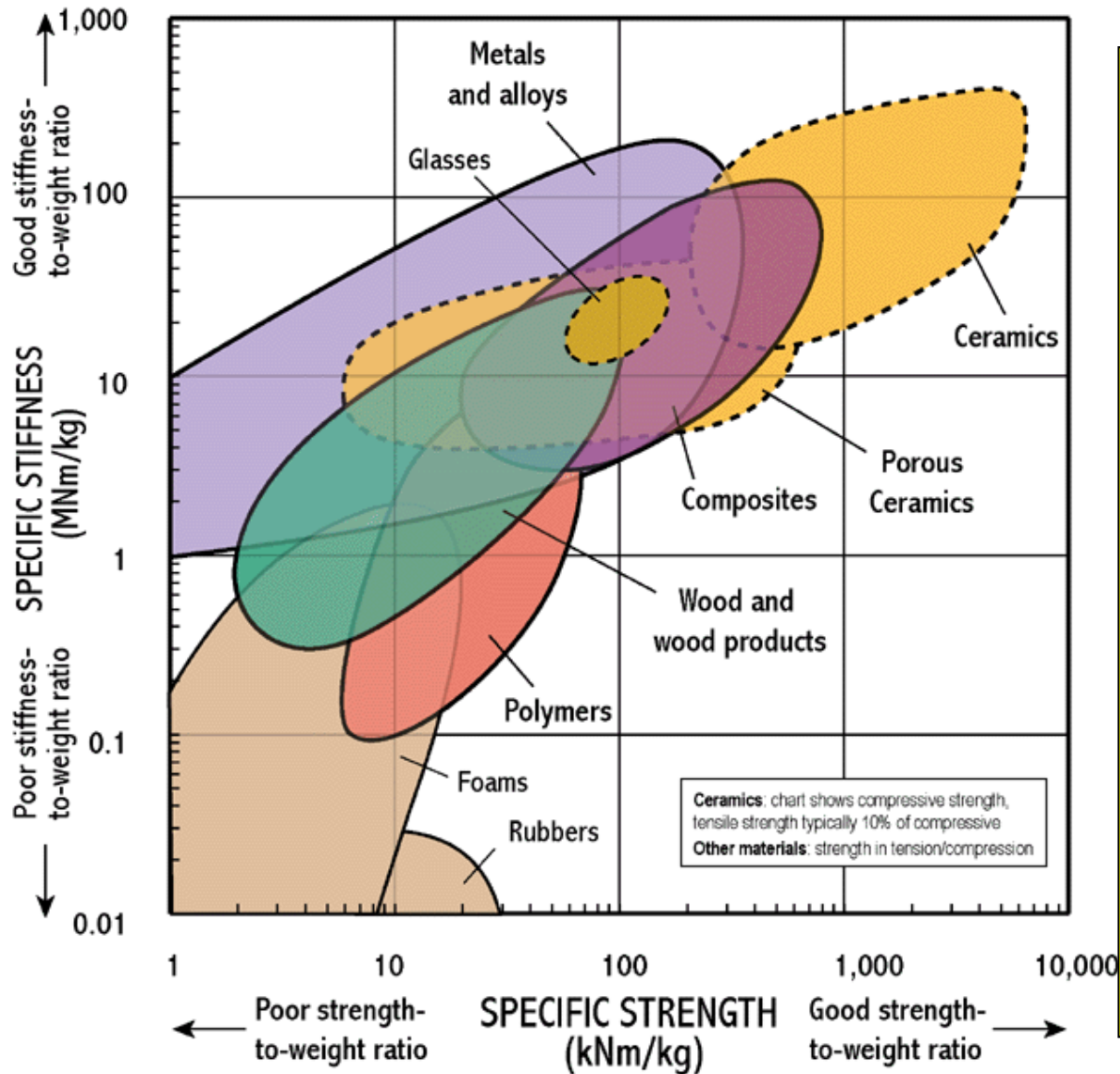
Como tensão é força sobre área e, neste caso, a área é proporcional à distância interatômica...

Mapa de Módulo-Resistência



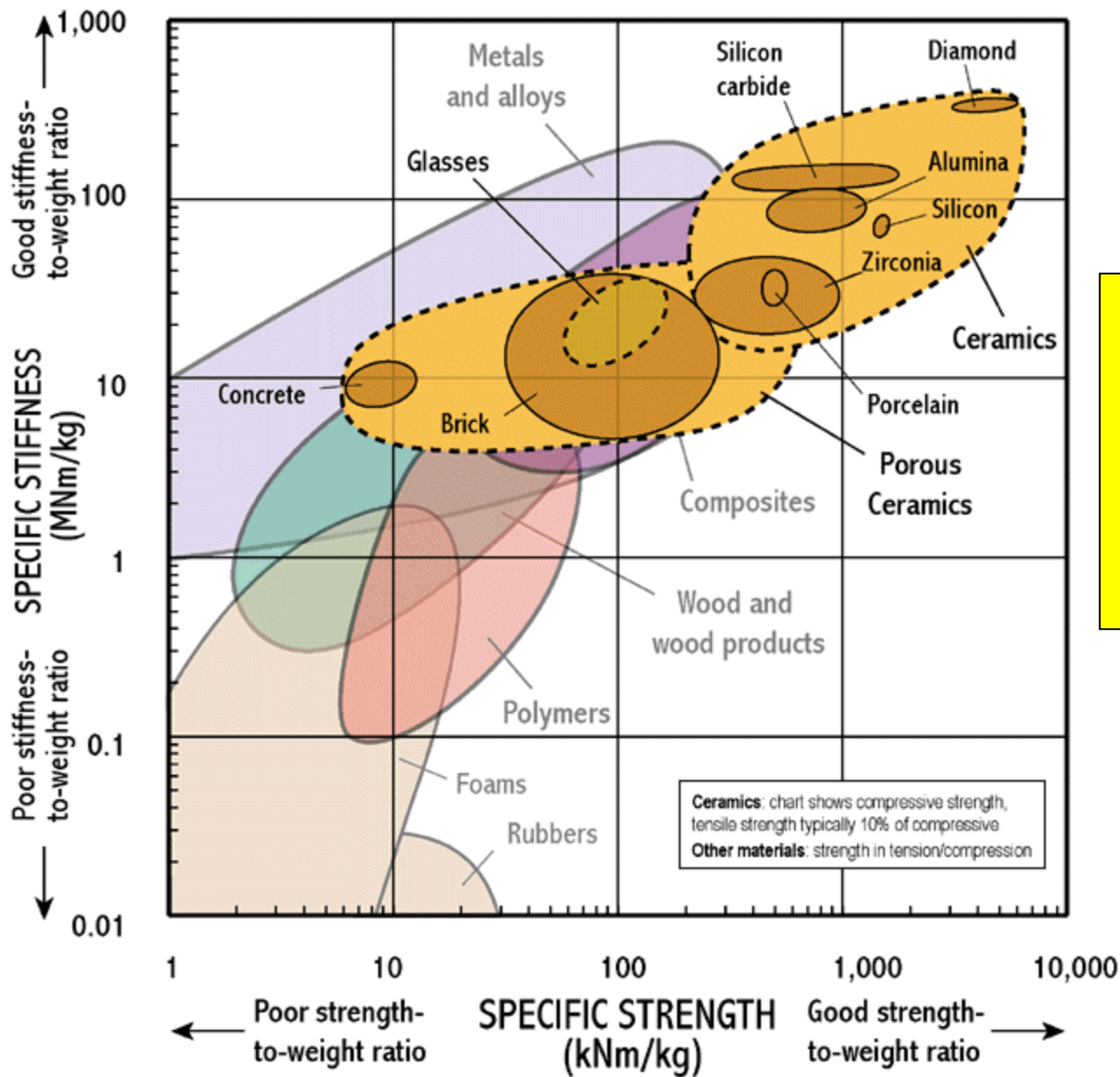
Mapa Rigidez Específica– Resistência Específica

Mínimo de massa e grande resistência

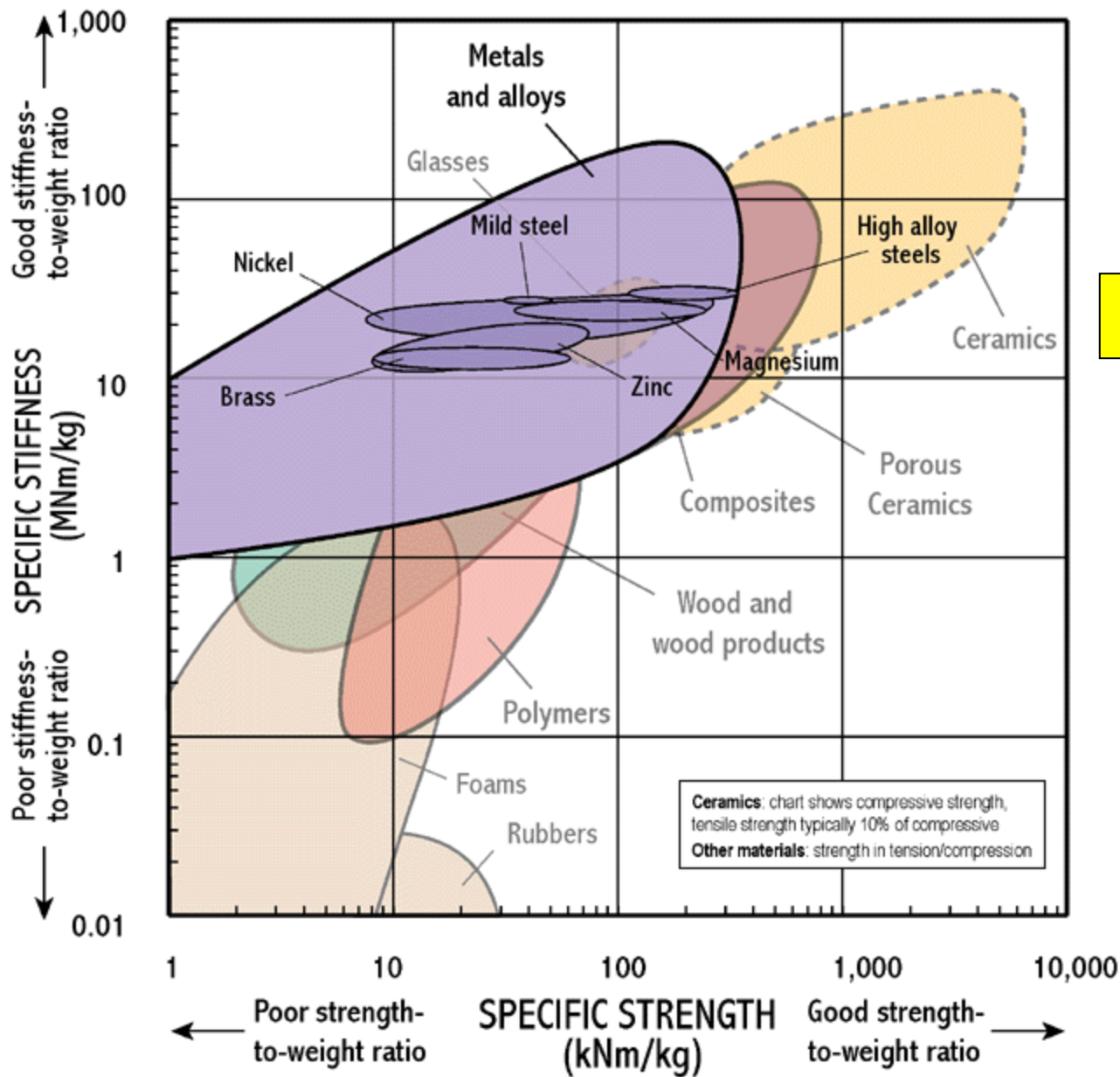


Muitos projetos requerem materiais que possuem elevada rigidez e resistência, porém baixo peso. Para tanto utiliza-se módulo específico (rigidez específica) ou resistência específica: $E/\text{massa (kg)}$ ou $\sigma/\text{massa(kg)}$

- Compósitos aparecem como um grande atrativo.
- Cerâmicas tem excepcional relação rigidez específica e resistência específica tão boa quanto dos metais.

