



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Unidade 3

CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais
1º semestre de 2017

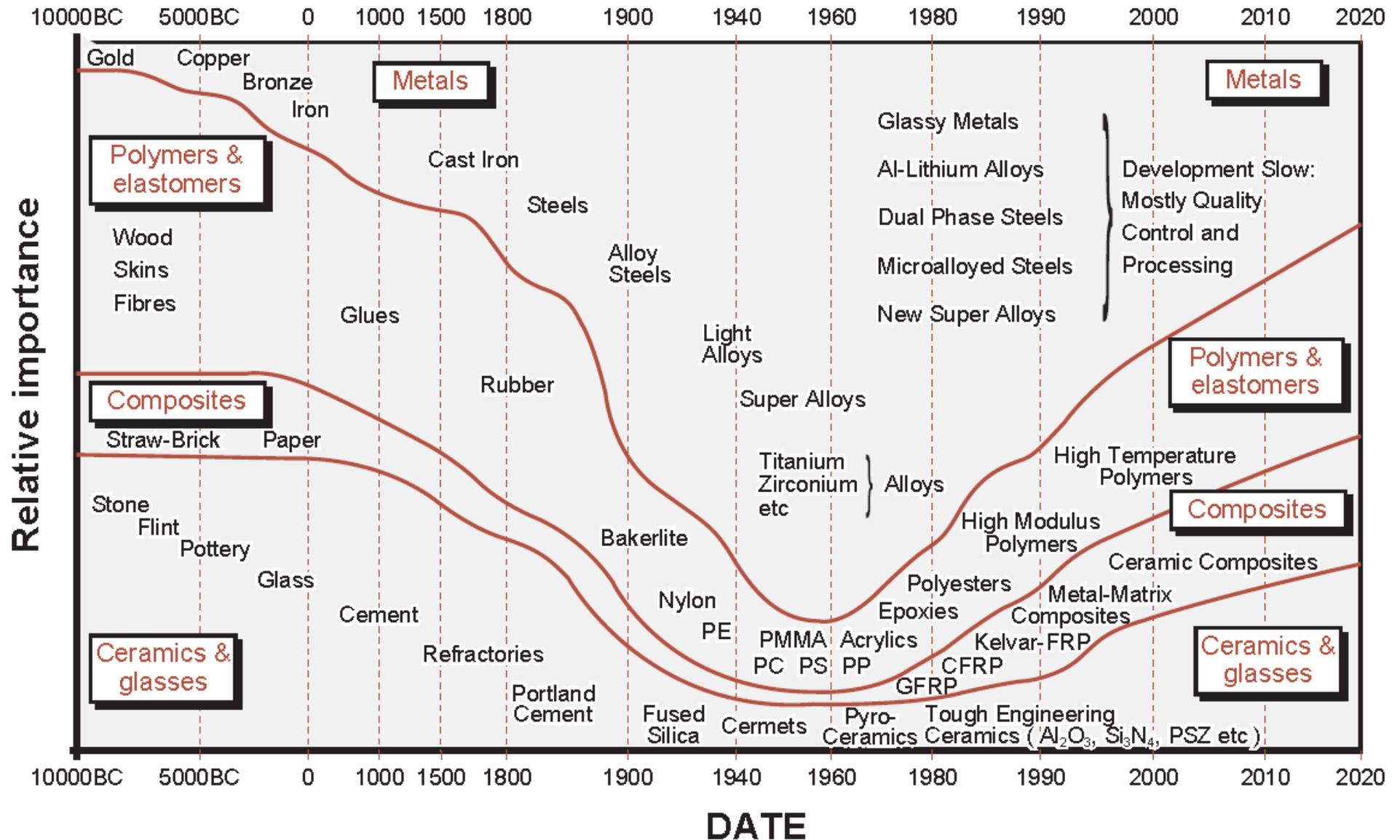
Materiais – Perspectiva Histórica ⁽¹⁾

- Os materiais estão tão profundamente relacionados com a cultura ocidental contemporânea que é praticamente impossível pensar nossa estrutura econômica atual sem pensar num desenvolvimento contínuo dos materiais.
... e você provavelmente nunca tinha pensado nisso antes, não é mesmo?
- Transportes, moradia, vestimentas, comunicações, energia, lazer, esportes, produção e conservação de alimentos, medicina, meio ambiente... virtualmente todas as áreas da vida cotidiana são afetadas de alguma forma pelo desenvolvimento dos materiais.
- Historicamente, o desenvolvimento das sociedades esteve ligado à sua capacidade de produzir e manipular materiais, tanto que épocas históricas foram designadas pelo nível de seu desenvolvimento de materiais:
 - Idade da Pedra
 - Idade do Bronze
 - Idade do Ferro

Materiais – Perspectiva Histórica (2)

- As primeiras civilizações humanas tinham acesso a um número muito pequeno de materiais, em princípio todos eles naturais (pedra, madeira, argila, fibras de origem vegetal e animal, peles, ...)
- Com o tempo, foram sendo descobertas técnicas que permitiram a melhoria do desempenho dos materiais naturais (por meio de tratamentos térmicos, por exemplo) e também foram desenvolvidos métodos de produção dos primeiros materiais “sintéticos” produzidos pelo homem: as cerâmicas e os metais.
- A figura apresentada no slide a seguir *(retirada do livro de Ashby mencionado nas referências)* dá uma ideia da evolução dos materiais ao longo do tempo...

Materials – Perspectiva Histórica (3)



Materiais – Perspectiva Histórica (4)

- Essa figura também apresenta uma classificação dos materiais em quatro categorias, e essa será a classificação que será utilizada neste curso.
 - A classificação dos materiais em **quatro grandes categorias**, baseada **no tipo de ligação predominante** (*e nas propriedades que a ele são relacionadas*), ou seja:
 - Materiais **Metálicos** (→ ligação metálica)
 - Materiais **Cerâmicos** (→ ligação mista iônico-covalente)
 - Materiais **Poliméricos** (→ ligação covalente e ligações secundárias)
 - Materiais **Compósitos** (que corresponde a uma categoria que “mistura” as outras categorias num mesmo material)

atualmente é uma das mais seguidas no ensino da Ciência e Engenharia de Materiais.

...no entanto...

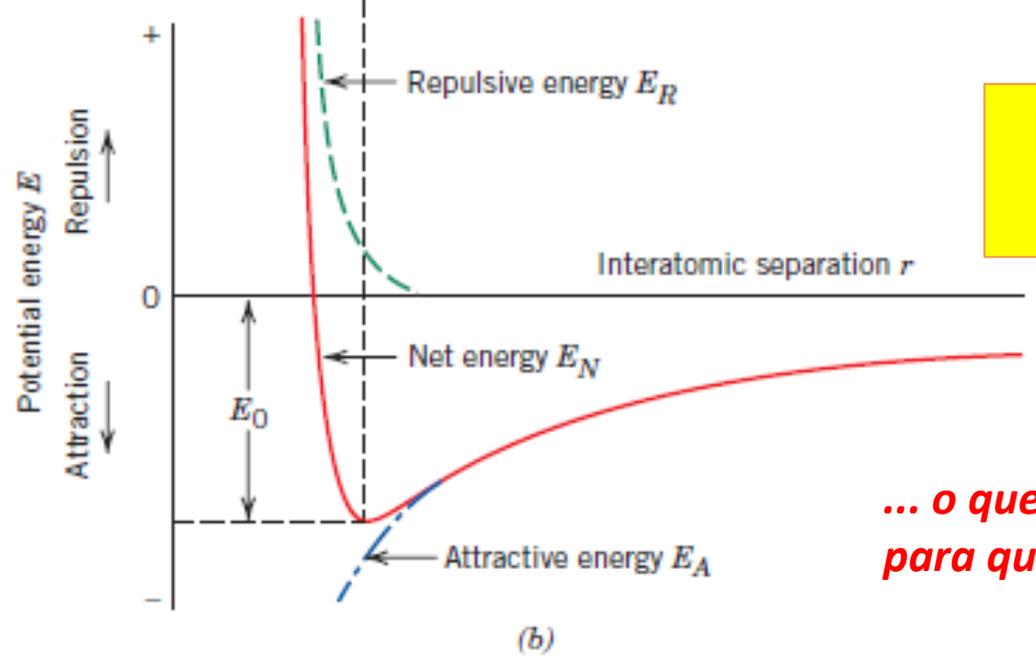
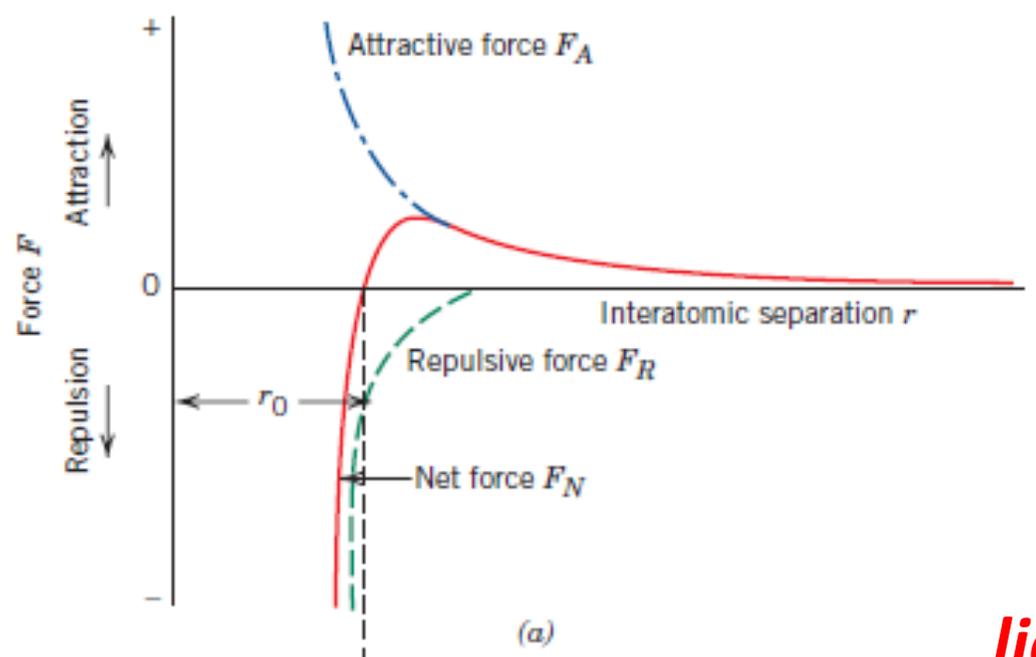
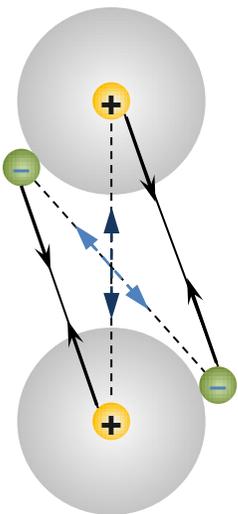


Figure 2.8 (a) The dependence of repulsive, attractive, and net forces on interatomic separation for two isolated atoms. (b) The dependence of repulsive, attractive, and net potential energies on interatomic separation for two isolated atoms.

