

# PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2016

## **Aula 13 – Materiais de Engenharia**

Professores: Carlos Alberto Fortulan  
João M. de A. Rollo  
Benedito de Moraes Purquerio



- Existe apenas cerca de 100 tipos de átomos conhecidos em todo o universo, porém por volta de 200.000 tipos de materiais disponíveis.
- Desafio na substituição dos materiais.
- Devem os materiais serem mais leves que o aço, mas estruturalmente equivalente.



## Classificação Periódica dos Elementos Químicos

<http://www.chemkeys.com>

1	1											18						
1	1											2						
	H											He						
	1,0079											4,0026						
2	3	4											10					
	Li	Be											Ne					
	6,941(2)	9,0122											20,180					
3	11	12											18					
	Na	Mg											Ar					
	22,990	24,305											39,948					
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	39,098	40,078(4)	44,956	47,867	50,942	51,996	54,938	55,845(2)	58,933	58,693	63,546(3)	65,41	69,723	72,64(1)	74,922	78,96(3)	79,904	83,80
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	85,468	87,62	88,906	91,224(2)	92,906	95,94	98,906*	101,07(2)	102,91	106,42	107,87	112,41	114,82	118,71	121,76	127,60(3)	126,90	131,29
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	132,91	137,33		178,49(2)	180,95	183,84	186,21	190,23(3)	192,22	195,08(3)	196,97	200,59	204,38	207,2	208,98	209,98*	209,99*	222,02*
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112						
	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
	223,02*	226,03*		261*	262*	266*	264*	277*	268*	271*	272*							

### LANTANÍDIOS

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
138,91	140,12	140,91	144,24(3)	146,92*	150,36(3)	151,96	157,25(3)	158,93	162,50	164,93	167,26	168,93	173,04(3)	174,97

### ACTINÍDIOS

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
227,03*	232,04*	231,04*	238,03*	237,05*	239,05*	241,06*	244,06*	249,08*	252,08*	252,08*	257,10*	258,10*	259,10*	262,11

Número atômico → 25  
 Nome → **Mn** → Símbolo  
 MANGANÊS → 54,938

Massa atômica relativa. A incerteza no último dígito é 1, exceto quando indicado entre parênteses. Os valores com \* referem-se ao isótopo mais estável.



Quando um material pode ser considerado estrutural ?

$$\sigma_e (\sigma_y) \sim 340\text{MPa}$$

?

Alta resistência



Baixa resistência



# O que fazer para um material se tornar estrutural?

Microestrutura?

Macroestrutura?

Forças de ligação?



## Lembrar as Expressões

$$M = \frac{\rho}{\sqrt{\sigma_y}}, \quad \text{Rigidez} = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \cdot \Phi$$

$M \rightarrow$  Massa a substituir;

$\rho \rightarrow$  Densidade;

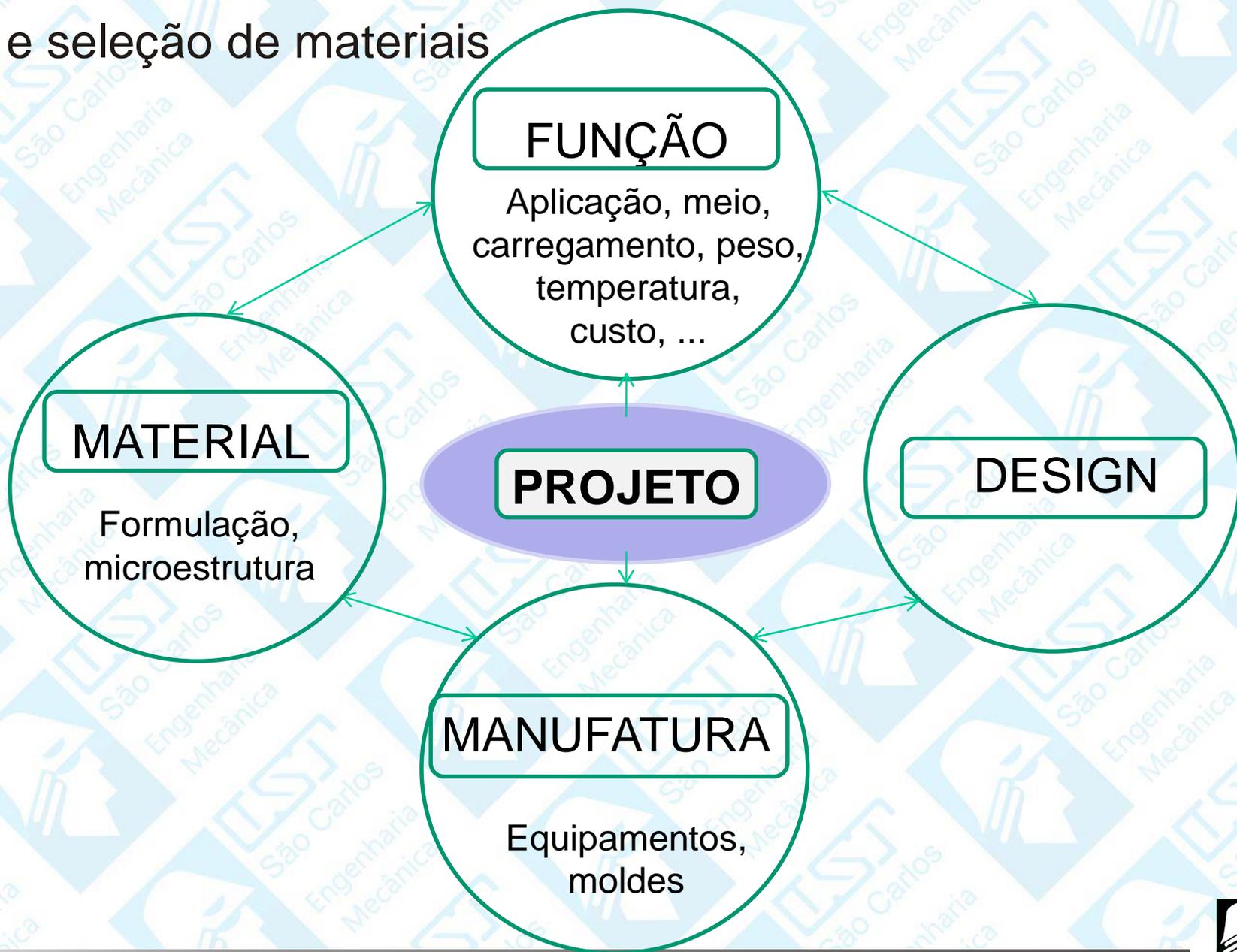
$E \rightarrow$  Módulo de elasticidade;