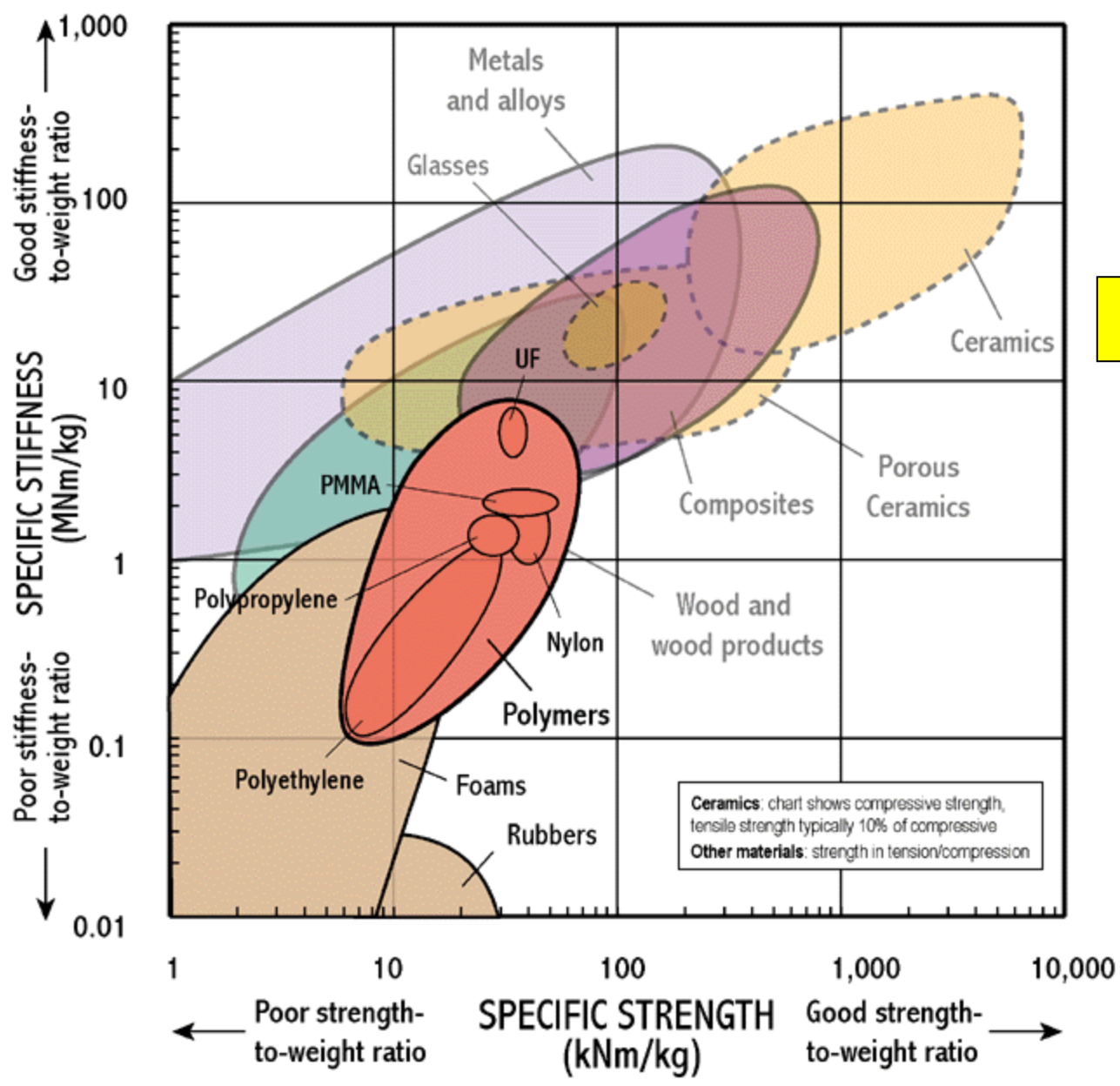


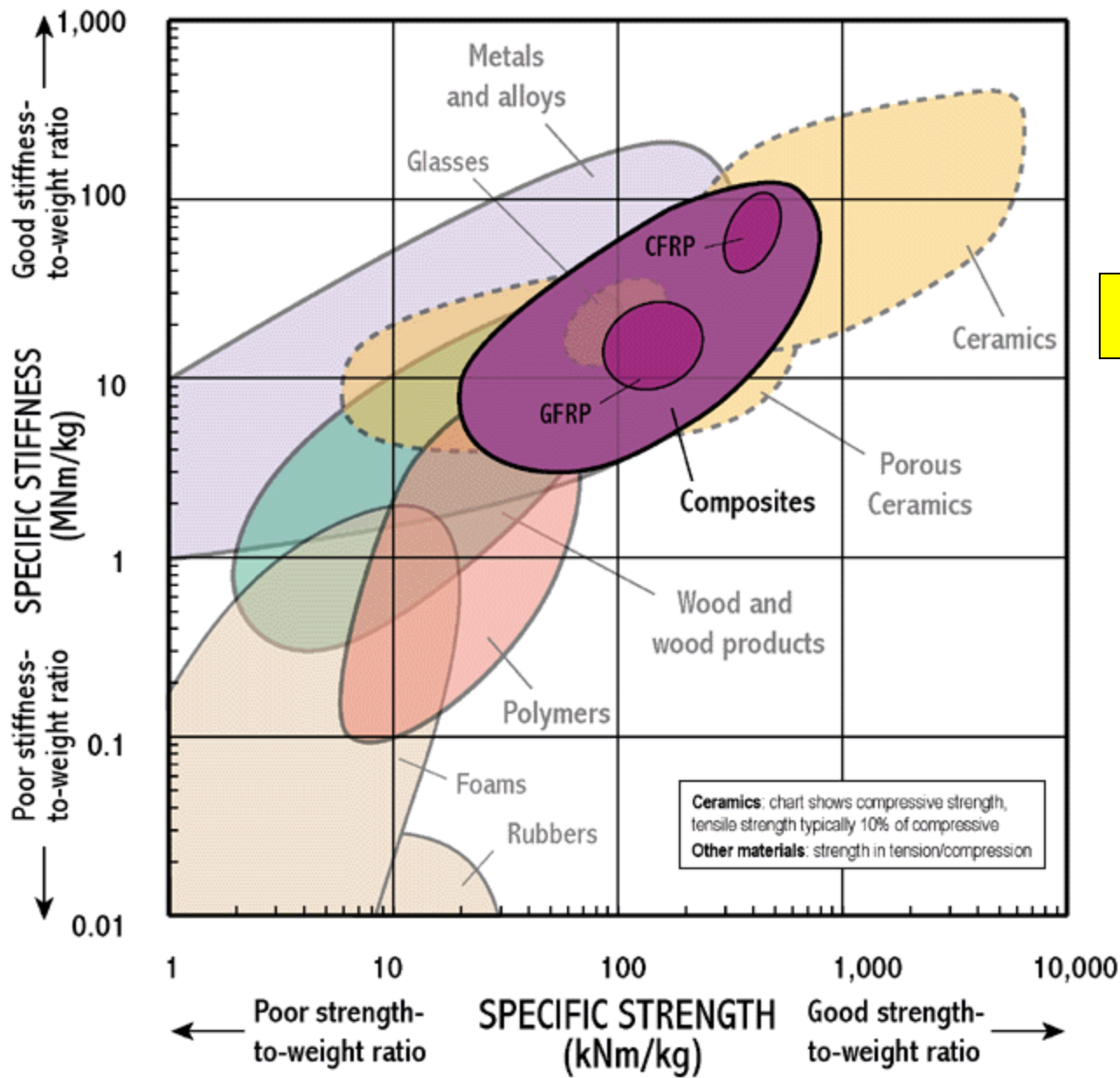
Os materiais cerâmicos apresentam uma rigidez específica excepcionalmente alta



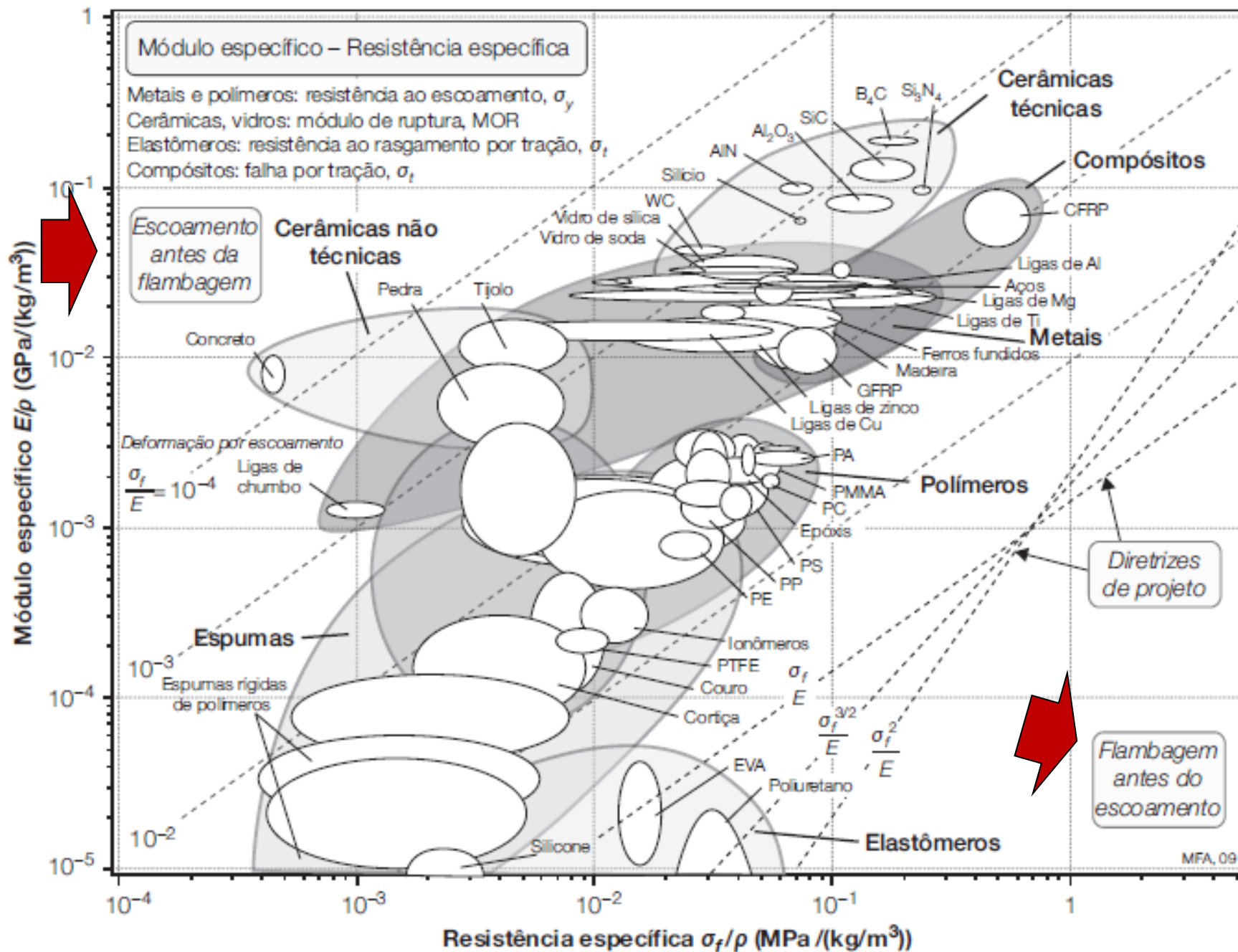
Ligas metálicas

Polímeros





Compósitos



Mapa da Tenacidade à Fratura – Módulo Elástico

A **condição** necessária para **fratura**: é que seja realizado **trabalho externo suficiente**, ou **liberada energia elástica suficiente** para fornecer a **energia de superfície γ** por unidade de área, para a criação das duas novas superfícies (fratura).

$$G \geq 2 \gamma$$

G é a taxa de liberação de energia (Irwin, 1957). Mas:

$$K = (EG)^{1/2}$$

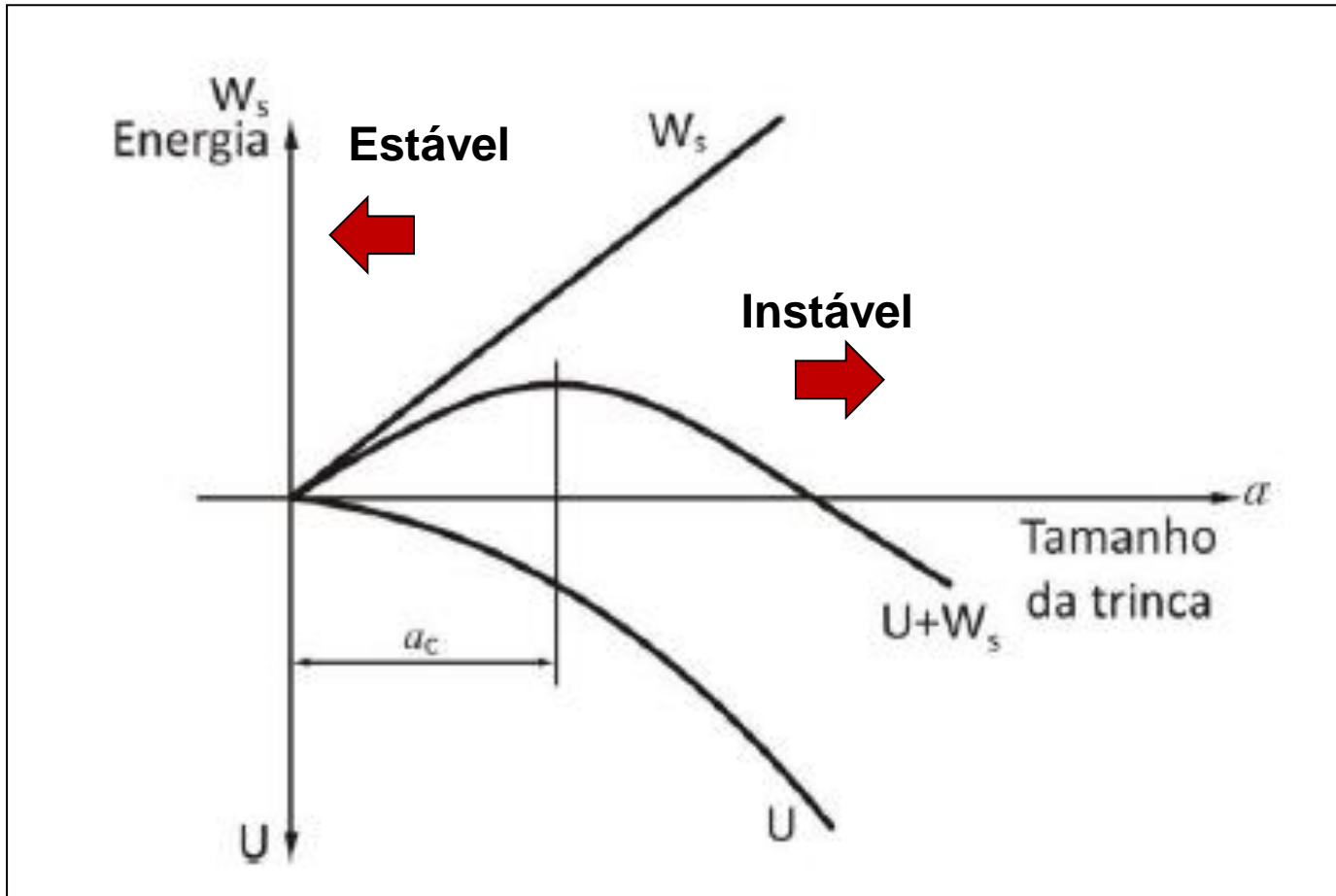
$$K \geq (2 E \gamma)^{1/2}$$

K é o fator de intensidade de tensões. A energia de superfície aumenta com o aumento do módulo de elasticidade e é proporcional a:

$$\gamma \approx E r_0 / 20,$$

$$K \geq E \left(\frac{r_0}{20} \right)^{1/2}$$

BALANÇO ENERGÉTICO DE GRIFFITH



$$\frac{dW_s}{da} + \frac{dU}{da} < 0$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$$