...falando em ligações químicas...

Força e Energia de Ligação

... o que vai ser apresentado vale para qualquer tipo de ligação!

Força e Energia de Ligação

Forças interatômicas

- **Atrativa** (F_A): depende do tipo de ligação que existe entre os dois átomos.
- **Repulsiva** (F_R): tem a sua origem na interação entre as nuvens eletrônicas carregadas negativamente dos dois átomos.

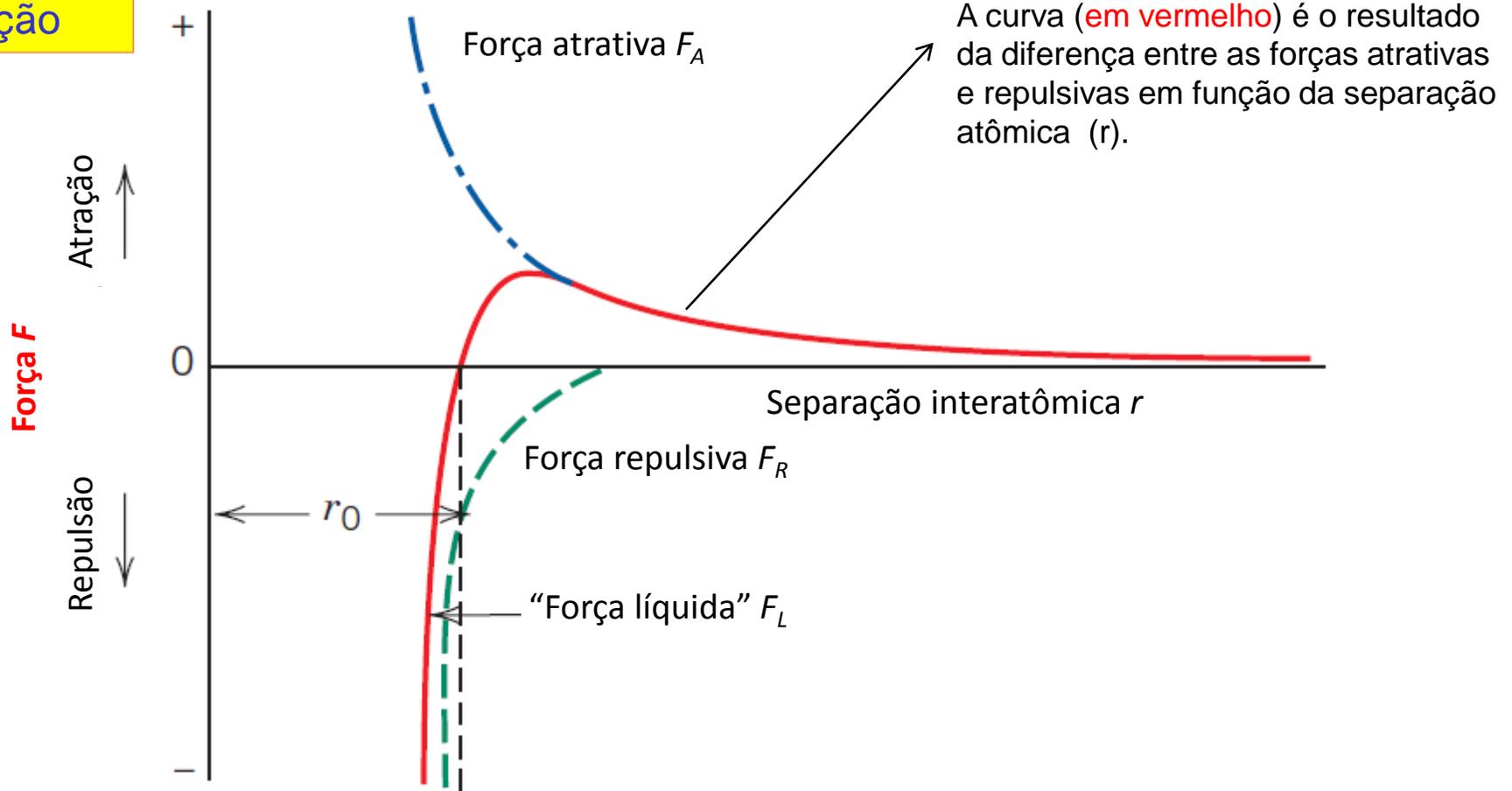
A força “líquida” (F_L) entre dois átomos é:

$$F_L = F_R + F_A$$

A energia (E) também é função da separação interatômica. E e F estão relacionadas matematicamente:

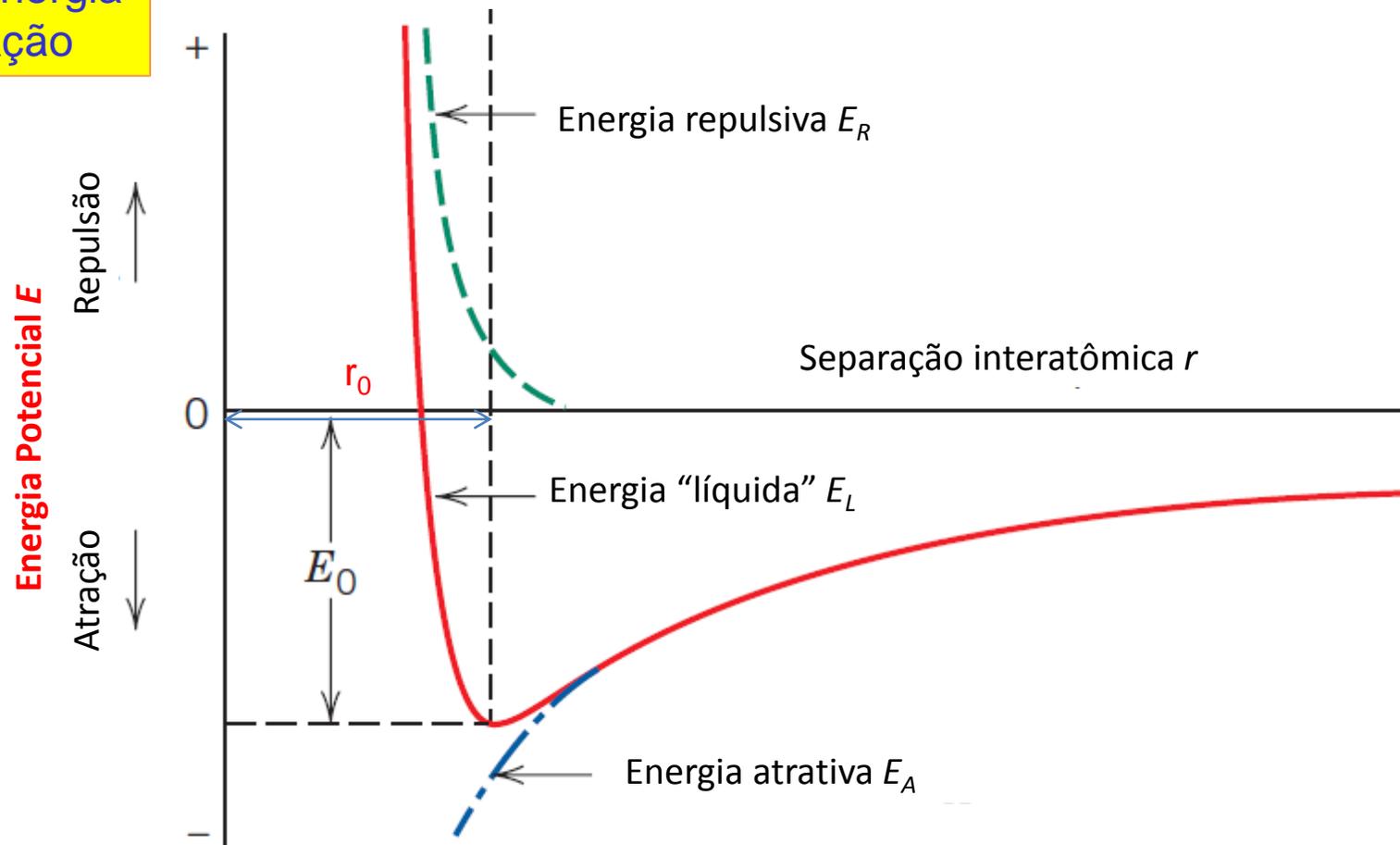
$$E_L = \int_{\infty}^r F_L dr = \int_{\infty}^r F_A dr + \int_{\infty}^r F_R dr = E_A + E_R$$

Força e Energia de Ligação



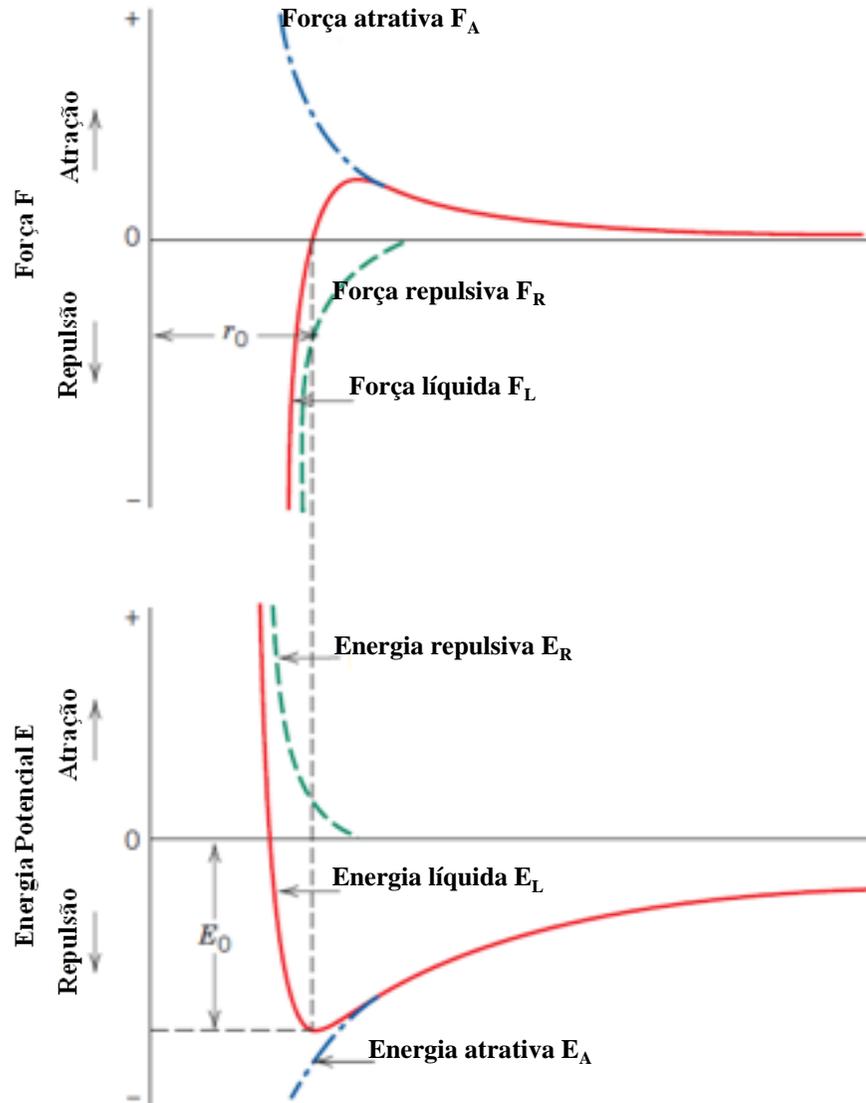
Forças de atração e de repulsão em função da distância interatômica (r) para dois átomos isolados. r_0 é a distância interatômica de equilíbrio da ligação química, ou seja, é a distância interatômica na qual as forças de atração e repulsão são iguais ($F_L = 0$).