$\sigma_y \rightarrow$  Tensão de escoamento;

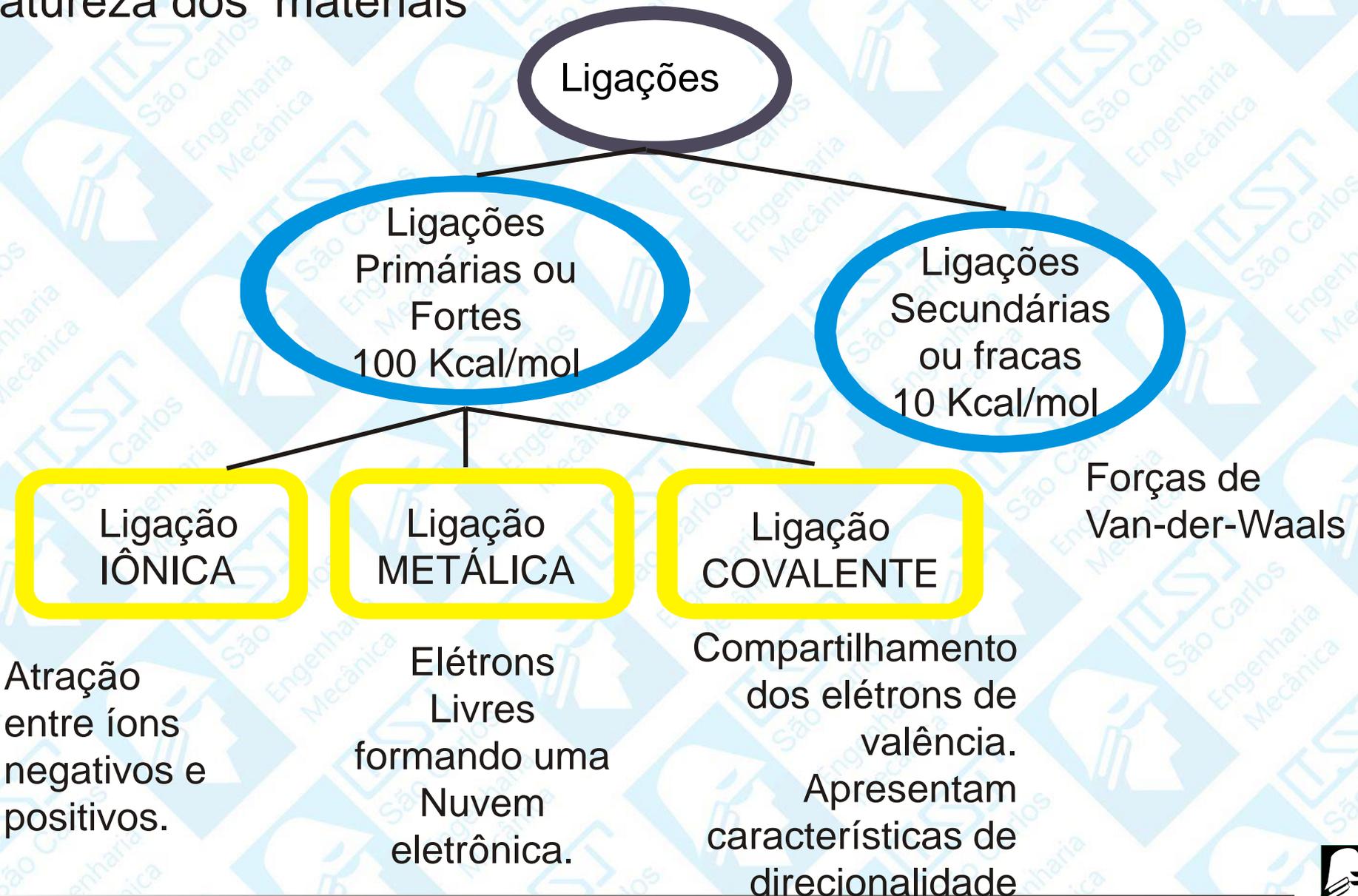
$\Phi \rightarrow$  Fator de forma.