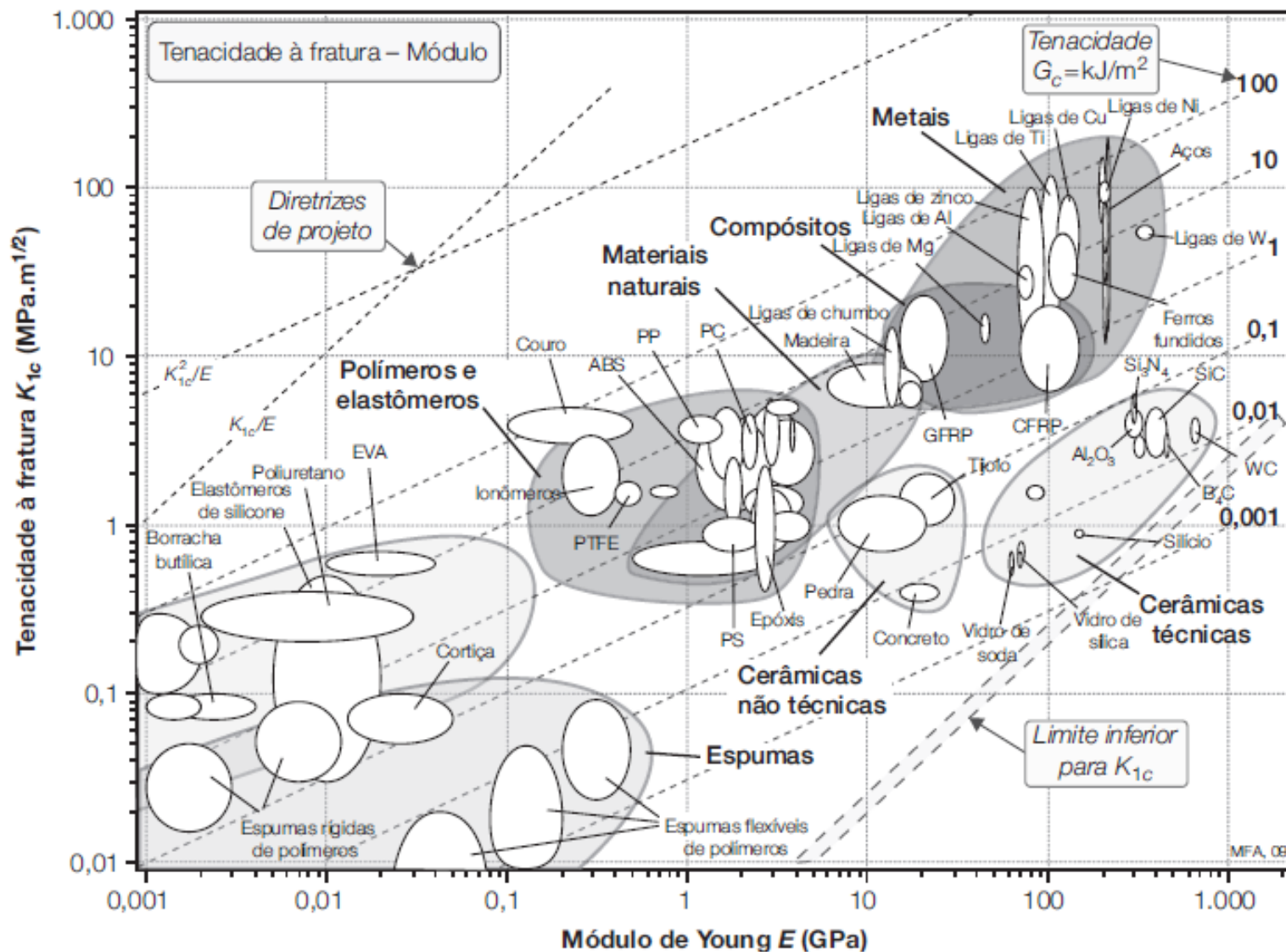
IRWIN(1957)

- **Generalizou** o conceito reunindo todas as fontes de resistência ao crescimento da trinca em um único parâmetro, denominado **taxa de alívio de energia de deformação** e denotado por **G_c** (consta que a letra “G” é uma homenagem a Griffith);
- Quando a trinca se propaga (da), a rigidez do material decresce e a energia potencial decresce de dU;
- G é a taxa de variação da energia potencial por unidade de área da trinca, a força motriz para a propagação da trinca: $G = -dU/tda$;
- **Existe uma taxa de variação da energia potencial por unidade de área crítica, G_c** (consta que a letra “G” é uma homenagem a Griffith), que separa a propagação estável da propagação instável (**a_c**);

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}}$$

$$G_c = \frac{\sigma_c^2 \pi a}{E}$$

Mapa da Tenacidade à Fratura – Módulo Elástico



O aumento de resistência de um material é útil enquanto ele permanece plástico e não falha por fratura instável.

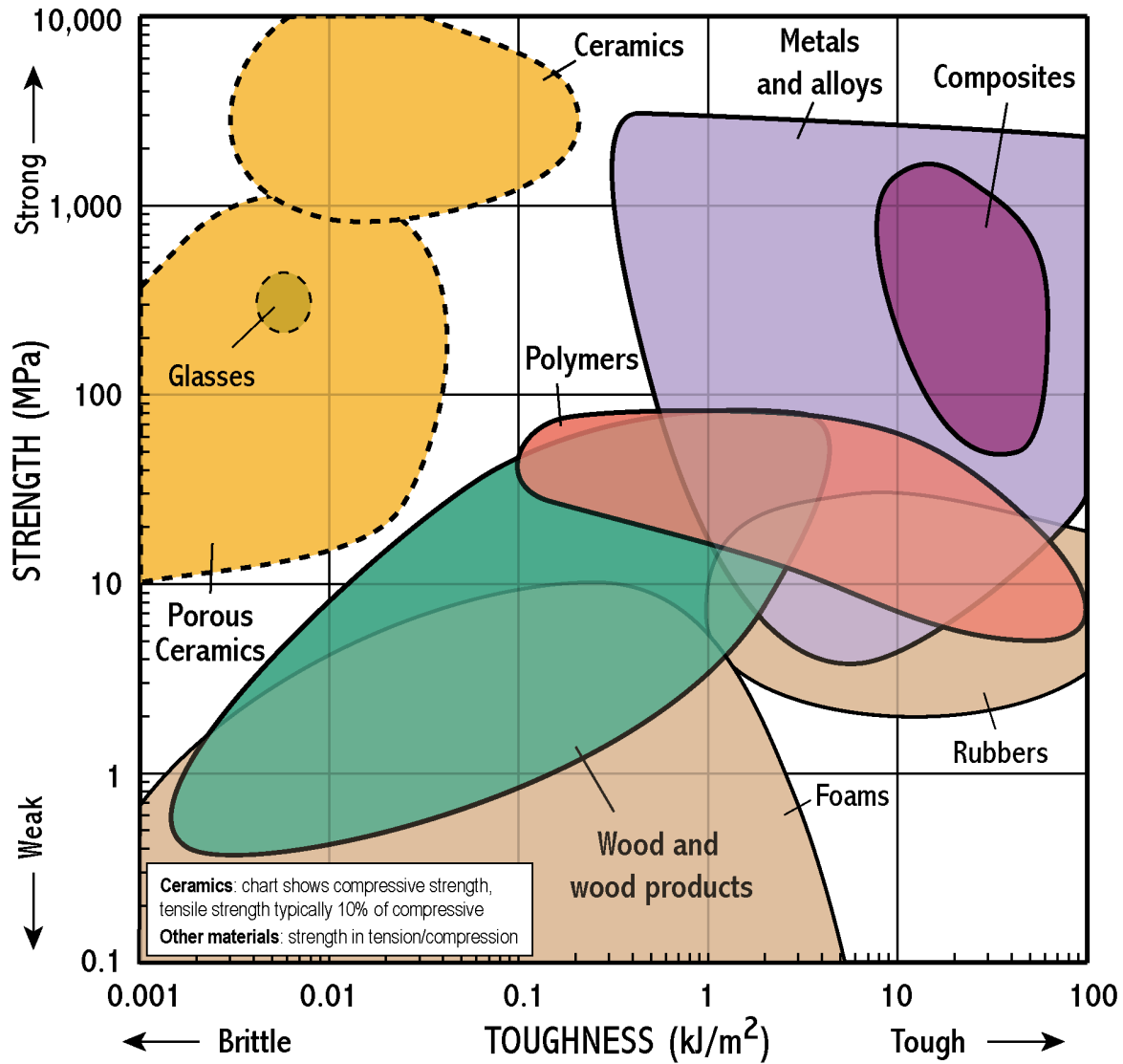
Diagrama tenacidade à fratura-resistência

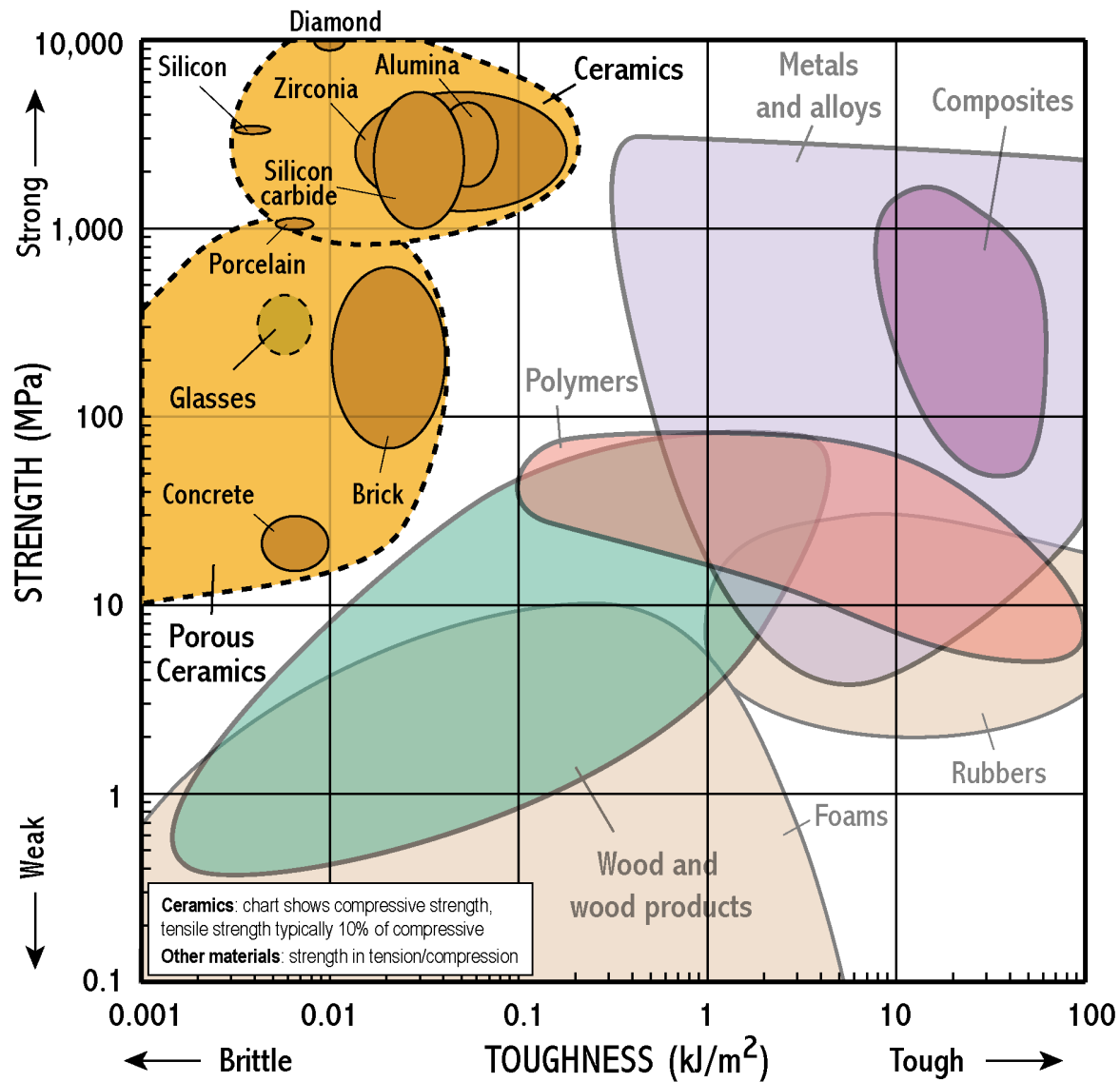
A **concentração de tensão na ponta de uma trinca** gera uma zona de processo: **zona plástica em sólidos dúcteis**, uma **zona de microtrincas em cerâmicas** e uma **zona de delaminação, desligamento e extração de fibras em compósitos**. Dentro da zona de processo, **é realizado trabalho** em relação às forças plásticas e de atrito; é isso que é responsável pela **diferença** entre a energia de fratura medida, **G_c**, e a energia de superfície, **2γ**. A quantidade de **energia dissipada** deve **aumentar** aproximadamente com a **resistência do material** dentro da zona de processo e com seu tamanho, **d_y**.