Força e Energia de Ligação



Energia potencial em função da distância interatômica (r) para dois átomos isolados, onde E_0 é a energia de ligação, que corresponde à energia necessária para separar esses dois átomos da distância r_0 (distância interatômica de equilíbrio da ligação química) até o infinito.

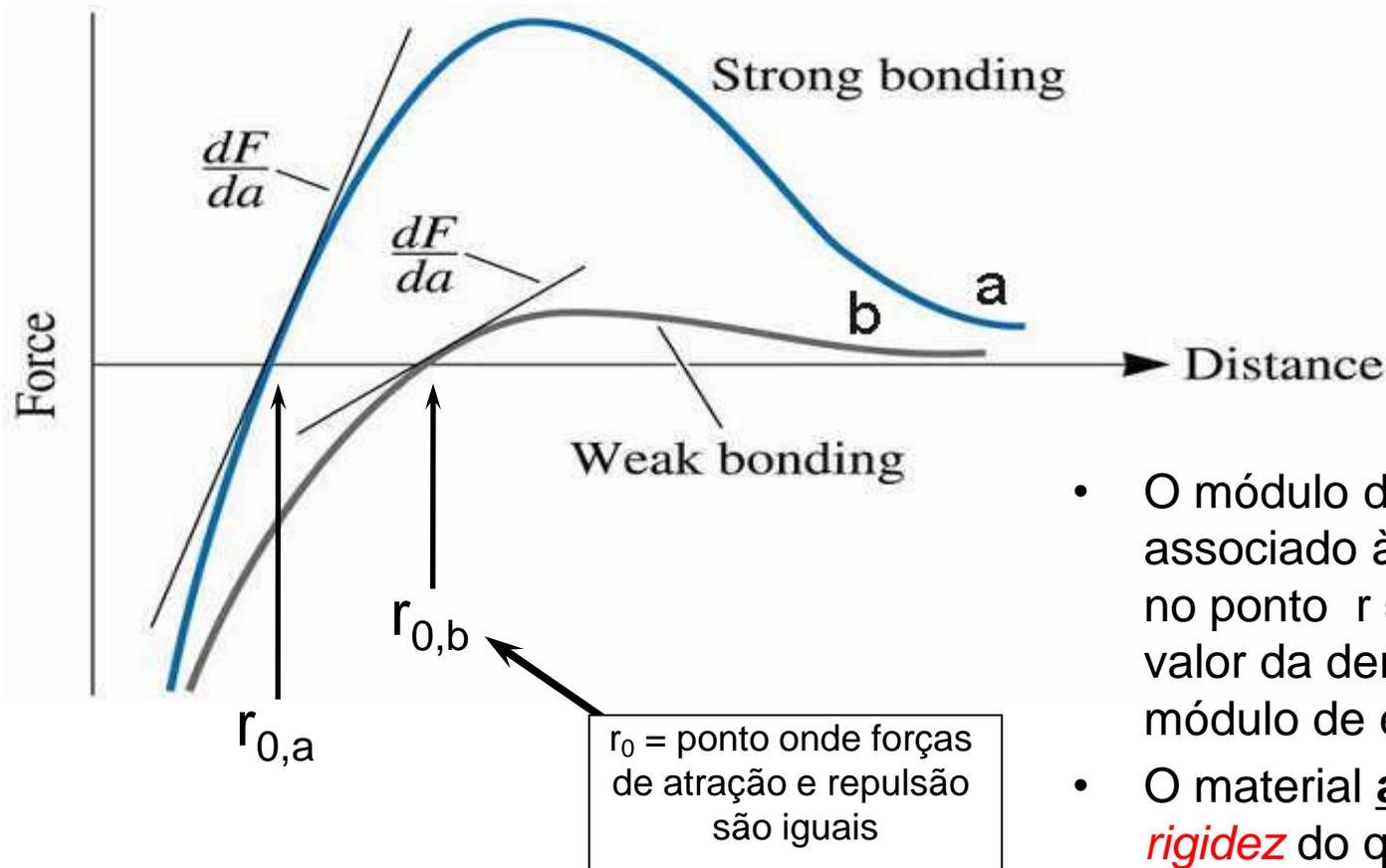
Relação entre Propriedades e Força e Energia de Ligação



Propriedades Mecânicas

- Em escala atômica, a **DEFORMAÇÃO ELÁSTICA** é manifestada como uma pequena alteração na distância interatômica e na energia da ligação.
- O valor de E_0 (também chamado de *profundidade do poço de potencial*) é uma medida da **energia de ligação**; quanto maior for E_0 (em módulo), maior será a energia de ligação e, portanto, também maior será a resistência à deformação elástica (RIGIDEZ).
- O **MÓDULO DE ELASTICIDADE** é uma medida da rigidez de um material.

Relação entre Propriedades e Força e Energia de Ligação

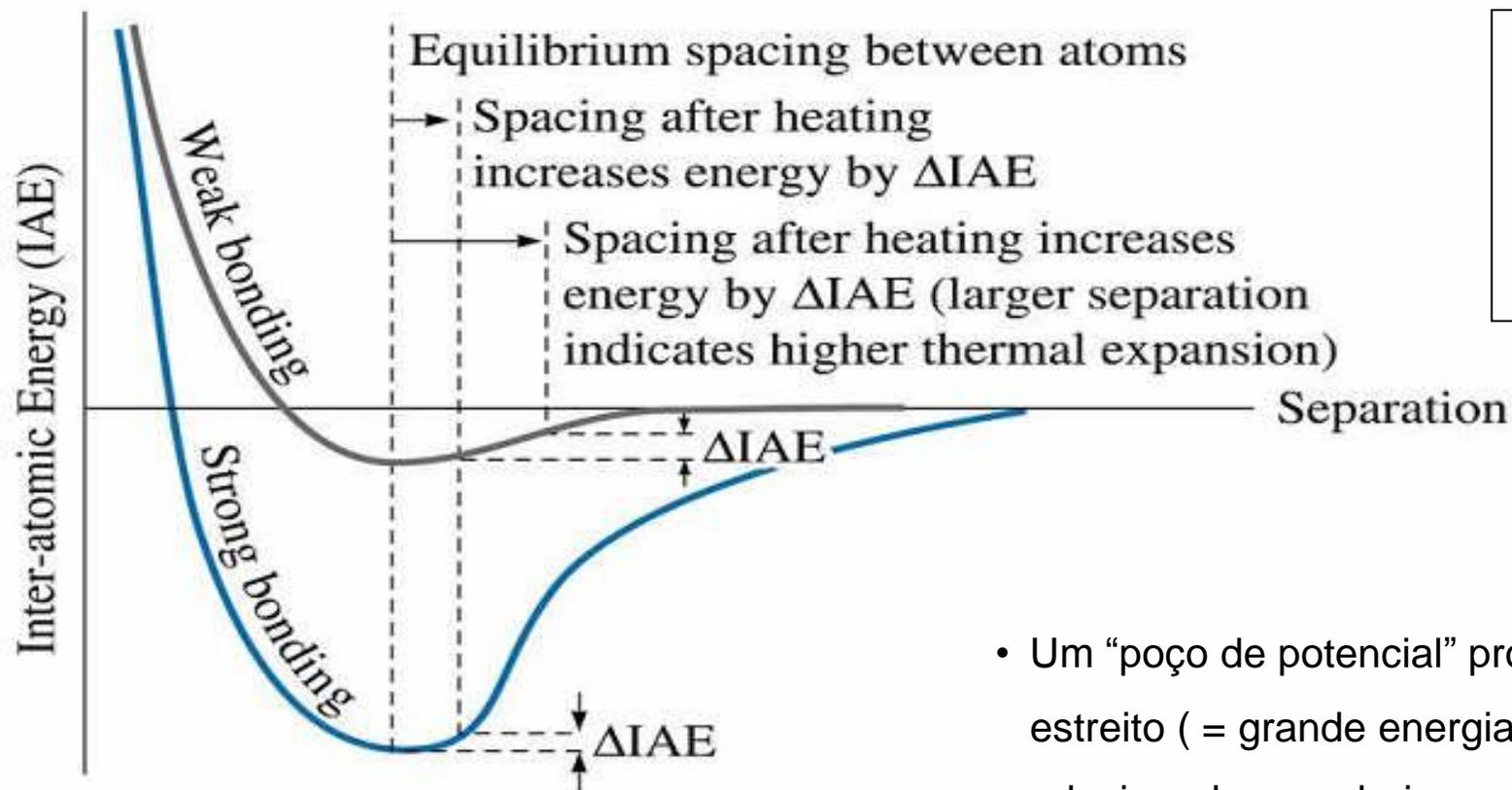


Módulo de Elasticidade

- O módulo de elasticidade pode ser associado à derivada da curva $F(r)$ no ponto $r = r_0$; quanto maior for o valor da derivada, maior será o módulo de elasticidade.
- O material **a** apresenta *maior rigidez* do que o material **b**.

Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso → representa a constante de proporcionalidade entre uma tensão aplicada a um corpo e a deformação causada por essa tensão.