# Projeto e seleção de materiais



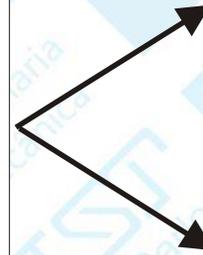
# Natureza dos materiais



# Arranjos atômicos

## Estruturas Cristalinas

Se caracterizam pela formação dos cristais, isto é, arranjos ordenados e simétricos dos átomos no espaço.



**Monocristais**

**Policristais**

## Estruturas Amorfas ou Vítreas

Arranjos desordenados e assimétricos dos átomos, similares à estrutura no estado líquido, embora mais compacta.

## Estruturas Moleculares ou Poliméricas

Estrutura típica dos materiais macromoleculares, formado por longas moléculas orgânicas.



De modo geral os Materiais .....

## **METÁLICOS**

São tenazes, resistentes, pesados e, de modo geral, insuficientemente rígidos

## **POLÍMEROS**

São leves, de fácil processamento, mas não são resistentes nem estáveis com a temperatura.

## **CERÂMICAS**

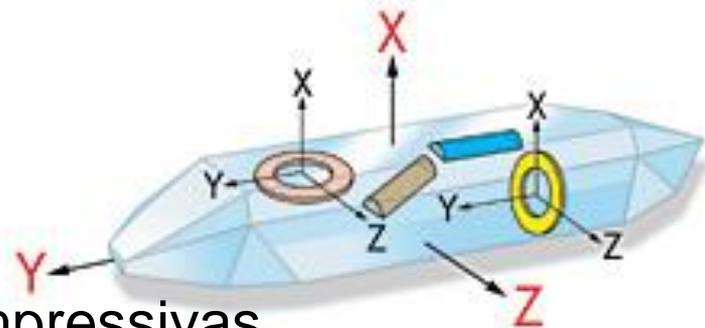
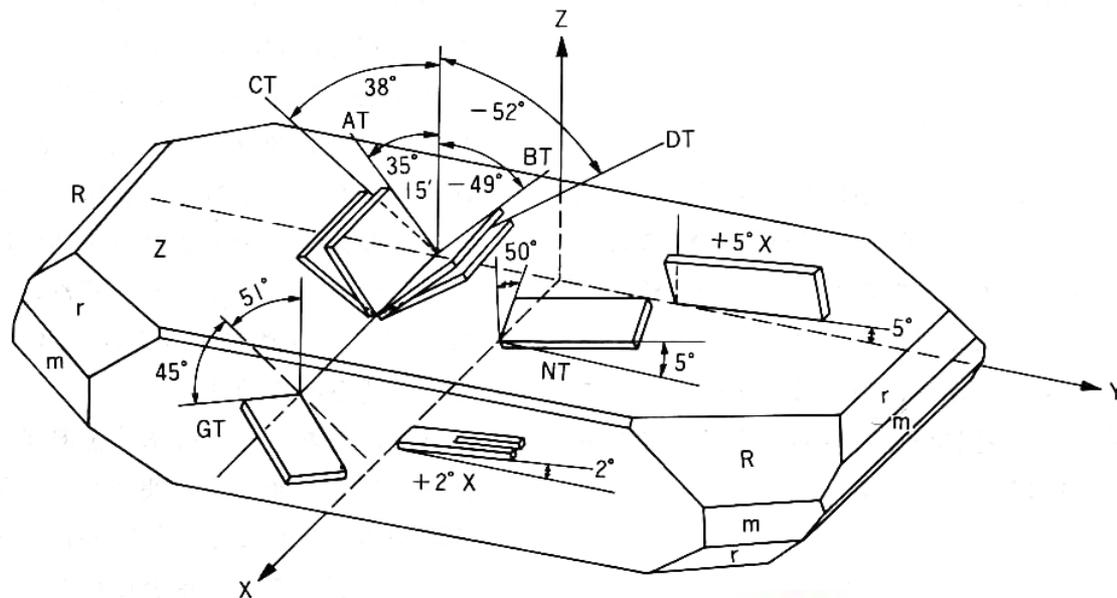
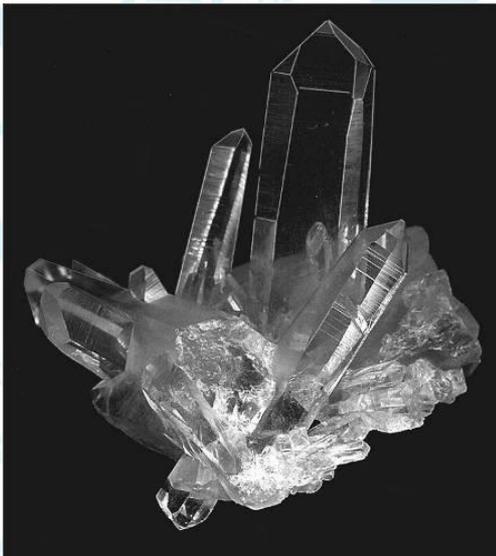
Incluindo os vidros são duros, rígidos mas também frágeis