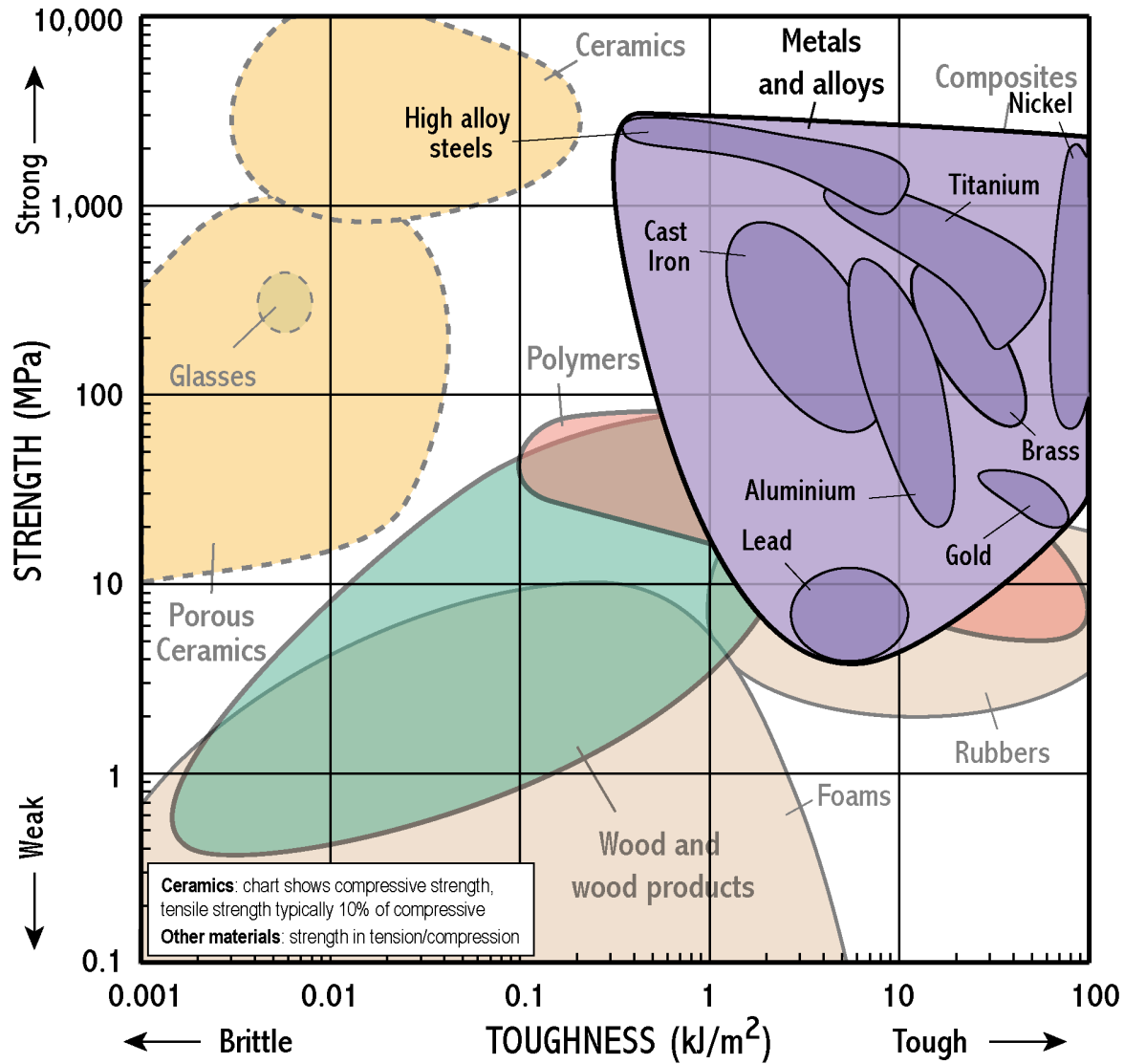
Sabe-se que:

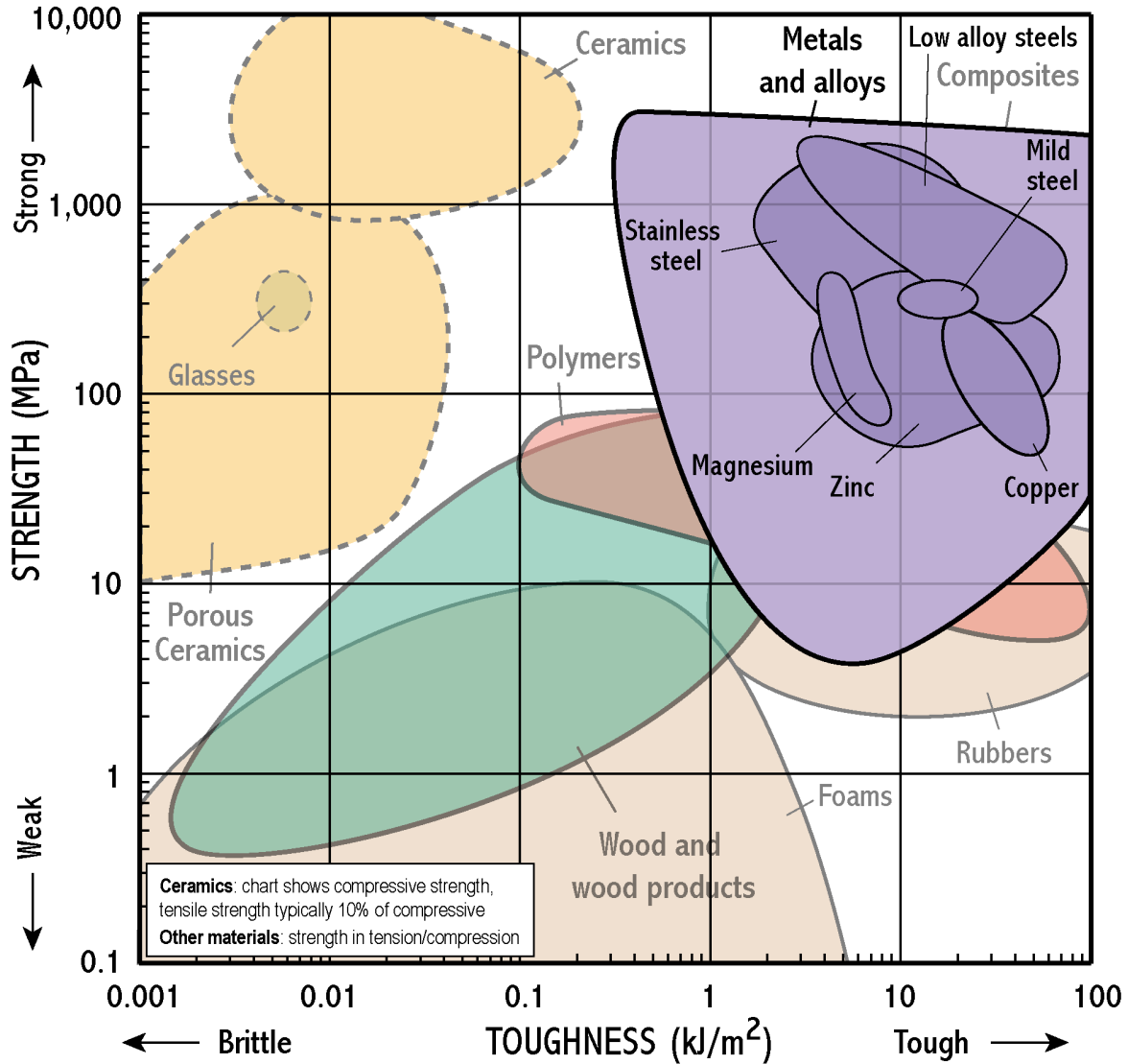
$$(\sigma = K/\sqrt{2 \pi r}) \text{ a } r = d_y/2$$

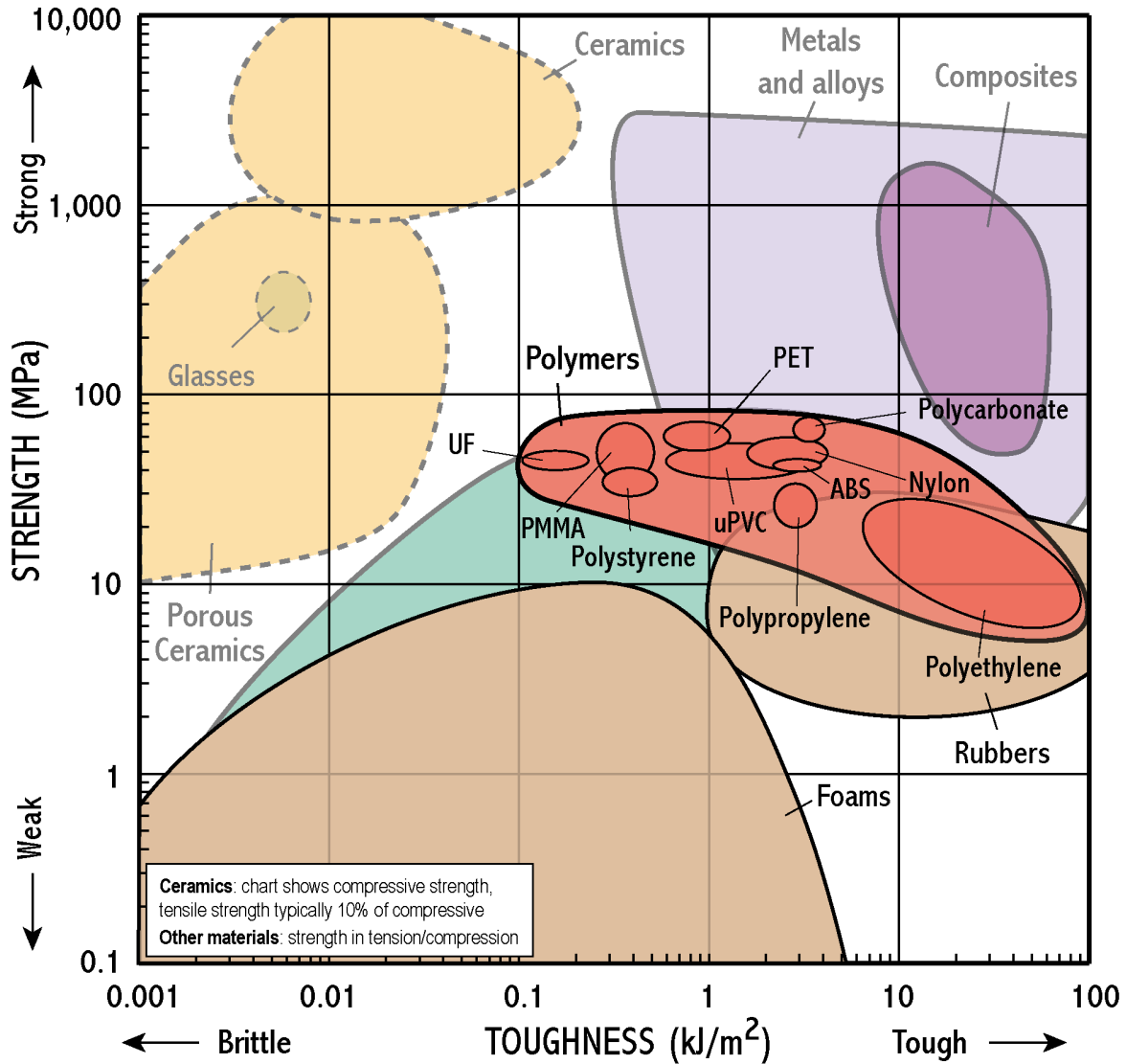
$$d_y = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma_f^2}$$