Relação entre Propriedades e Força e Energia de Ligação

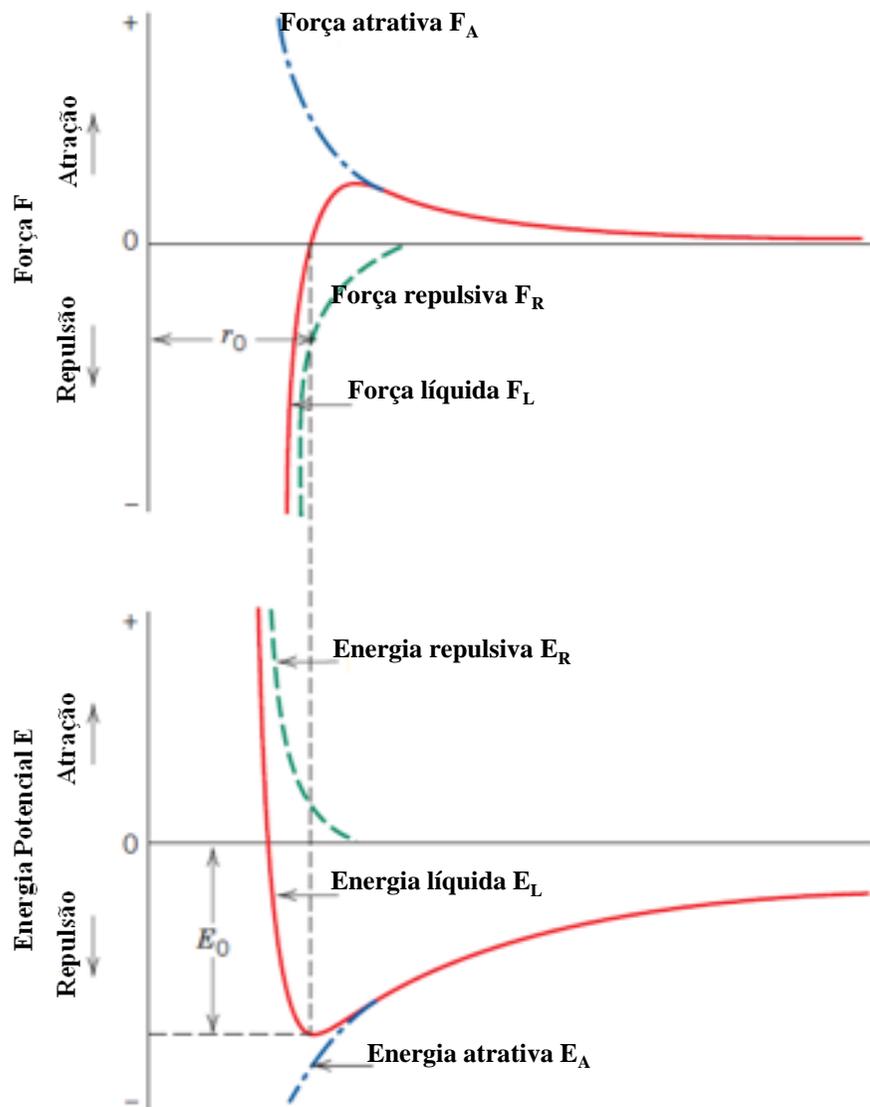


Coeficiente
de
Expansão
Térmica

- Um “poço de potencial” profundo e estreito (= grande energia de ligação) está relacionado a um baixo coeficiente de expansão térmica.

Obs.: IAE = interatomic energy

Relação entre Propriedades e Força e Energia de Ligação



Pontos de fusão e de ebulição

- Materiais que apresentam grandes energias de ligação (ou seja, poços de potencial profundos) também apresentam temperaturas de fusão e de ebulição elevadas.

Materiais Metálicos



Atomium

*Construído em Bruxelas para a Exposição Universal de 1958.
Essa construção representa a estrutura cristalina CCC da ferrita.*

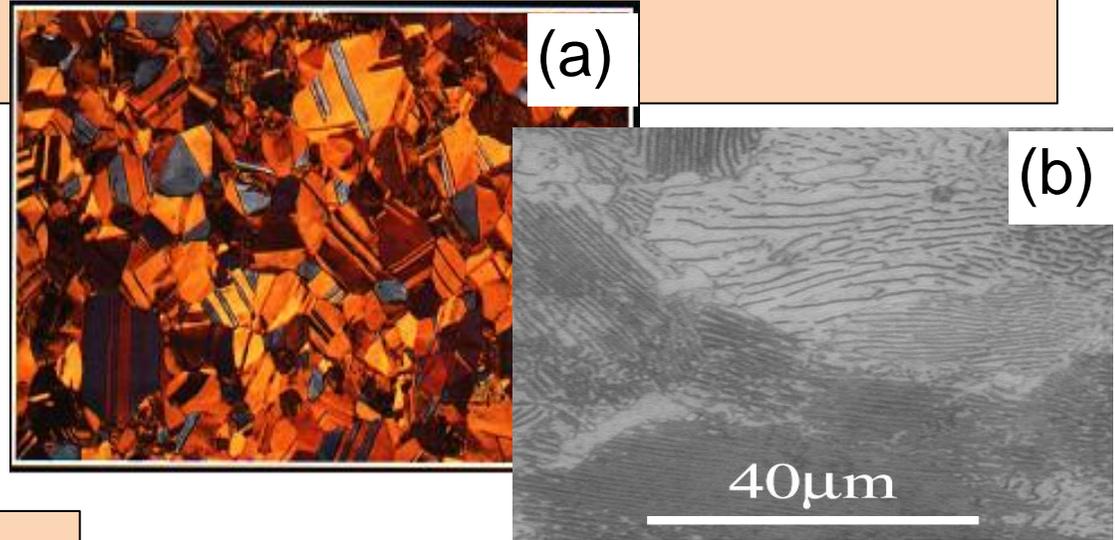
Materiais Metálicos (2)



Propriedades Características (1)

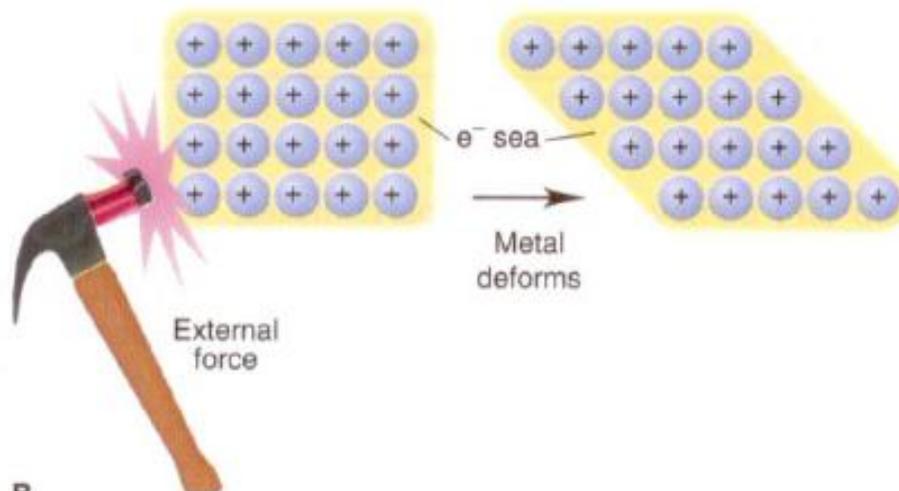
- São sólidos à temperatura ambiente (exceto o mercúrio).
- Mecanicamente são geralmente fortes (alta resistência mecânica), rígidos (módulo de elasticidade elevado) e tenazes (resistentes a fratura).
- Densidade variável ($Mg=1,74 \text{ g/cm}^3$; $U=18,95 \text{ g/cm}^3$).
- Superfície apresenta brilho (*“brilho metálico”*) quando polida.
- Bons condutores elétricos e térmicos.
- De um modo geral, reagem facilmente com o oxigênio (= oxidam facilmente).

Materiais Metálicos (3)



Propriedades Características (2)

- Podem ser dúcteis (deformar com relativa facilidade) ou rígidos (depende da composição e microestrutura).



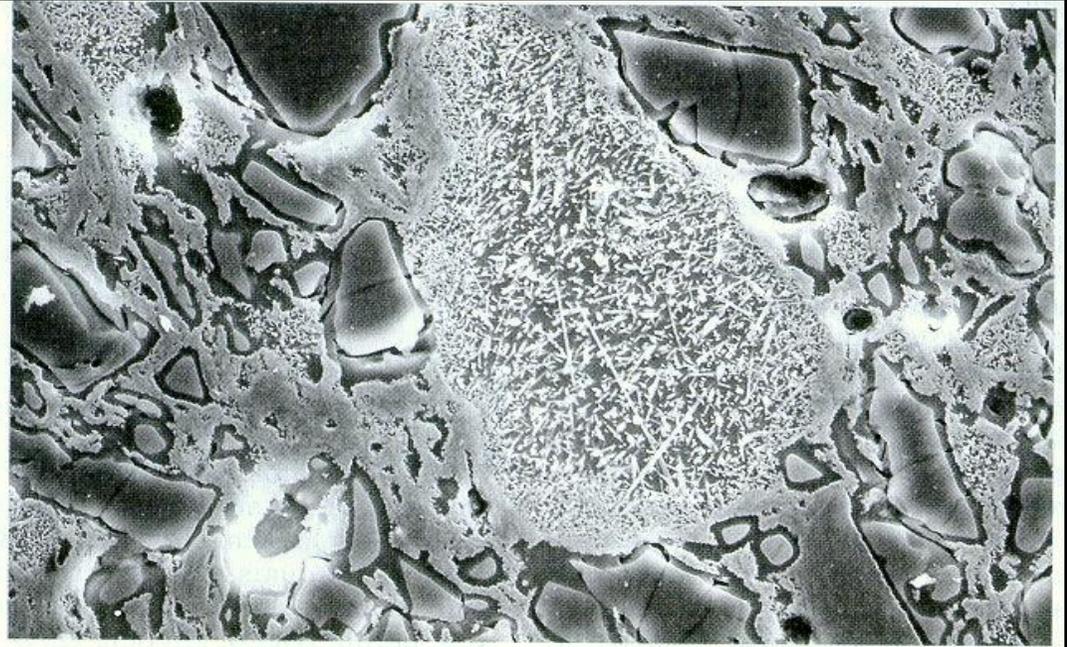
Materiais Cerâmicos



Recife: Oficina Brennand e Instituto Ricardo Brennand.

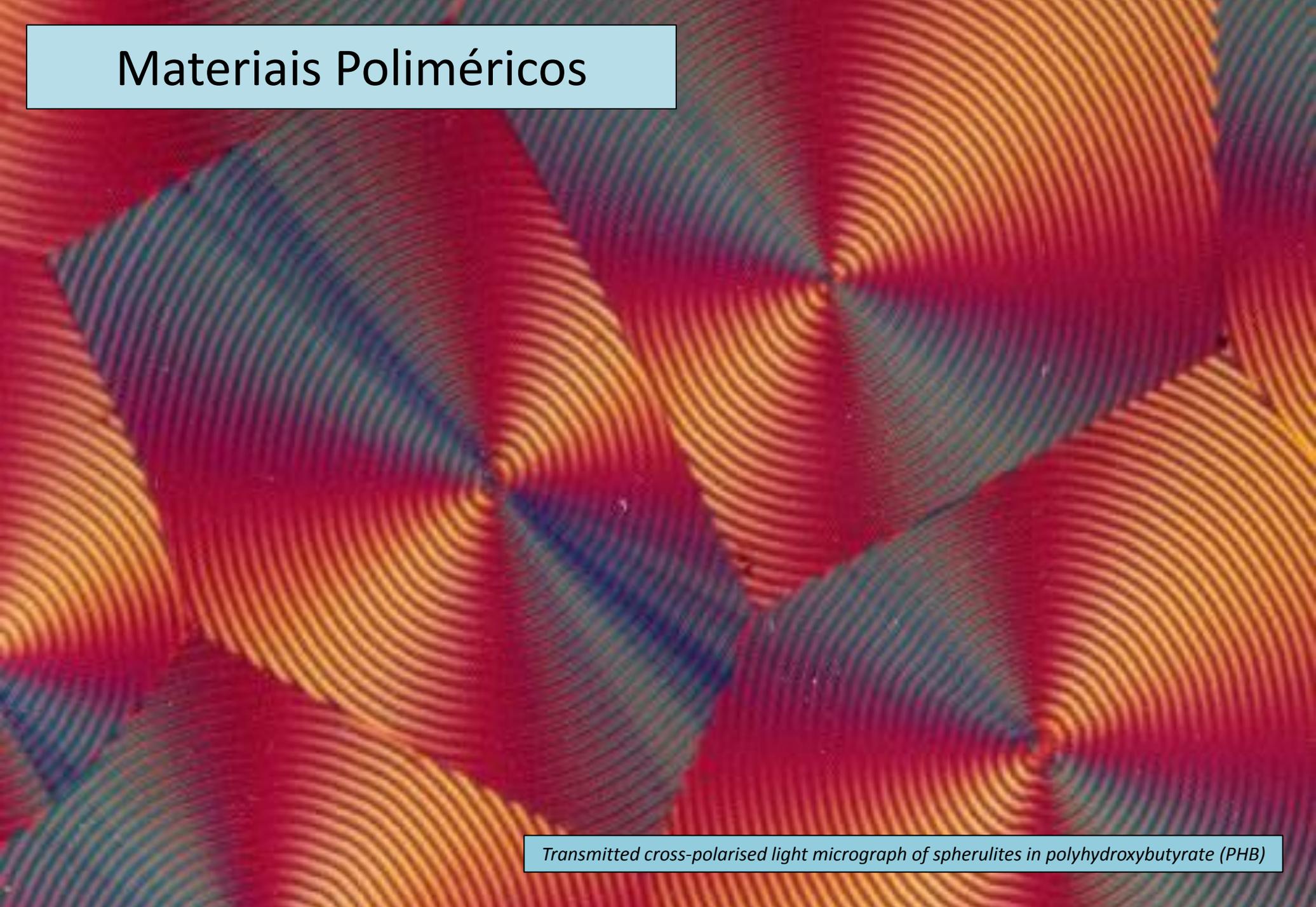
Materiais Cerâmicos (2)