## **COMPÓSITOS**

São materiais que consistem de pelo menos, dois componentes: a matriz e o agente de reforço. O principal objetivo é o de melhorar determinadas propriedades da matriz com características complementares.



# Monocristais



Longitudinal efeito  $\rightarrow$  sensíveis à forças compressivas

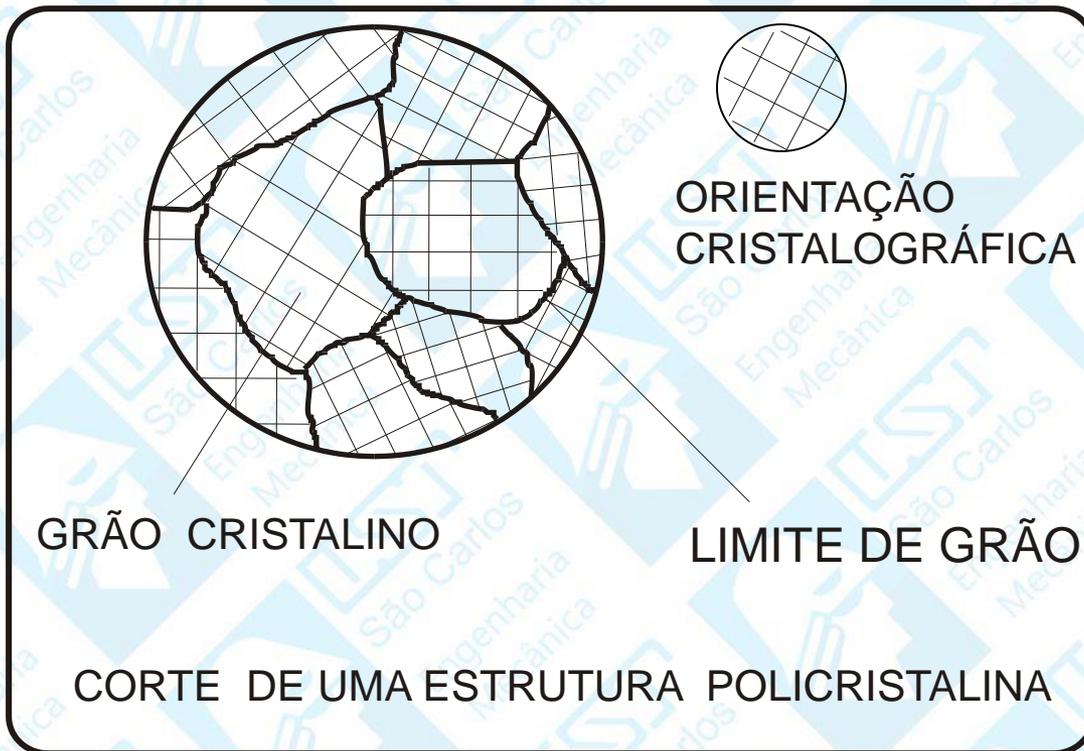
- force, pressão, deformação e aceleração;

Transversal efeito (B)  $\rightarrow$  grande carga com a deformação – piezelétricos (sensores de pressão);

Inclinados efeito (C) – acelerômetros e sensores de força nas 3 componentes.