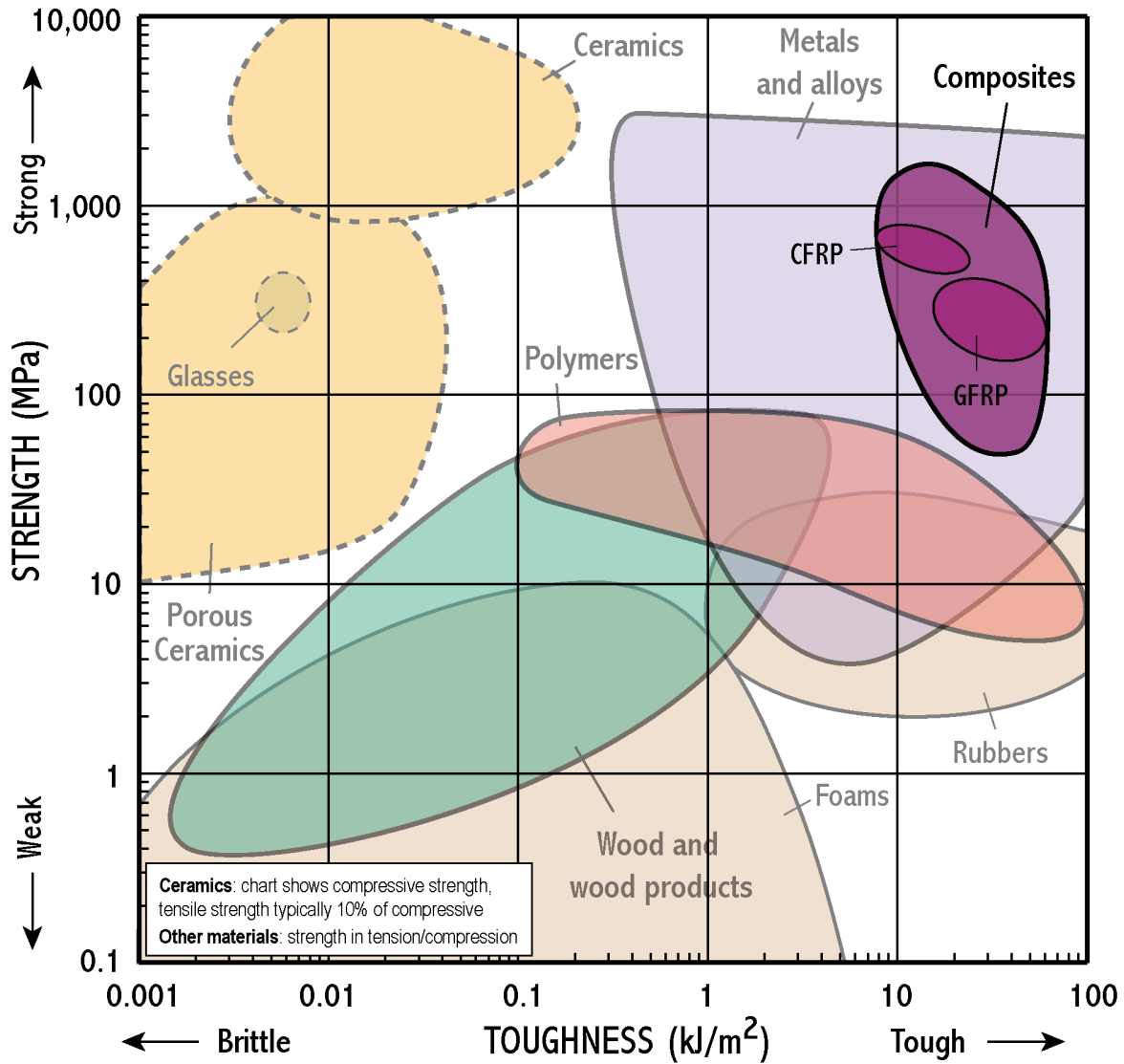


Diagrama coeficiente de perda-módulo

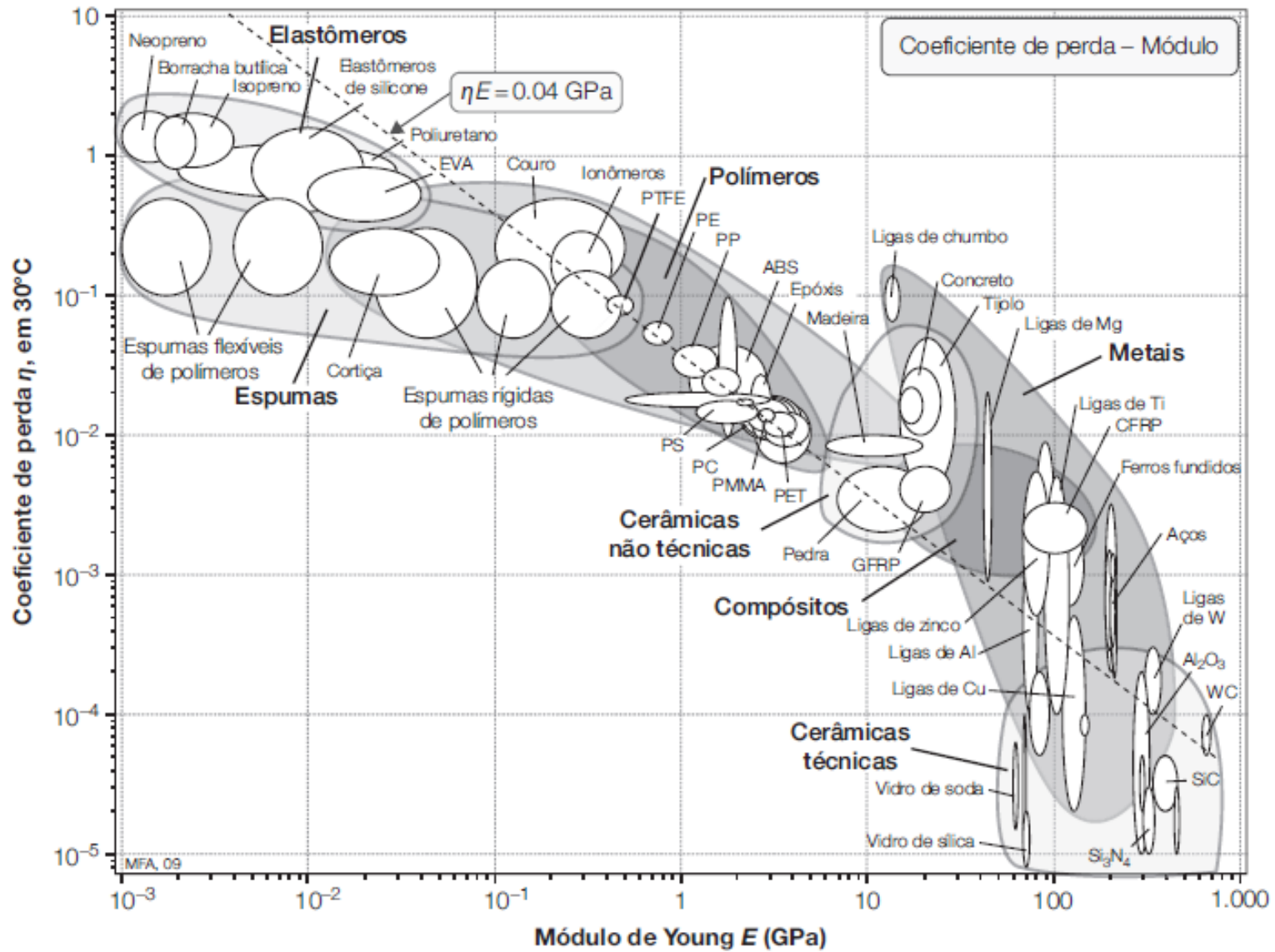
Relacionado ao **amortecimento de vibrações**: pode ser **requerido** em algumas aplicações ou **não**. Na fabricação de **sinos** o amortecimento **não é bom** e por isso são feitos de **bronze**. Poderiam ser feitos de **vidro** e de **carboneto de silício** (se pudéssemos arcar com o preço). Também é chamado de “**atrito interno**”. Para **base de máquinas**, **melhor quanto mais amortecer**. O amortecimento intrínseco é medido pelo **coeficiente de perda, η** .

Há **muitos mecanismos** de amortecimento intrínseco e **histerese**. Alguns estão associados a uma **constante de tempo específica**; a perda de energia é relacionada a uma frequência característica. Outros são **independentes do tempo**; **absorvem energia em todas as frequências**.

Em metais, uma grande parte da perda é por histerese, causada por **movimento de discordância: é alta em metais moles como chumbo e alumínio puro. Metais de alta liga como bronze e aços de alto teor de carbono têm baixa perda, porque o soluto prende as discordâncias; são os materiais para sinos. Perda excepcionalmente alta é encontrada em algumas ligas de Mn-Cu, em razão de uma transformação em martensita induzida por deformação, e em magnésio, provavelmente devido à maclação. Cerâmicas de engenharia têm baixo amortecimento, porque a enorme resistência do reticulado prende as discordâncias.**

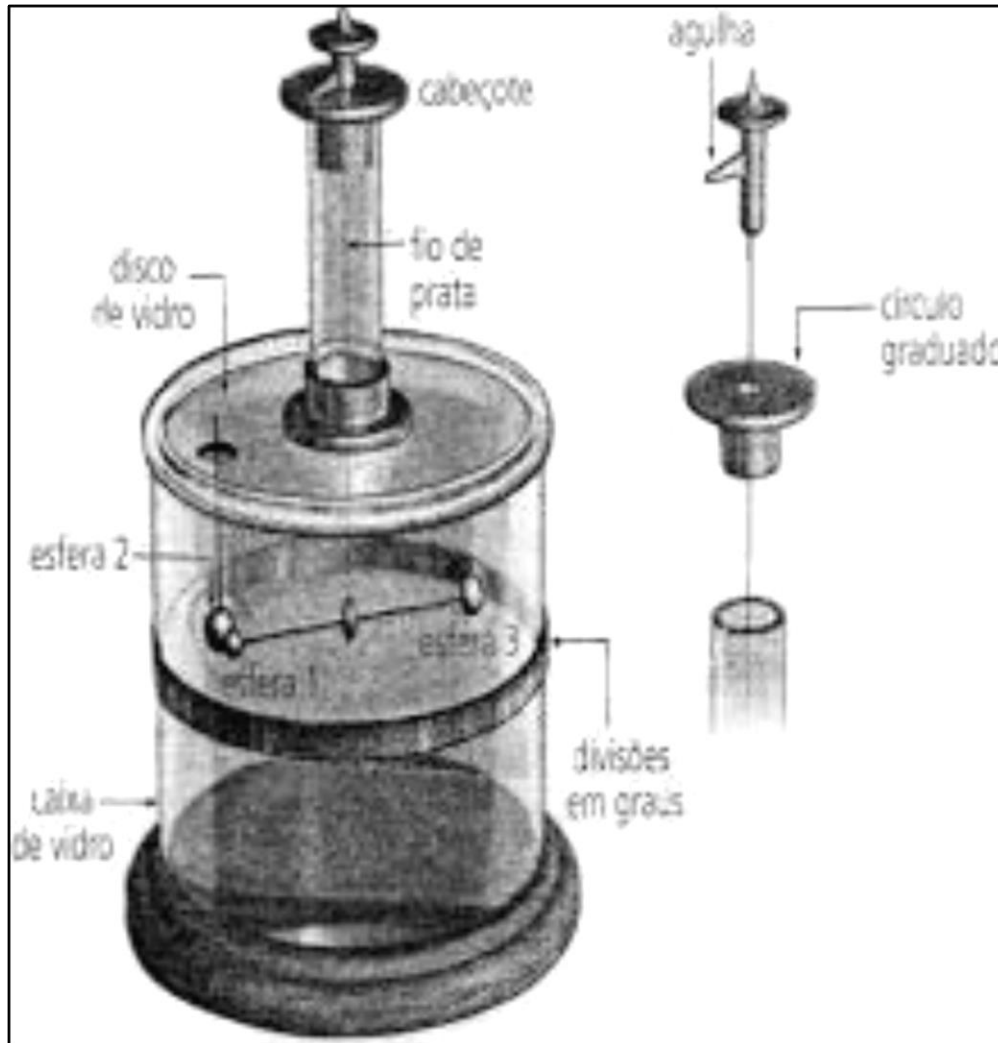
Ex.: Alívio de tensões por vibração.

Mapa de Coeficiente de Perda – Módulo



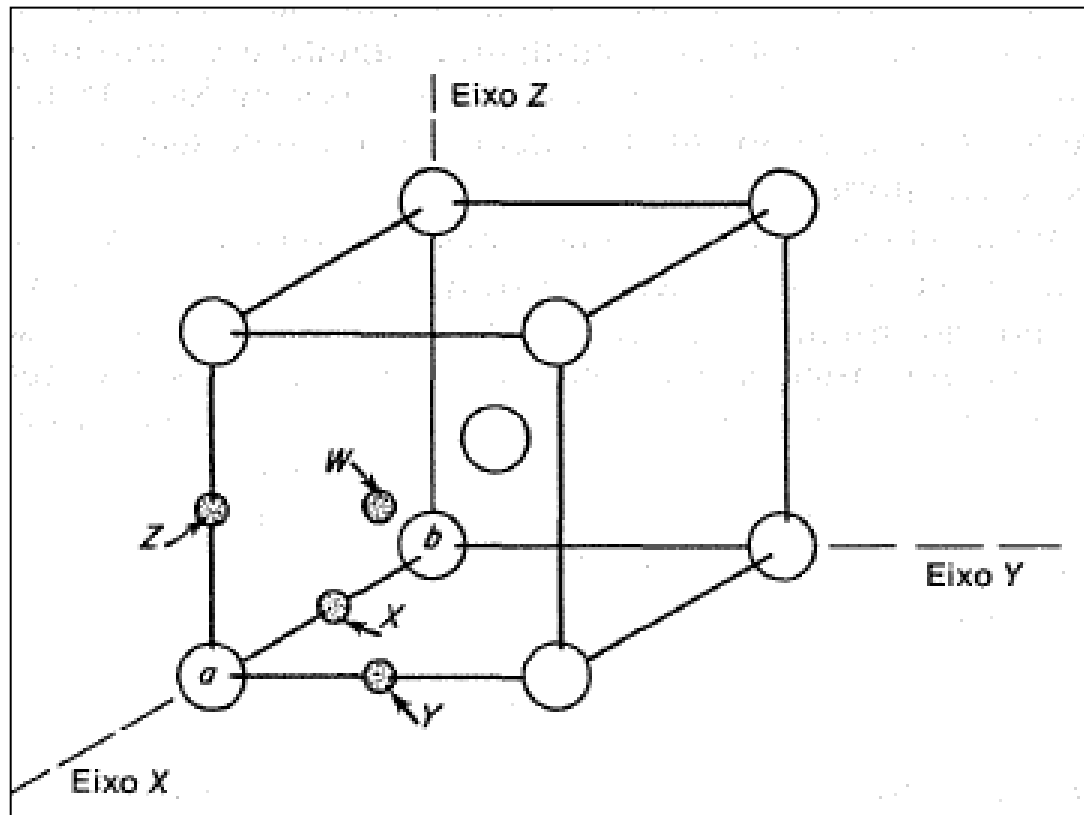
Coeficiente de Perda (relaxação anelástica): atrito interno altera as propriedades. EX: sino-vibração.

Pêndulo de torção-ensaio de espectroscopia anelástica: atrito interno-Estudo da difusão intersticial-Efeito Snoek



Efeito Snoek

Em um metal **cúbico de corpo centrado** como o ferro, os átomos **intersticiais**, tais como **carbono** ou **nitrogênio**, ocupam **posições** tanto no **meio das arestas** do cubo como **nos centros de suas faces**. As duas posições são **crystalograficamente equivalentes**.