Micrografia eletrônica de varredura de uma porcelana (atacada por HF a 5°C durante 15s)



- Propriedades gerais : devido ao caráter direcional das ligações - ligações fortes, de caráter misto iônico-covalente (com caráter covalente predominante em muitos casos) - e devido à ausência de elétrons livres, os materiais cerâmicos apresentam as seguintes características gerais:
 - Isolantes térmicos e elétricos
 - Refratários (elevado ponto de fusão)
 - Inércia química
 - Corpos duros e frágeis (ou seja, muito pouco dúcteis)
 - Elevado módulo de elasticidade

Materiais Poliméricos



Transmitted cross-polarised light micrograph of spherulites in polyhydroxybutyrate (PHB)

Materiais Poliméricos (1)



IA																				O											
1 H	IIA																														2 He
3 Li	4 Be																					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
11 Na	12 Mg											VIII										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn														
87 Fr	88 Ra	89 Ac																													
																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

- ✓ São principalmente compostos orgânicos com massas moleculares médias que variam de 10^3 a 10^7 g/mol.
- ✓ Os elementos principais são o C e H, e em proporções menores tem-se outros elementos, tais como O, Cl, F, N, S e Si.

Materiais Poliméricos (2)

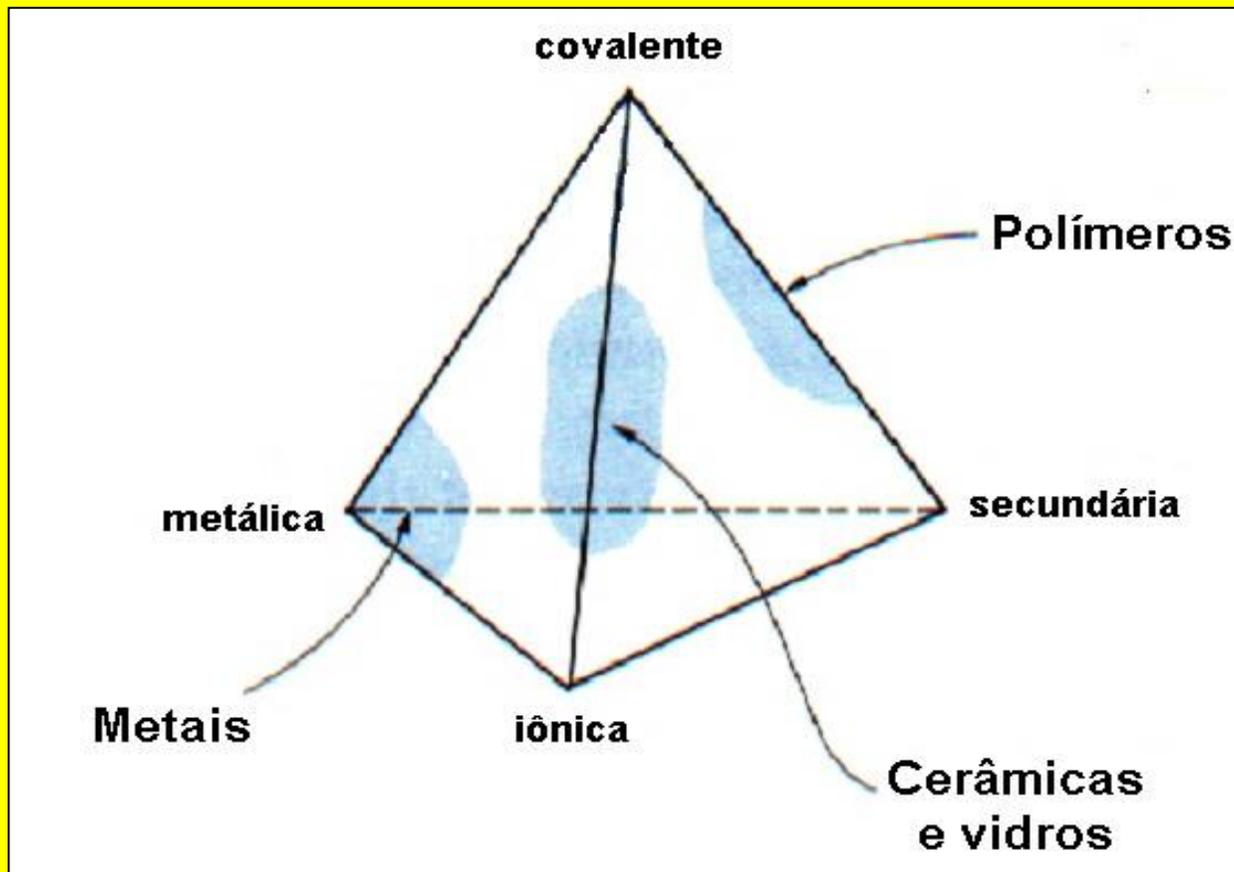
Principais categorias

- ✓ Termoplásticos → exemplo: polipropileno (PP)
- ✓ Termorrígidos → exemplo: epoxi, baquelite
- ✓ Elastômeros → exemplo: borracha natural e borracha de silicone

Propriedades características

- ✓ Densidade baixa
- ✓ Em geral flexíveis e fáceis de conformar (*devido às ligações secundárias entre as cadeias poliméricas*)
- ✓ Em geral tenazes *MAS* também existem materiais poliméricos duros (*pouco dúcteis*)
- ✓ Módulo de elasticidade baixo - intermediário
- ✓ Geralmente pouco resistentes a altas temperaturas
- ✓ Geralmente apresentam distribuição na massa molecular

Classificação dos Materiais : Tipo de Ligação



Tetraedro que representa a contribuição relativa dos diferentes tipos de ligação para categorias de Materiais de Engenharia (Metals, Cerâmicas e Polímeros)

Materiais Compósitos



Boeing 787 Dreamliner – 50% da fuselagem é composta por materiais compósitos

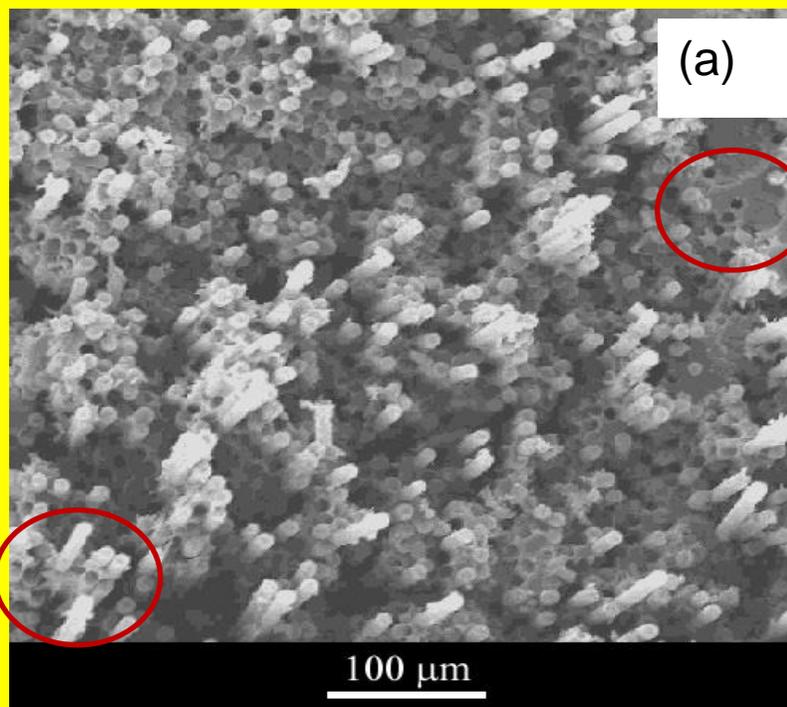
Materiais Compósitos (1)

- Um material compósito é produzido empregando-se dois (ou mais) materiais das categorias discutidas anteriormente (*metálicos, cerâmicos, poliméricos*).
- Um material compósito é produzido tendo como objetivo a combinação de propriedades que não podem ser obtidas isoladamente com o uso de um único material, buscando incorporar no produto características desejáveis de cada um dos materiais que o constituem.
- Um exemplo típico é um compósito de fibra de vidro em matriz polimérica.
 - A fibra de vidro confere resistência mecânica, enquanto a matriz polimérica é responsável pela flexibilidade do compósito.

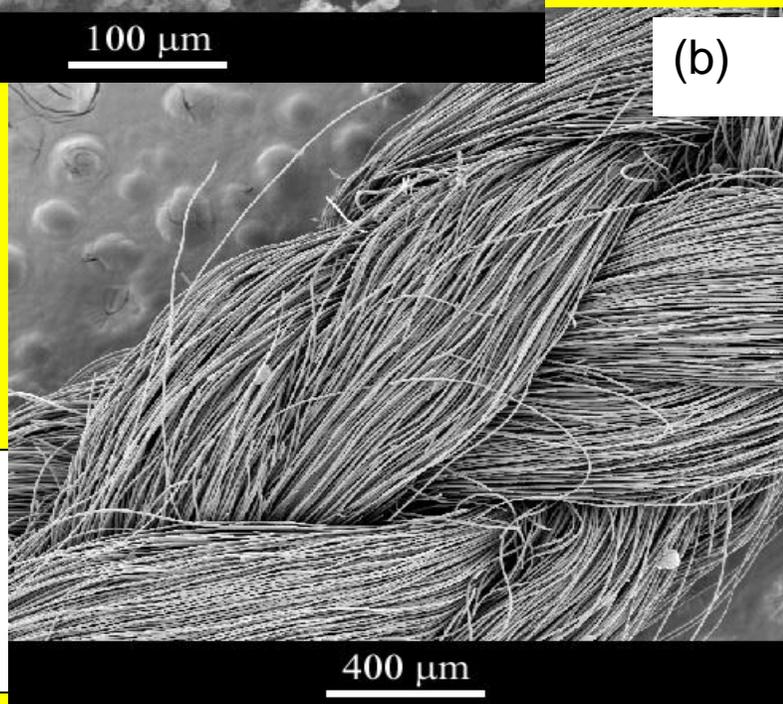
Materiais Compósitos (2)

- O componente em maior proporção é chamado de *matriz* (ou fase contínua) .
- O componente (ou os componentes, se houver mais de um) em menor proporção é chamado de *fase dispersa* ou *reforço*.
- A matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica.
- O mesmo vale para o reforço, que pode ser polimérico, metálico ou cerâmico, e que pode estar na forma de partículas, fibras (*contínuas* ou *descontínuas*), bastonetes, lâminas ou plaquetas.