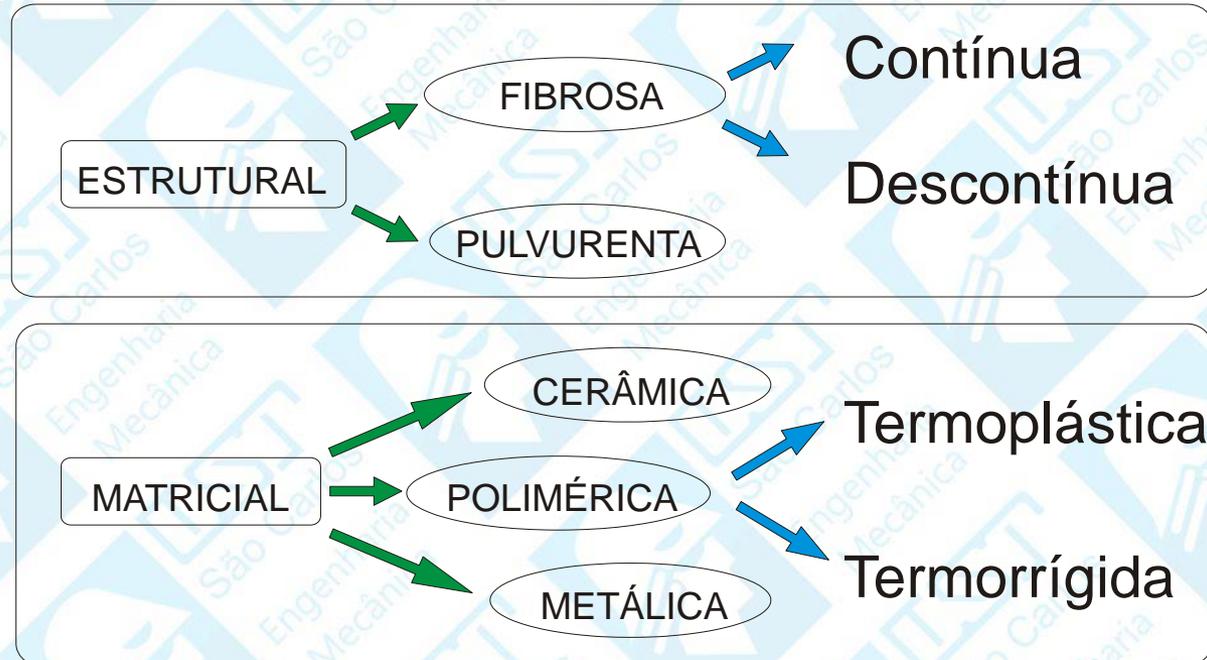


# Estruturas Policristalinas

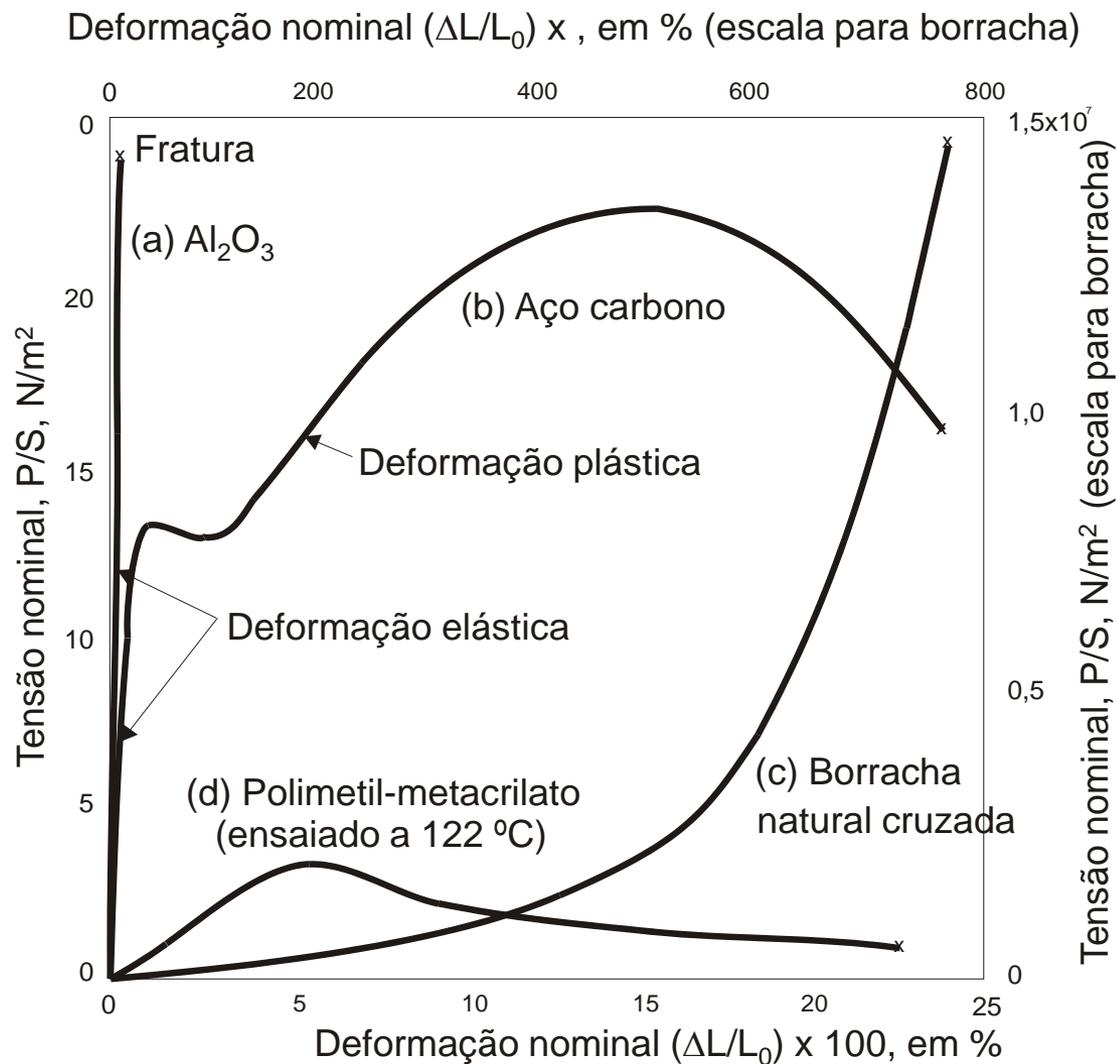


# Compósitos

Constituem de uma classe de materiais heterogêneos multifásicos. Neles um dos componentes descontínuos, fornece a principal resistência ao esforço (**componente estrutural**), e o outro contínuo é o meio de transferência deste esforço (**componente matricial**).



# Propriedades Mecânicas



*CERÂMICAS*

# Cerâmicas sujeitas ao desgaste

Pistões e camisas:

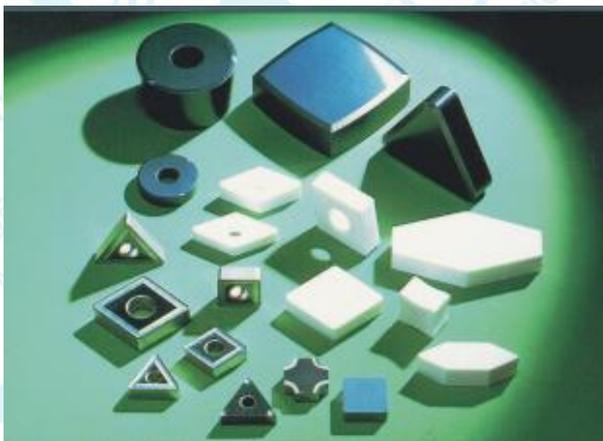


FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

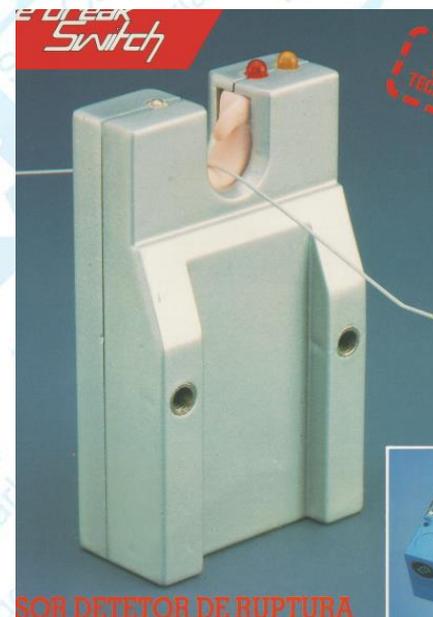


# Cerâmicas sujeitas ao desgaste

## Ferramentas de usinagem



## Guia fios



# Cerâmicas que requer dureza



# Cerâmicas: desgaste e ataque químico

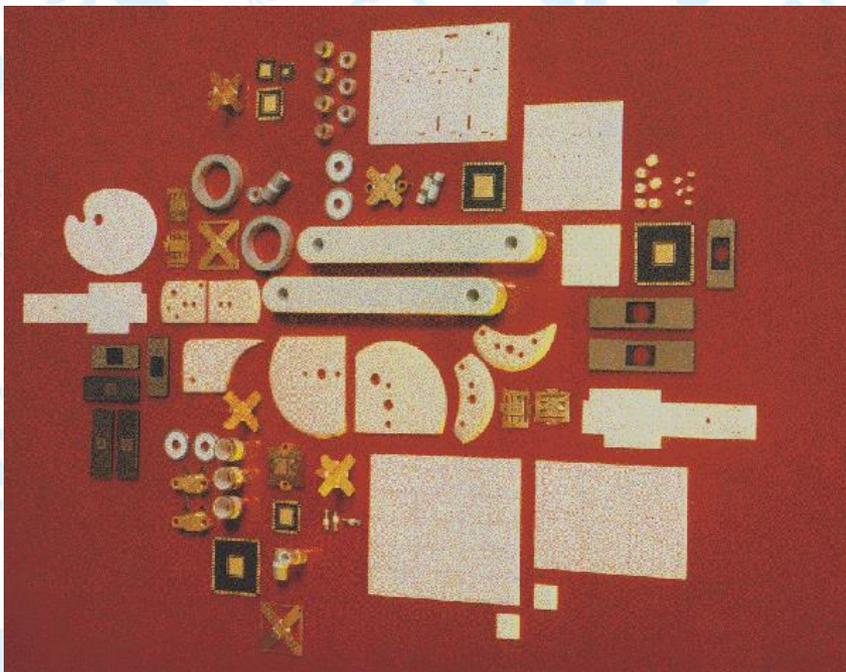
Válvulas e selos mecânicos:



FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

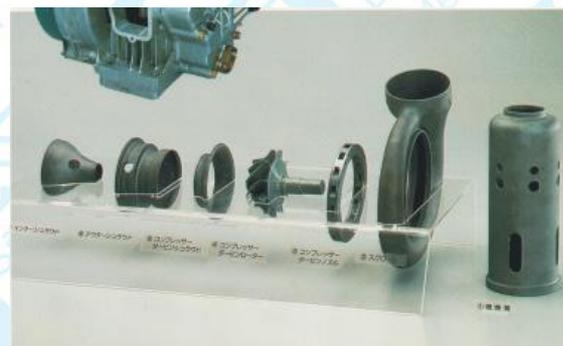


# Cerâmicas para uso eletro - eletrônico



# Cerâmicas para uso automobilístico

Em motores:



NTK



# Cerâmicas - componentes

Mancais:



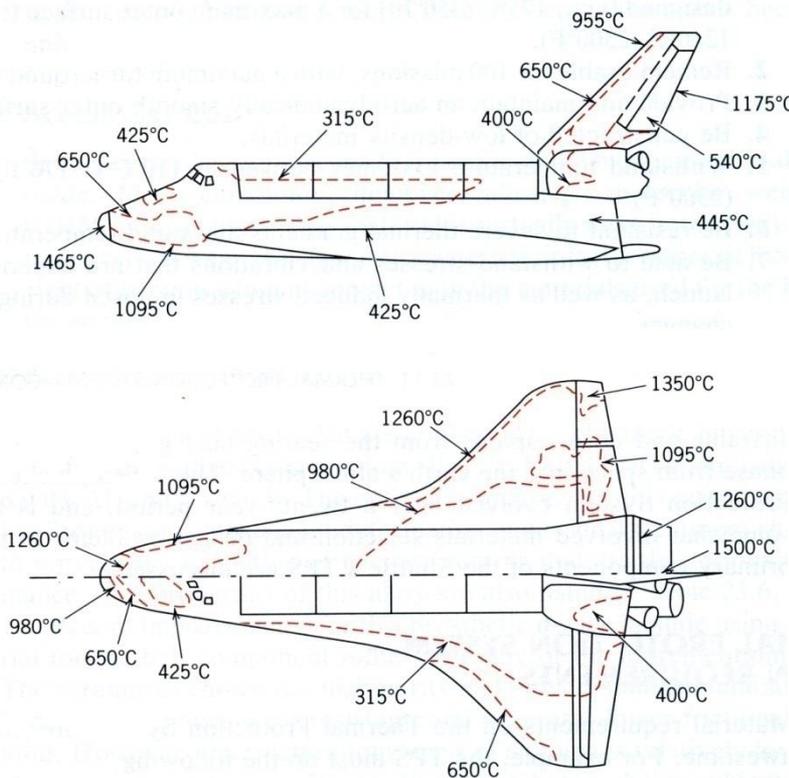
Componentes de bombas:



FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT



# Produtos para alta temperatura



Fonte: Wesgo Div., GTE.



# Componentes de grafite



Fonte: Poco Graphite, Inc., a Unocal Co.



exercício



# *POLÍMEROS*

# Polímeros - classificação

## PLÁSTICO DE ENGENHARIA

Polímeros de aplicação em engenharia que substituem os materiais convencionais

Polímeros que podem ser reversivelmente aquecidos e resfriados, passando respectivamente de massas fundidas a sólidas

## TERMOPLÁSTICO

## TERMORRÍGIDO

Polímeros que quando aquecidos formam ligações químicas cruzadas irreversíveis.