Efeito Snoek

Quando um cristal CCC, está no estado não-tensionado, um **número estatisticamente igual** de átomos de soluto encontrar-se-á nos **três tipos de interstícios**, cujos eixos são paralelos, respectivamente, as direções **[100]**, **[010]** e **[001]**. Aplicando-se uma **força externa** ao cristal, de modo a produzir uma **tensão de tração paralela** ao eixo **[100]**, haverá uma **deformação** e os **eixos normais à tensão** (**[010]** e **[001]**) **diminuirão**. Assim, os **átomos** de soluto irão se localizar **preferencialmente nos interstícios** cujos eixos são **paralelos à tensão**. O número de átomos de soluto nesses **locais preferenciais** tende a **aumentar**.

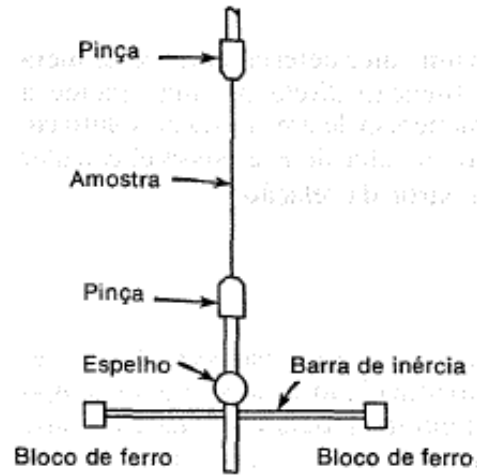


Fig. 11.5 Pêndulo de torção. (De Ké, T. S., *Phys. Rev.*, 71, 553 [1947].)

Importante para diversas aplicações, pois o amortecimento ou relaxação, influencia as propriedades mecânicas. Ex: comportamento viscoelástico.

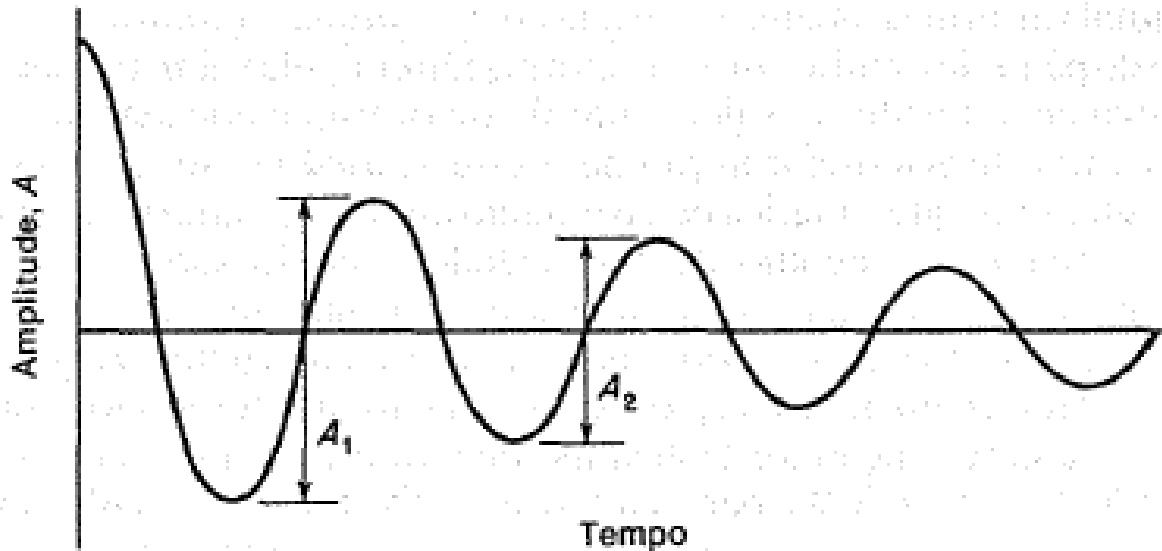


Fig. 11.6 Vibração com amortecimento de um pêndulo de torção.

EFEITO DO OXIGÊNIO INTERSTICIAL NO ESPECTRO ANELÁSTICO DE UMA LIGA Nb - 0,3%pTi CONTENDO 0,08%p O

T.C. Niemeyer^{1,2}; L.H. Almeida^{1,2}; C.R. Grandini^{2*}; O. Florêncio³

¹Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 13.560-970, São Carlos, SP.

²Laboratório de Relaxações Anelásticas, Depto. Física, Faculdade de Ciências, UNESP, 17.033-360, Bauru, SP.

³Laboratório de Metalurgia Física, Depto. Física, UFSCar, 13.565-905, São Carlos, SP.

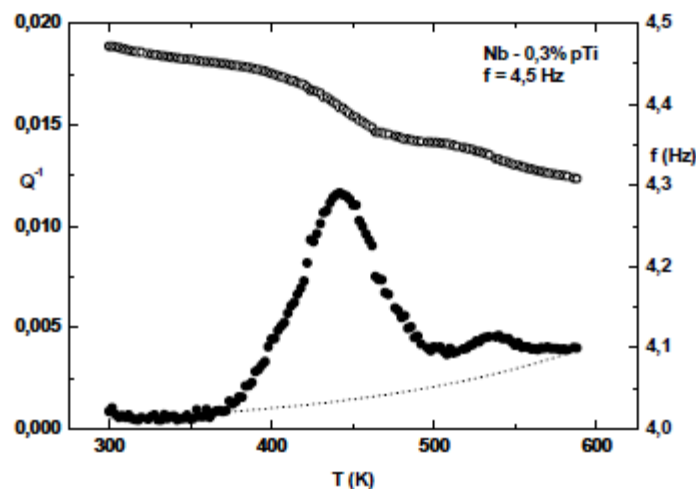
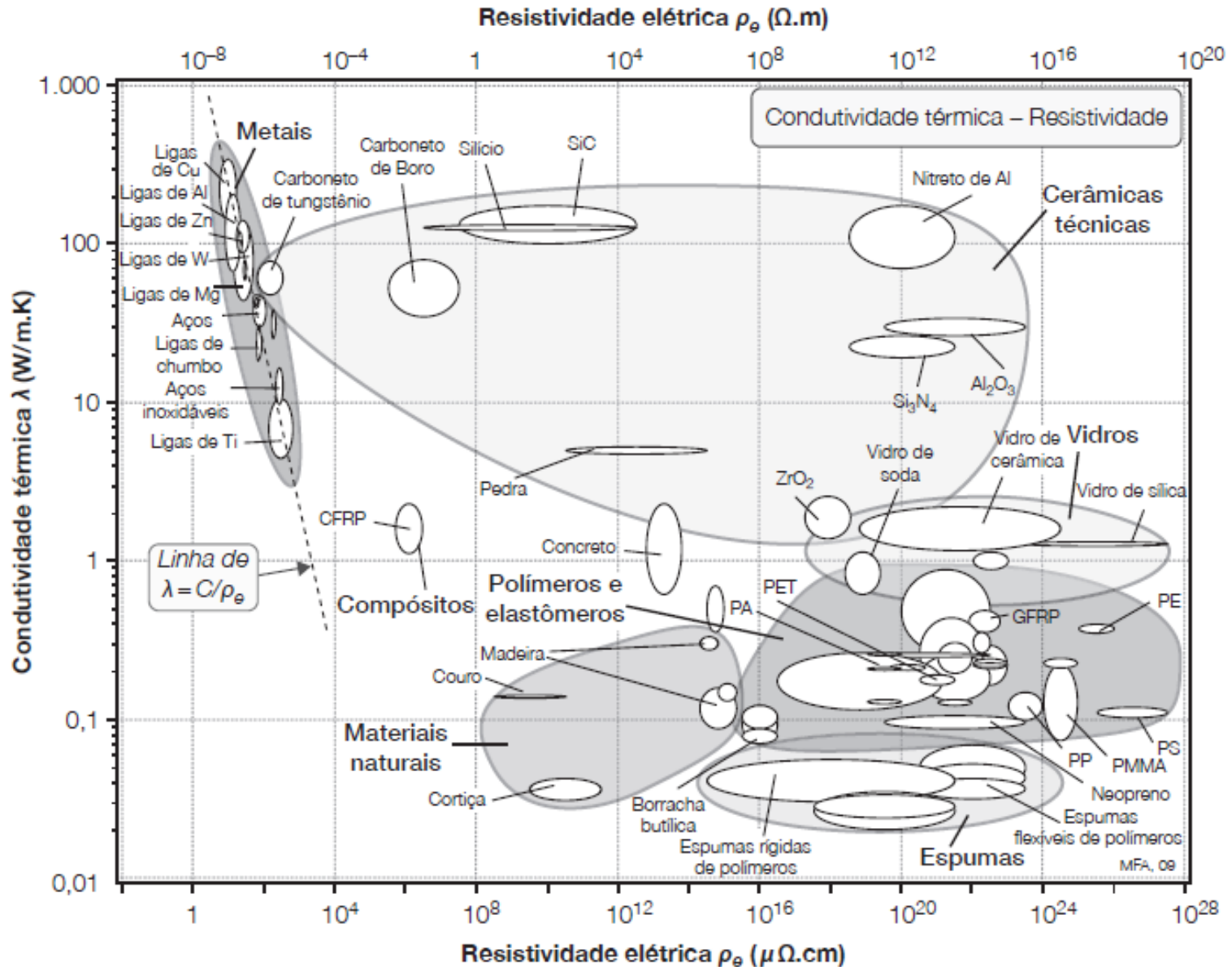


Figura 1 - Atrito interno e frequência como função da temperatura para a amostra Nb - 0,3%pTi, medida com frequência de 4,5 Hz.

Mapa de Condutividade Térmica – Resistividade Elétrica



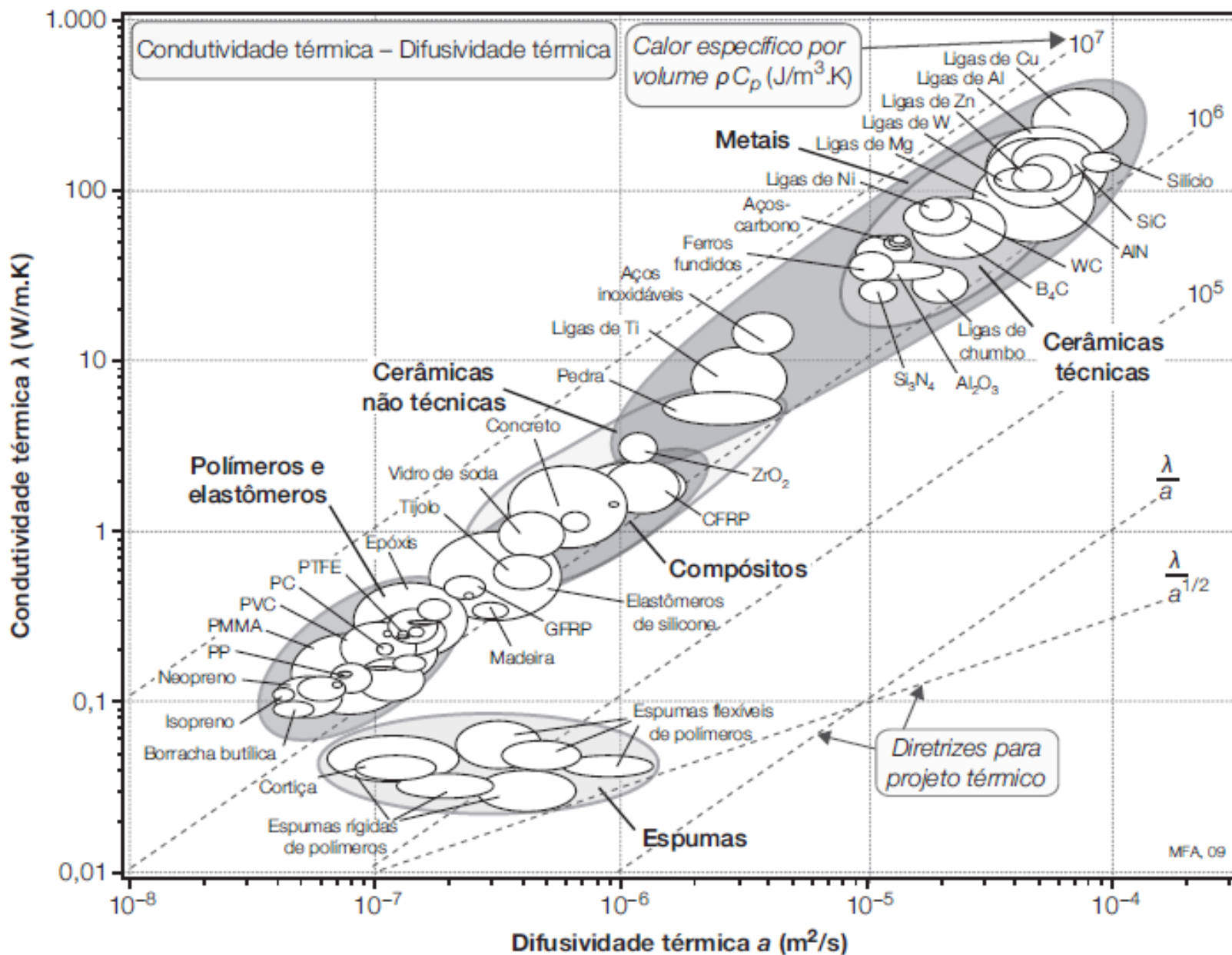
Mapa de Condutividade Térmica – Difusividade Térmica

A **condutividade térmica**, governa o **fluxo de calor** que atravessa um material em **estado estável/ regime permanente**. A propriedade que **governa o fluxo de calor transiente** é a **difusividade térmica**, \underline{a} (unidades: m^2/s). As duas estão relacionadas por:

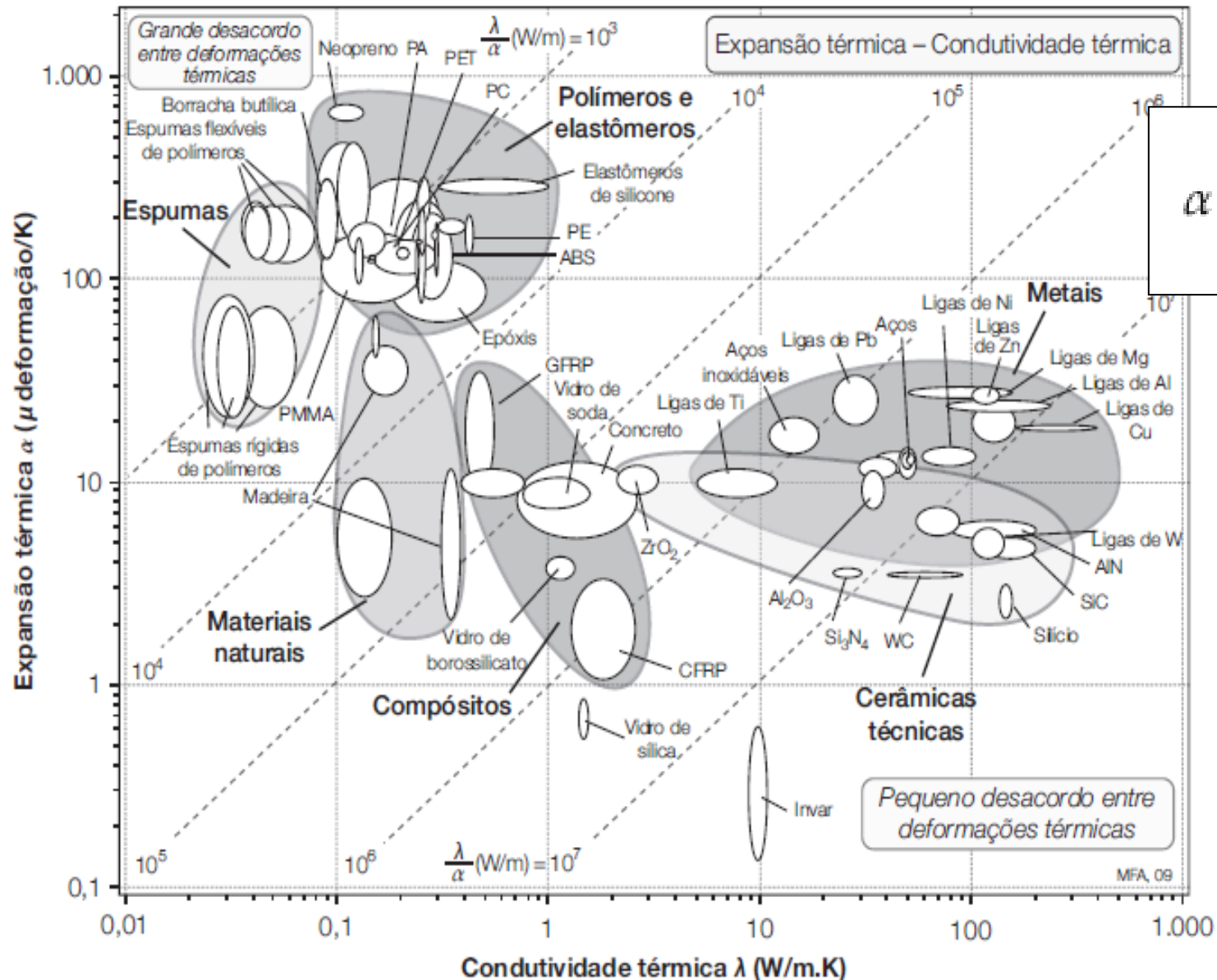
$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

A quantidade ρC_p é o **calor específico volumétrico** (unidades: $\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$).

Mapa de Condutividade Térmica – Difusividade Térmica

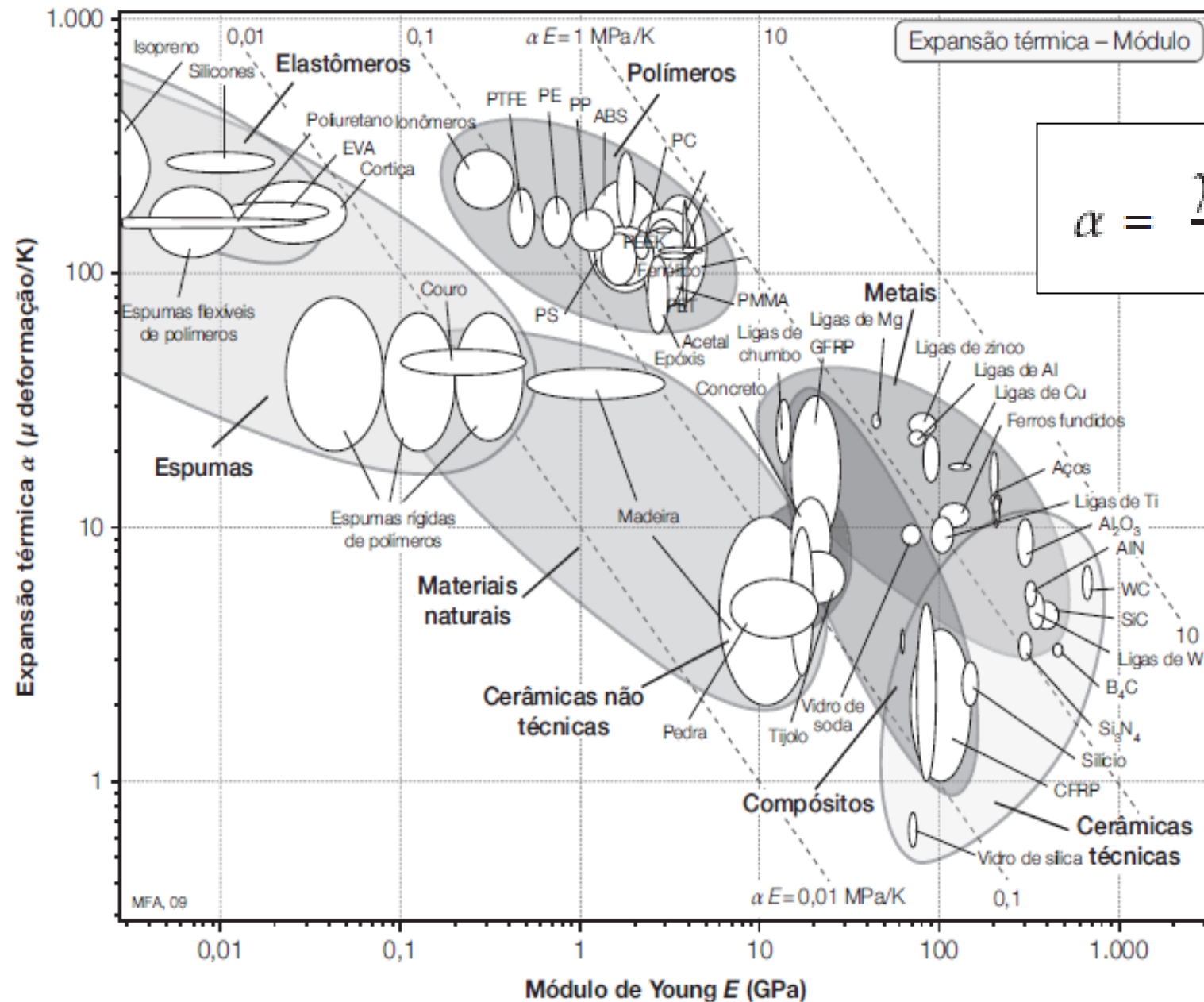


Mapa de Expansão Térmica (α) – Condutividade Térmica



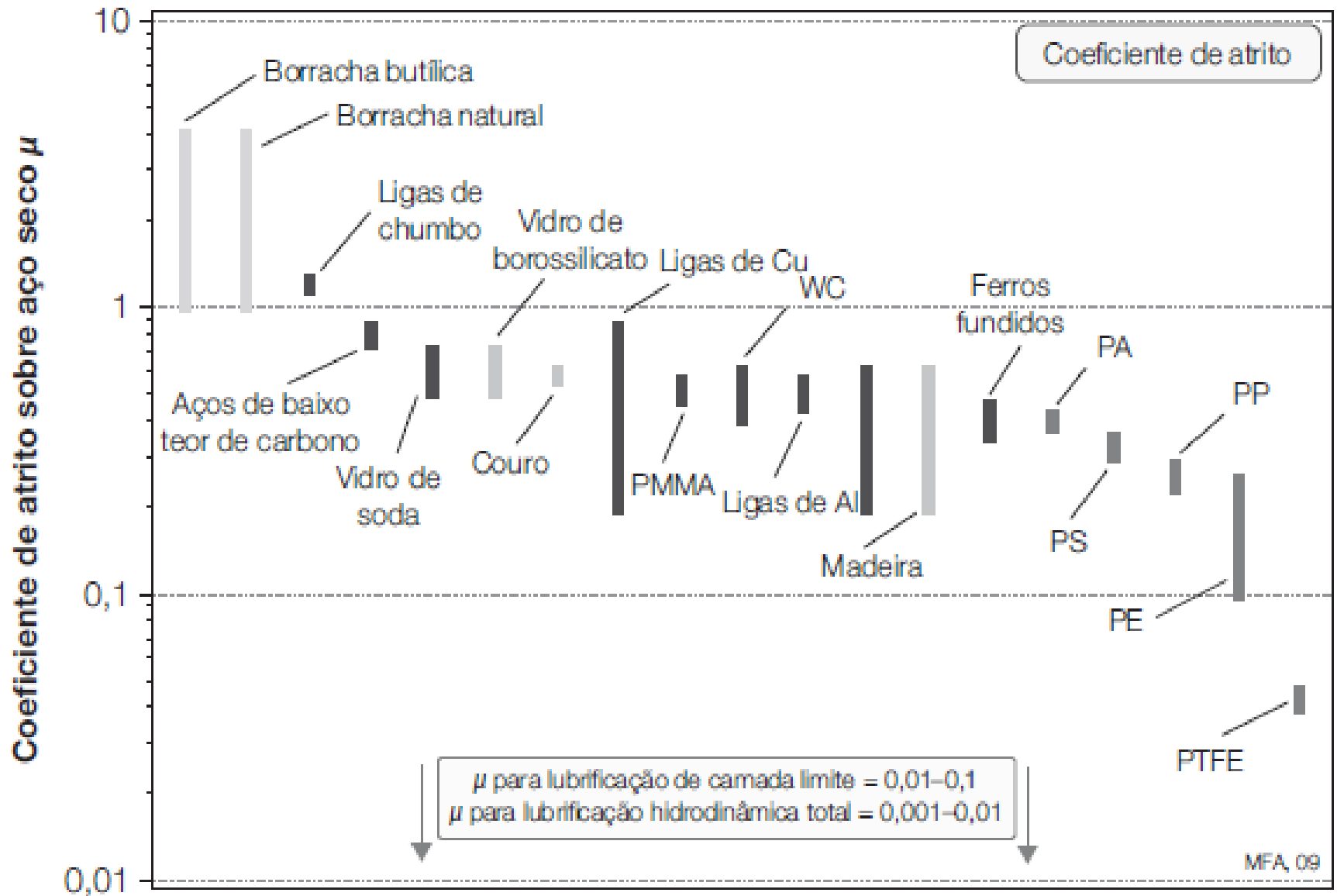
$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$$

Mapa de Expansão Térmica (α) – Módulo Elástico



$$\alpha = \frac{\gamma_G \rho C_p}{3 E}$$

Mapa de Coeficiente de Atrito



Mapa de Taxa de Desgaste – Dureza

Taxa de desgaste específica (Ω):

$$\Omega = \frac{W}{A_n}$$

$$W = \frac{\text{Volume de material removido da superfície de contato}}{\text{Distância de deslizamento}}$$

A constante da taxa de desgaste (Archard) k_a (unidades: (MPa)⁻¹

$$k_a = \frac{W}{F_n} = \frac{\Omega}{P}$$

P é pressão de mancal (que é a força normal F_n dividida pela área nominal ou A_n). Sendo a dureza da peça H e C uma constante:

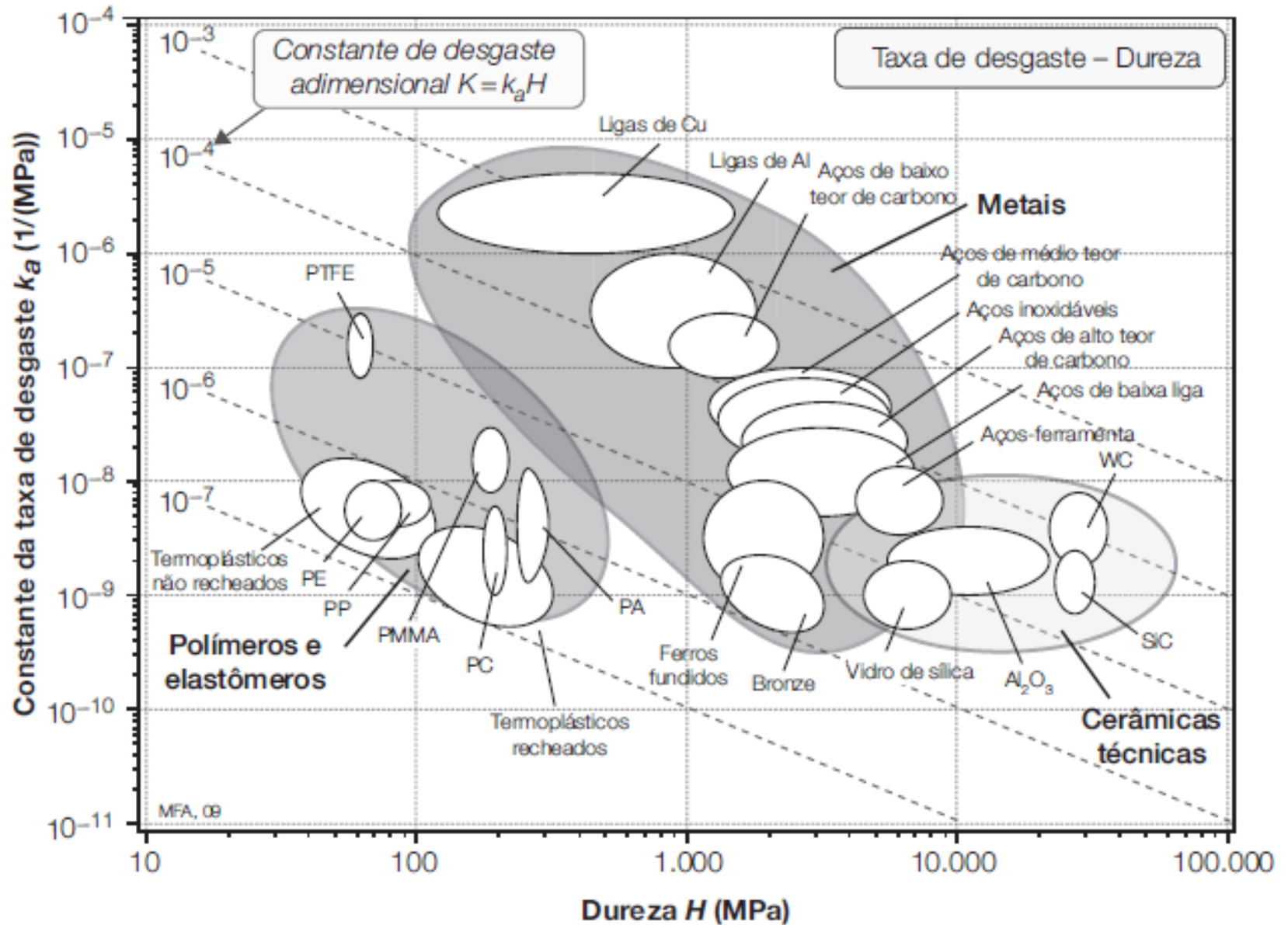
$$P_{\text{máx}} = CH$$

$$\Omega = k_a P = C \left(\frac{P}{P_{\text{máx}}} \right) k_a H$$

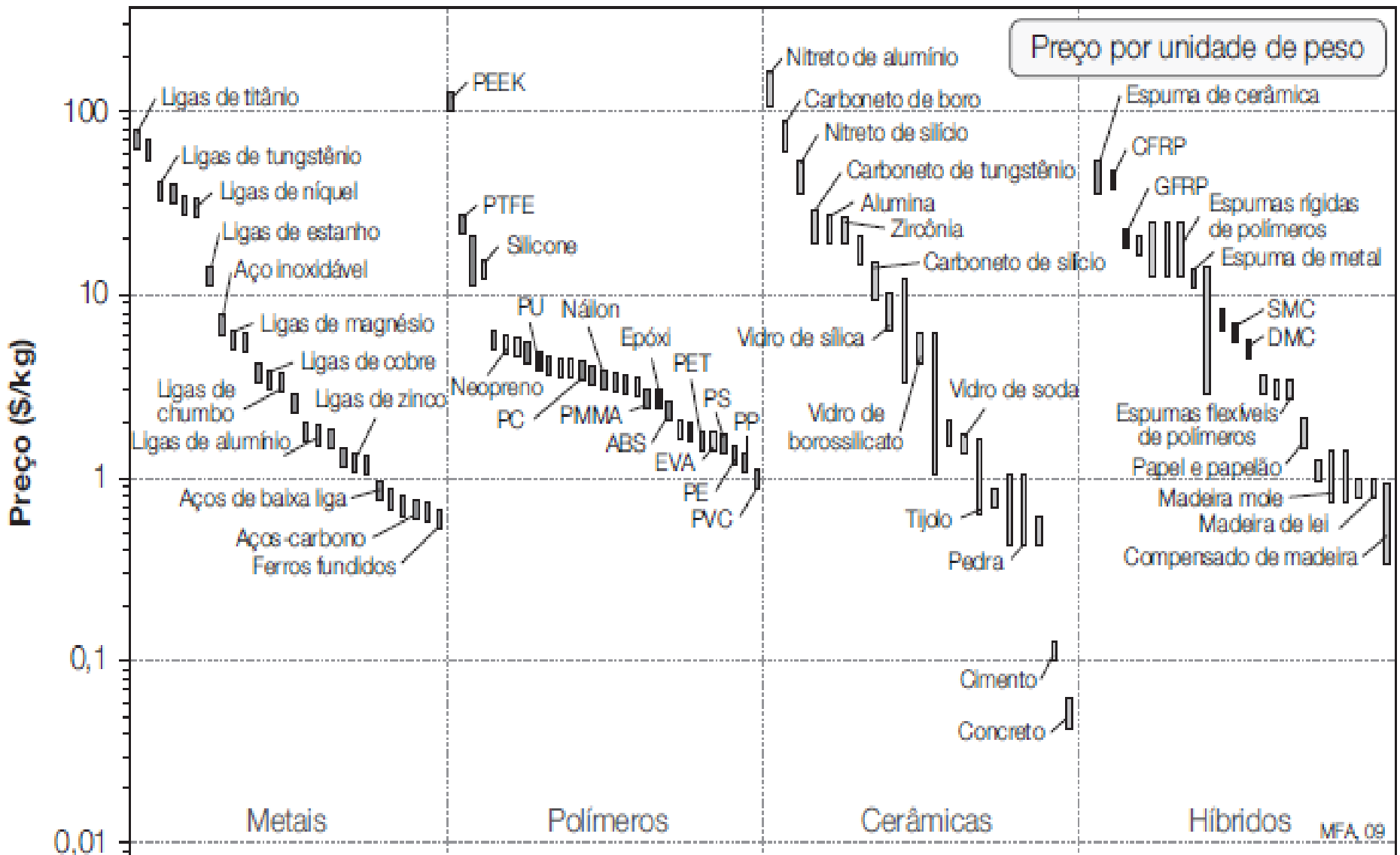
As linhas-guia diagonais serão dadas por:

$$K = k_a H$$

Mapa de Taxa de Desgaste – Dureza

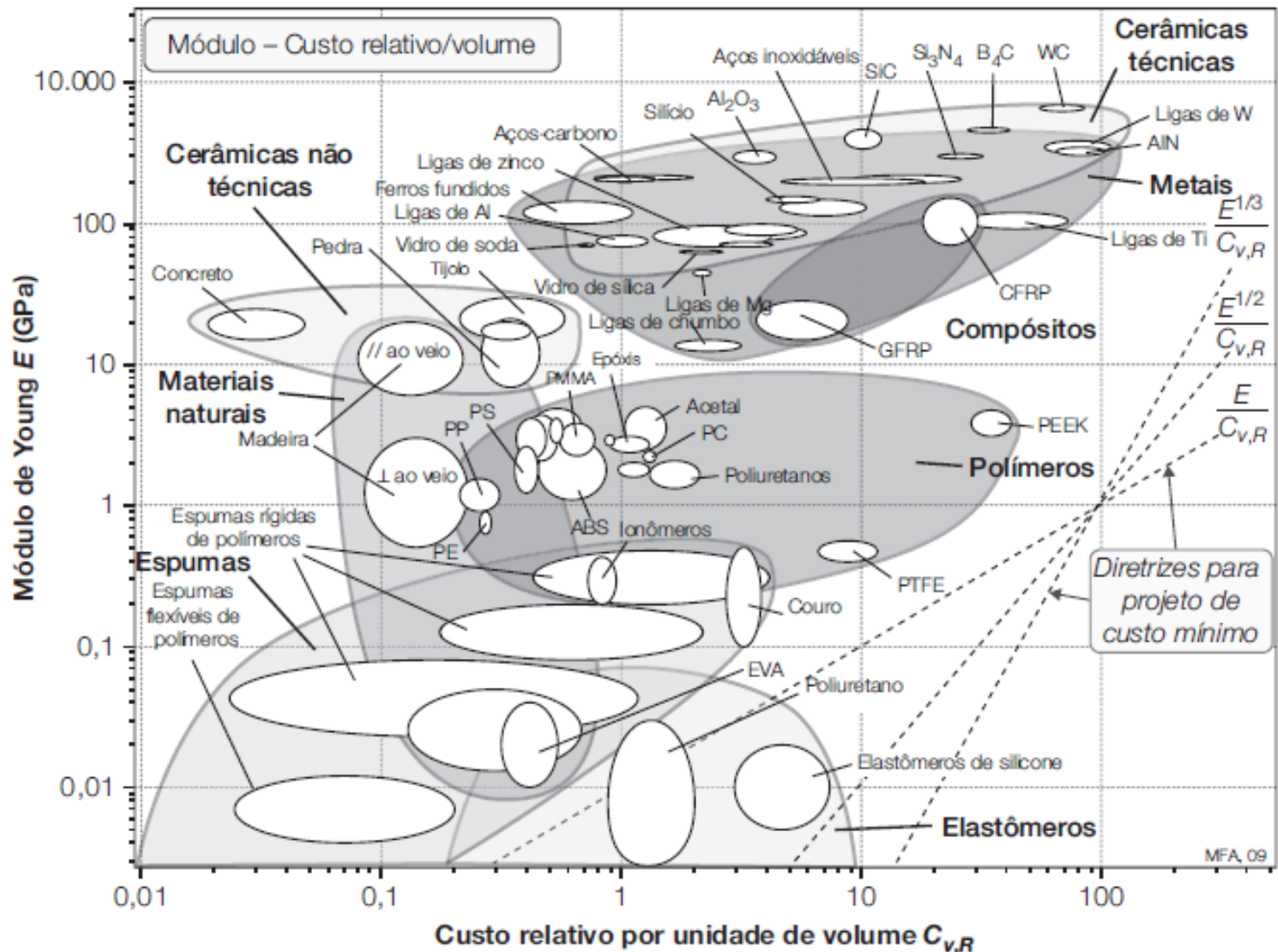


Mapa de Módulo Elástico – Custo

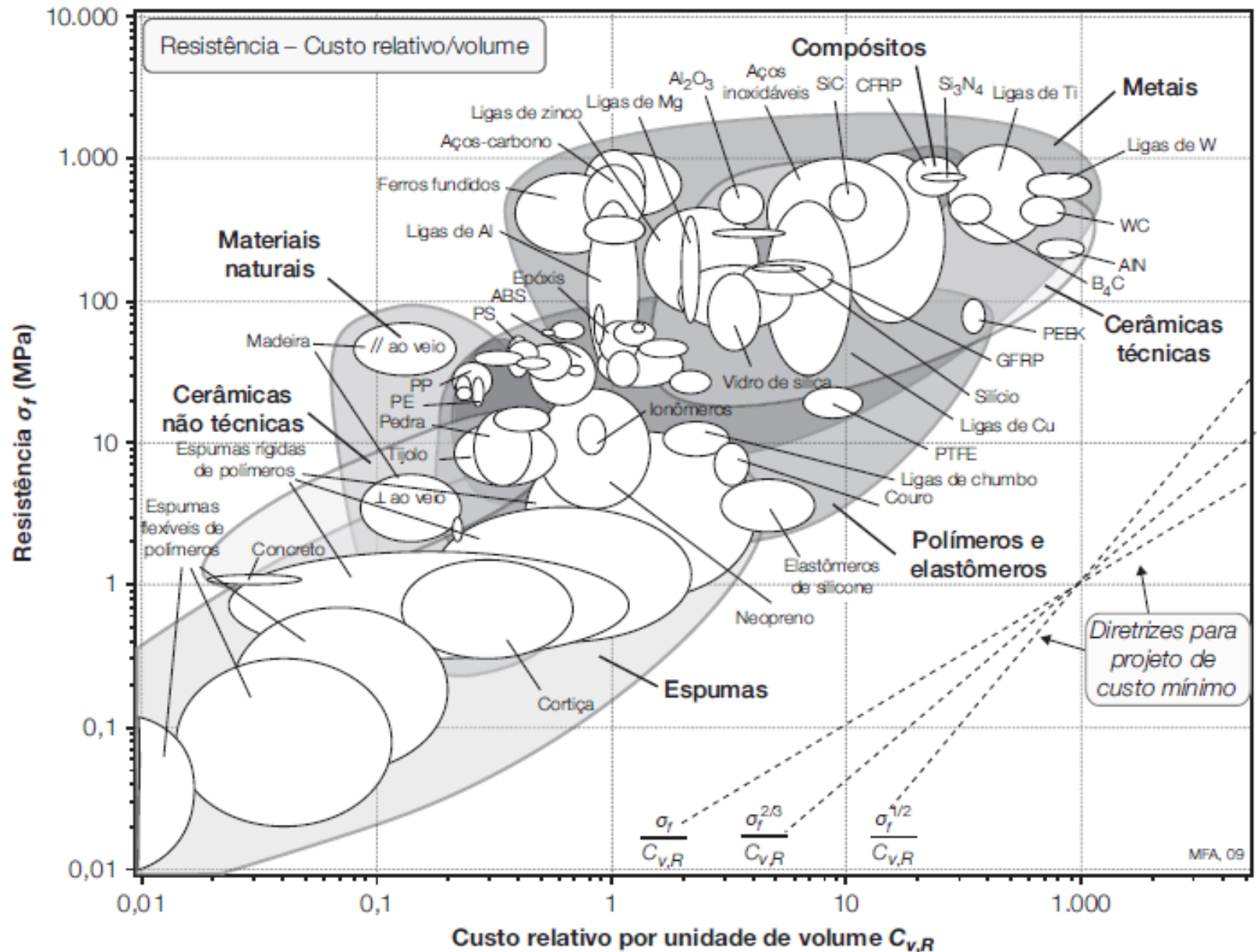


Mapa de Módulo Elástico – Custo Relativo/vol

$$C_{v,R} = \frac{\text{Custo/kg} \times \text{Densidade de material}}{\text{Custo/kg} \times \text{Densidade da barra de aço doce}}$$



Mapa de Resistência – Custo Relativo/vol



FIM