Pedaços de fibras rompidas e “arrancadas” da matriz – os “buracos” correspondentes estão no outro pedaço da peça quebrada



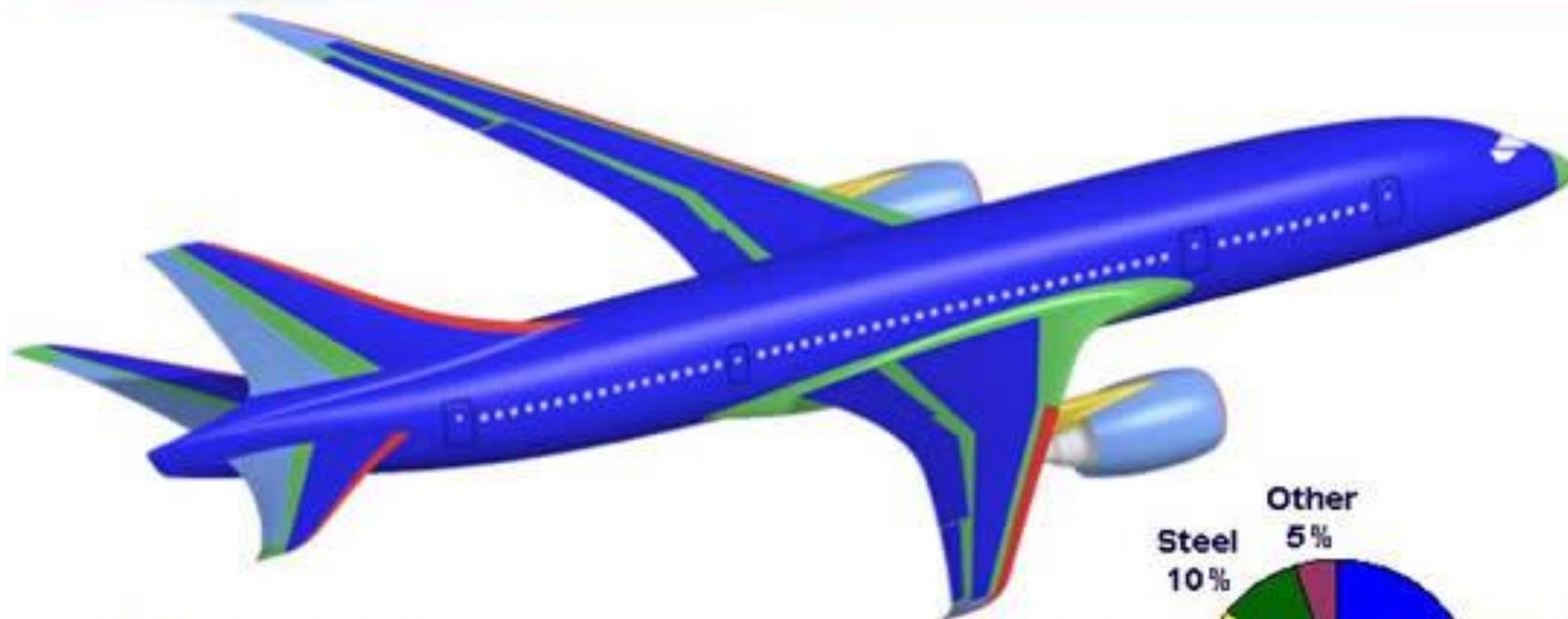
“buracos” de onde fibras foram “arrancadas” – as fibras que saíram daqui estão no outro pedaço da peça quebrada



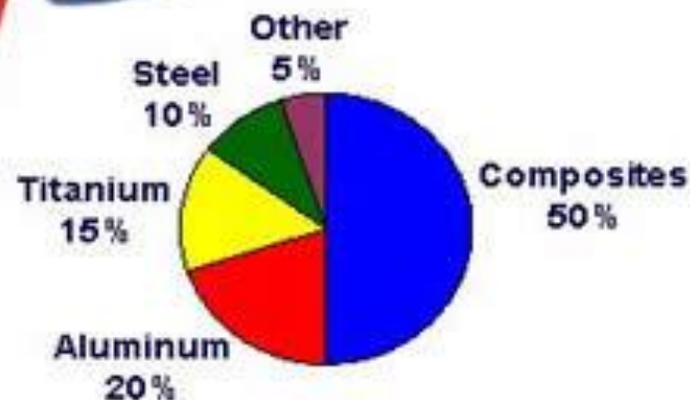
Micrografias eletrônicas de varredura de:
(a) superfície de fratura de um compósito de matriz polimérica com reforço de fibras de vidro (rígidas);
(b) fibras de carbono trançadas, usadas em compósitos de matriz polimérica.

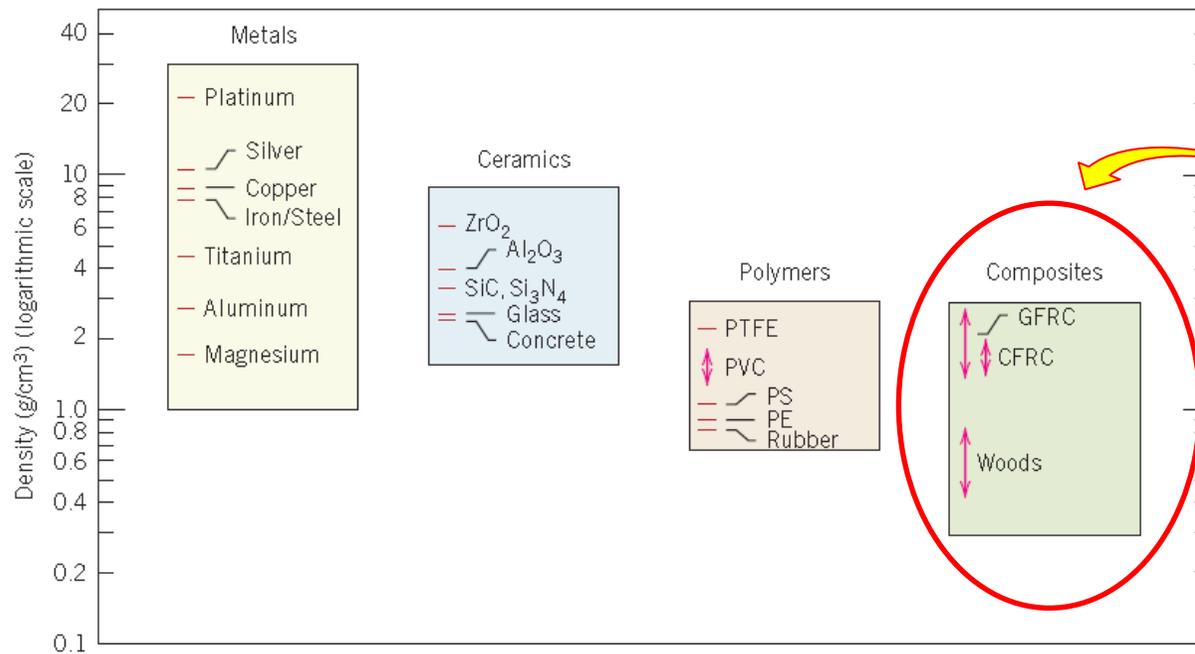


Composite Solutions Applied Throughout the 787



- Carbon laminate
- Carbon sandwich
- Fiberglass
- Aluminum
- Aluminum/steel/titanium pylons

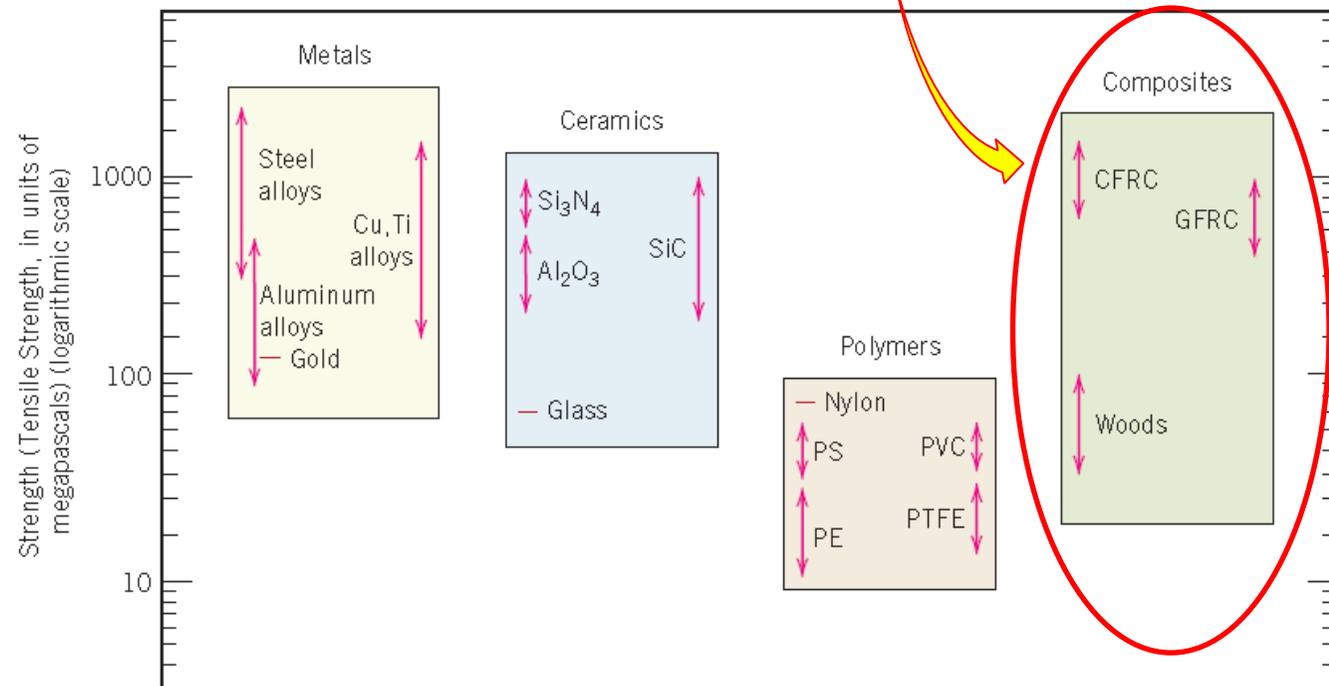




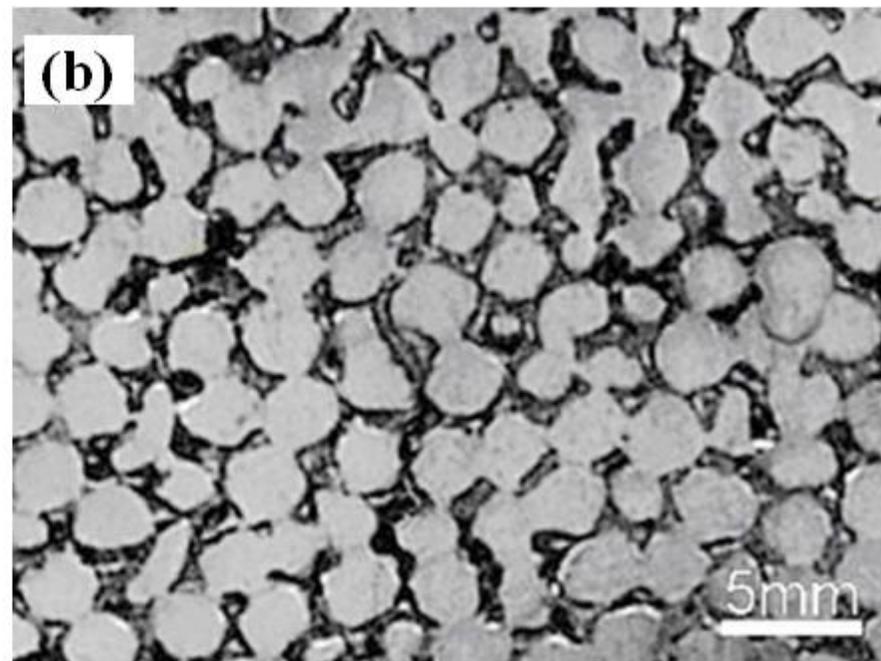
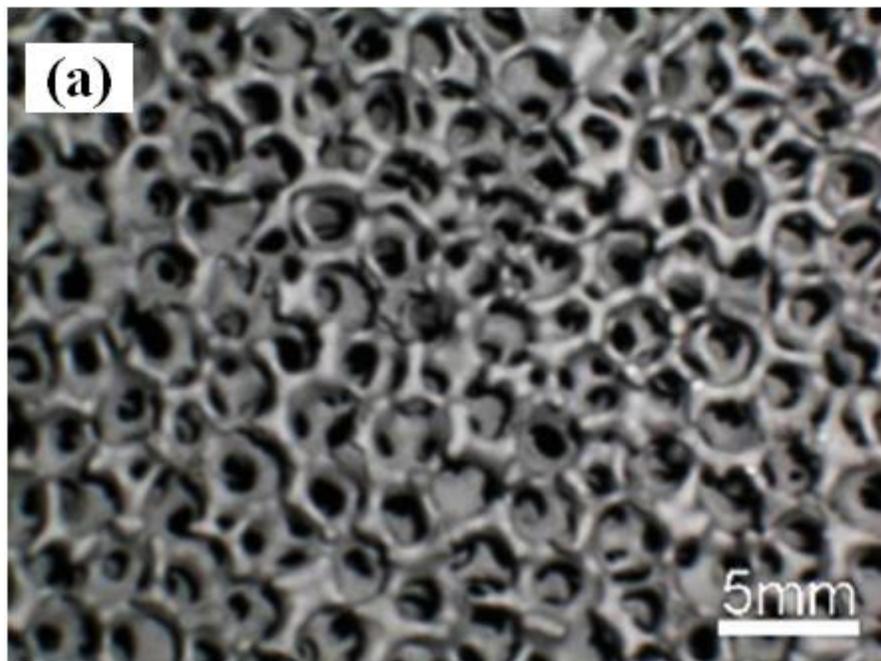
Compósitos de fibra de vidro (GFRC) e fibra de carbono (CFRC) em matriz polimérica tem resistência mecânica similar à do aço e menor densidade...

Bar-chart of room-temperature density values for various metals, ceramics, polymers, and composite materials.

Bar-chart of room-temperature strength (i.e., tensile strength) values for various metals, ceramics, polymers, and composite materials.



Exemplo de Compósito Metal-Cerâmico



Exemplo de compósito Metal-Cerâmica : Compósito SiC – aço 5120 (*de baixa liga*)

- O compósito é processado da seguinte forma: em primeiro lugar uma estrutura porosa de SiC é produzida, partindo-se de uma suspensão aquosa de partículas de SiC e usando-se um bloco poroso de poliuretano como “template”. O bloco de [poliuretano+SiC] é calcinado a 2000°C; o polímero é queimado e a pré-forma porosa de SiC sinterizada mostrada em (a) é obtida. O aço 5120 é fundido num forno à vácuo a 1650oC e o aço líquido é infiltrado na pré-forma porosa de SiC (que foi aquecida a 450oC à vácuo previamente à infiltração, e é mantida aquecida durante todo o processo). O compósito, que foi resfriado naturalmente dentro do forno (que é mantido à vácuo) é mostrado em (b).

Materiais – Perspectiva Histórica (5)

- Se no início as opções de materiais eram poucas, atualmente os materiais disponíveis são contados em dezenas de milhares, muitos deles extremamente especializados para atender as demandas cada vez mais específicas da complexa sociedade atual !
- Com tantos materiais acessíveis, uma classificação em apenas quatro grandes categorias pode não ser adequada... e por essa razão algumas outras sistemáticas de classificação existem na literatura científica e técnica.
- Essas outras classificações normalmente são **funcionais**, baseadas em alguma propriedade específica (por exemplo: semicondutores, materiais magnéticos, biomateriais, materiais para aplicações fotônicas, ...).

Materiais – Perspectiva Histórica ⁽⁶⁾

IMPORTANTE:

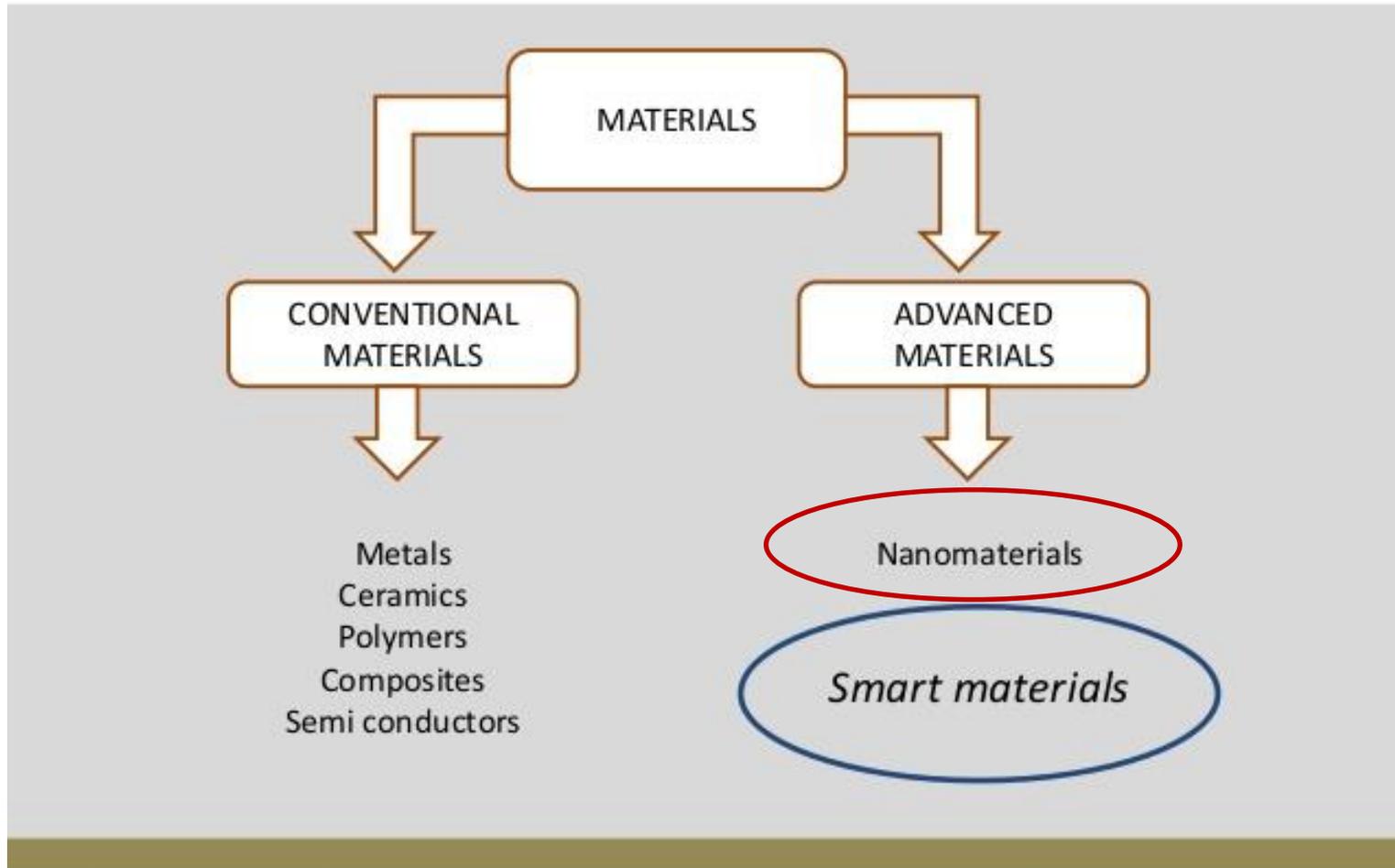
- Nenhum sistema de classificação de materiais é, em si, certo ou errado.
- As classificações servem como ferramentas para sistematização de conhecimento científico e tecnológico – *e ferramentas não estão certas ou erradas, elas são úteis ou não são.*
- Assim sendo, qualquer sistema de classificação de materiais justifica a sua existência por meio da sua utilidade.

Exemplo de uma classificação funcional dos materiais

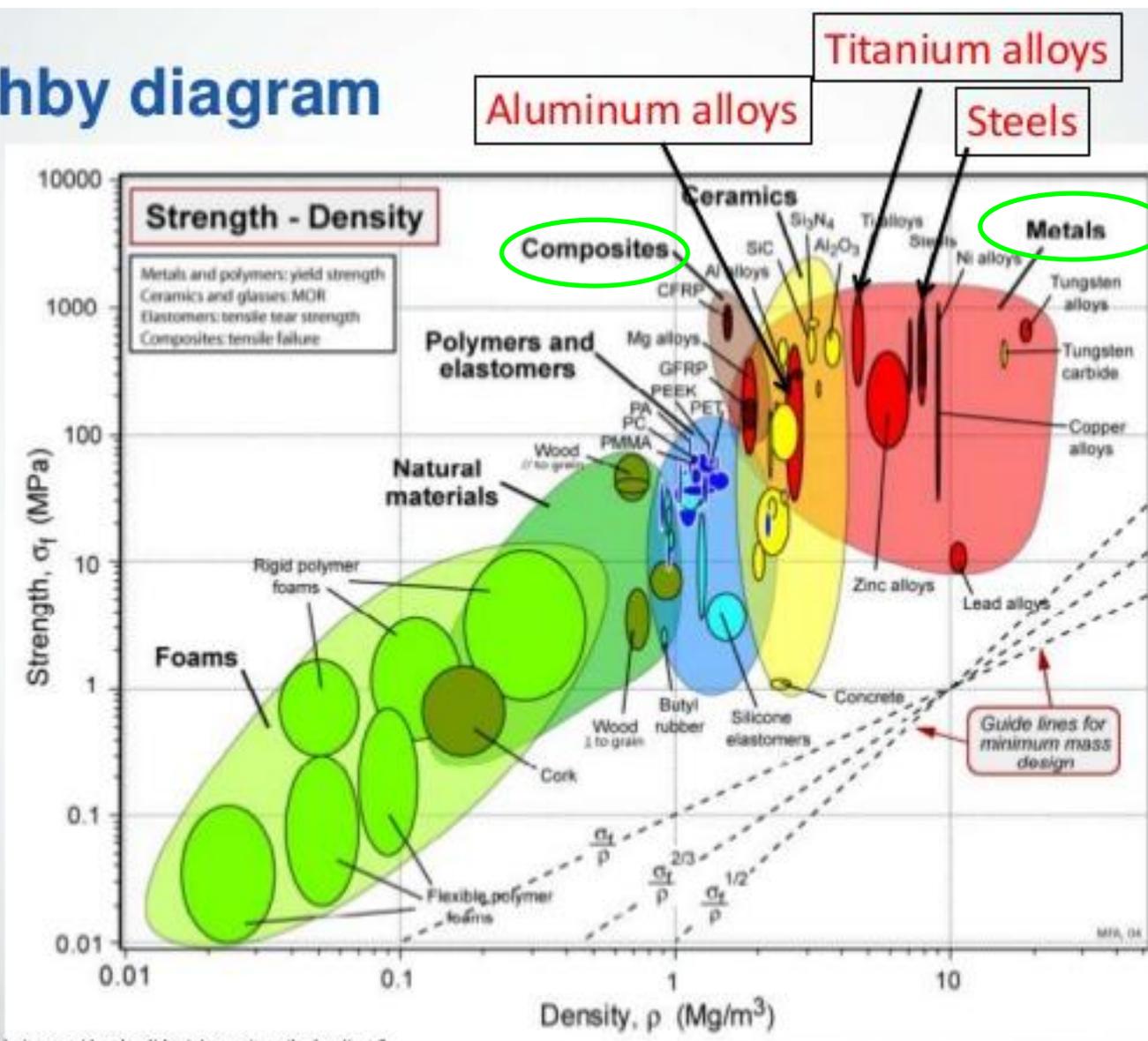


Uma outra forma de classificação dos materiais...

CLASSIFICATION OF MATERIALS



Ashby diagram



http://www.grantadesign.com/download/charts/new_strength_density.pdf

Uma forma de **representar propriedades dos materiais** que é muito útil foi desenvolvida por Ashby. O diagrama acima (densidade x resistência) mostra como compósitos como o CFRC e o GFRC (na figura: CFRP e GFRP) tem resistência similar a diversas ligas metálicas mas com menor densidade. Muitos outros diagramas de Ashby existem relacionando outras propriedades.

...uma perspectiva no futuro...

**nature
materials**

REVIEW ARTICLE

PUBLISHED ONLINE: 26 OCTOBER 2014 | DOI: 10.1038/NMAT4089

Bioinspired structural materials

Ulrike G. K. Wegst^{1*}, Hao Bai², Eduardo Saiz³, Antoni P. Tomsia² and Robert O. Ritchie^{2,4*}

Natural structural materials are built at ambient temperature from a fairly limited selection of components. They usually comprise hard and soft phases arranged in complex hierarchical architectures, with characteristic dimensions spanning from the nanoscale to the macroscale. The resulting materials are lightweight and often display unique combinations of strength and toughness, but have proven difficult to mimic synthetically. Here, we review the common design motifs of a range of natural structural materials, and discuss the difficulties associated with the design and fabrication of synthetic structures that mimic the structural and mechanical characteristics of their natural counterparts.



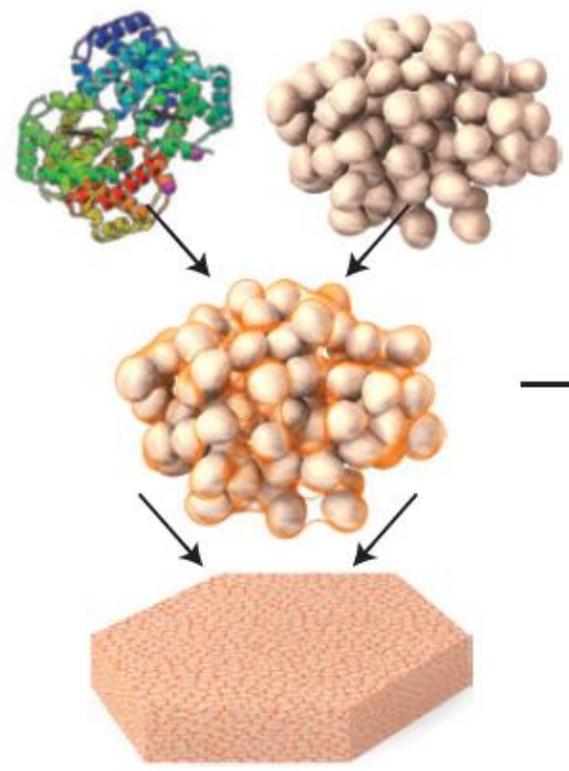
| The hierarchical structure of nacre.



Proteins + chitin

~30 nm grains

Breaking of mineral bridges



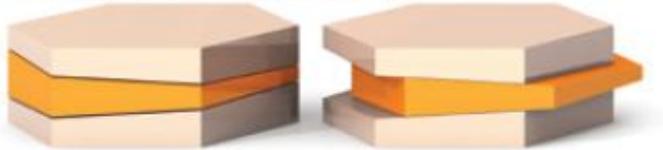
Inelastic shearing resisted by nano-asperities

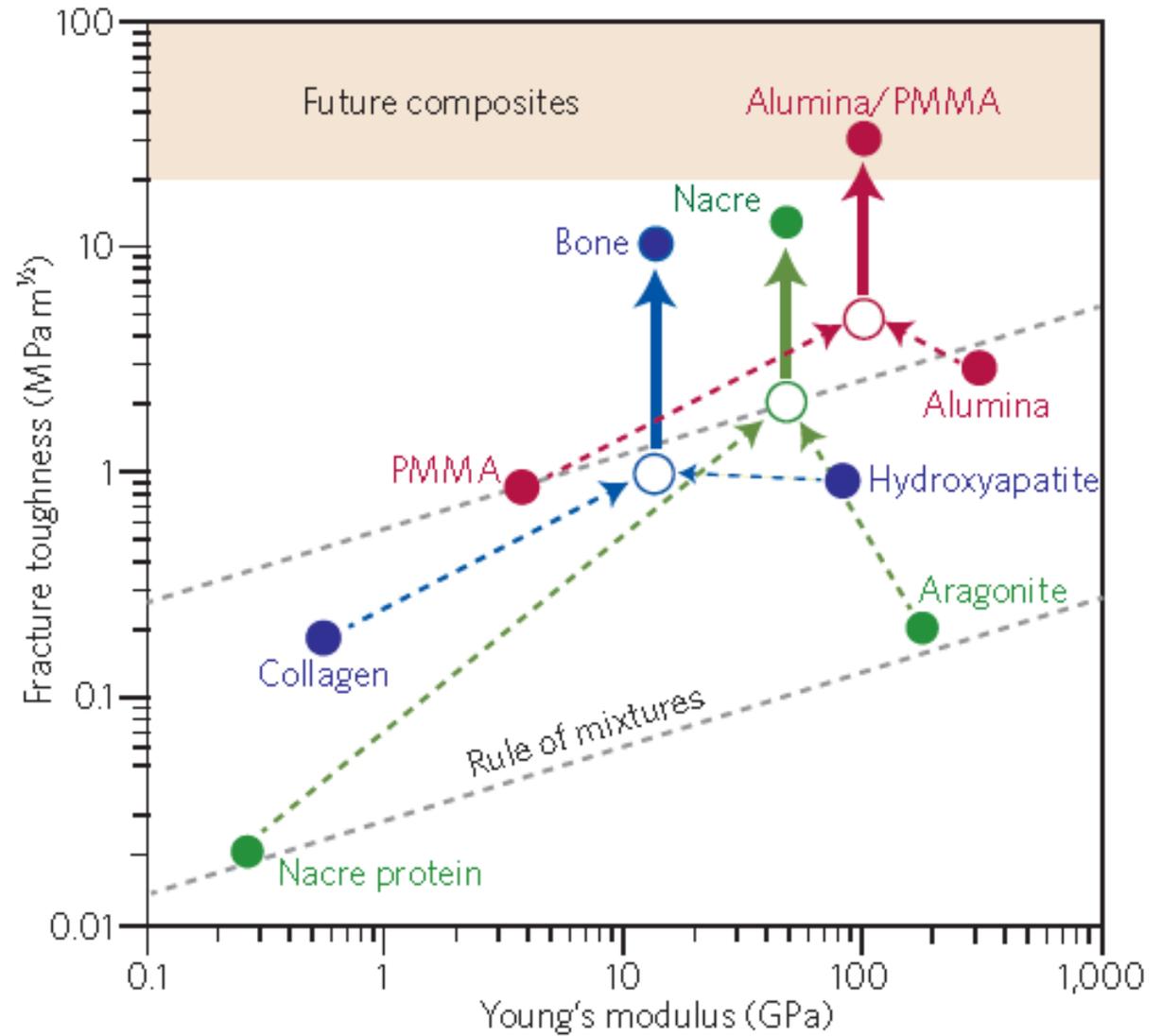


Organic layer acting as viscoelastic glue



Tablet interlocking during sliding





projections for natural and synthetic materials.

...finalizando : **Classificação dos Materiais**

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
 - descrever as propriedades gerais das três categorias nas quais os materiais foram classificados a partir das suas ligações químicas – materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos – mencionando as principais diferenças que existem entre eles.
 - definir o que são materiais compósitos.
 - definir, em linhas gerais, o que são “materiais avançados”, dando alguns exemplos.
 - compreender que existe mais de uma classificação possível para os materiais, sendo capaz de buscar entender qual é o critério que está na base de cada sistema de classificação.

Referências

- **Callister, W.D.** Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley. 2007. Cap.2 .
 - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade.
- **Shackelford, J.F.** Ciência dos Materiais. 6^a Ed. Pearson. 2008. Cap. 1 .
- **Askeland, D.R.; Phulé, P.P.** Ciência e Engenharia dos Materiais. Cengage Learning. 2008. Cap. 1.
- **Padilha, A.F.** – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo. 1997. Cap.1 .
- **Ashby, M.F.** Materials Selection in Mechanical Design. 3rd Ed. Elsevier. 2005. Cap.1 .