Inclui toda a gama de materiais elásticos (borrachas). Podem em temp. ambiente serem alongados em pelo menos 2 vezes.

## ELASTÔMERO

## BORRACHA

São polímeros que foram vulcanizados para introduzir ligações cruzadas

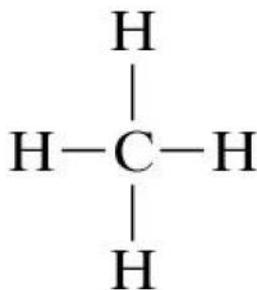
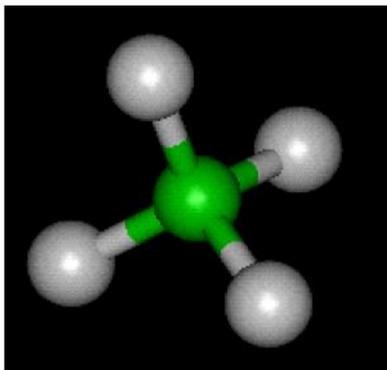
Mistura física de dois ou mais polímeros termoplásticos, sem qualquer reação química

## BLENDA

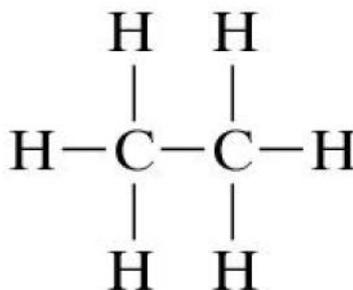
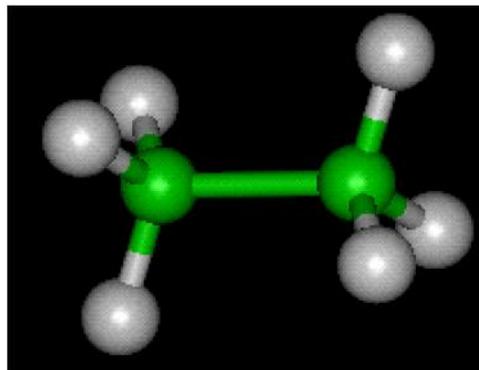


# Polímeros – estrutura

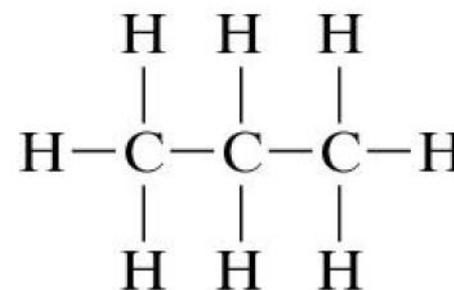
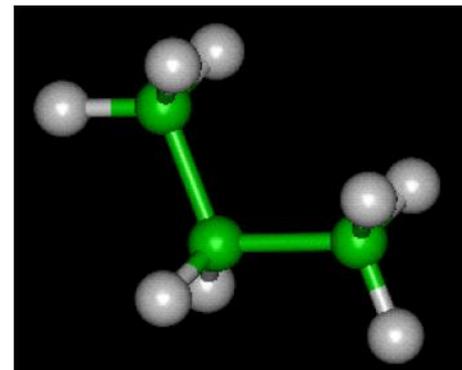
Muitos dos polímeros são orgânicos e formados por moléculas de hidrocarbonetos. Cada átomo de C tem quatro terminais que participa nas ligações, cada átomo de H tem um terminal.



**Methane, CH<sub>4</sub>**



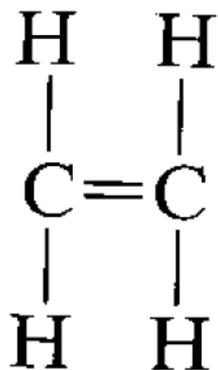
**Ethane, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>**



**Propane, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>**



Ligações duplas ou triplas podem existir entre os átomos de C (compartilhando de dois ou três pares de elétrons). Estas ligações são chamadas de ligações **insaturadas**. Moléculas insaturadas são mais reativas.



**Ethylene,  $\text{C}_2\text{H}_4$**



**Acetylene,  $\text{C}_2\text{H}_2$**



# Química das moléculas poliméricas

- ✓ Etileno ( $C_2H_4$ ) é um gás a temperatura e pressão ambiente;
- ✓ O etileno se transforma em polietileno (sólido) pela formação ativa do mero através da reação com iniciador ou radical catalisador (R.)
- ✓ (.) denota elétron livre (posição ativa)



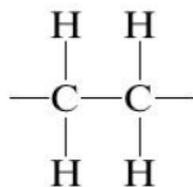
## Química das moléculas poliméricas

Quando todos os meros são idênticos, a molécula é chamada de homopolímeros

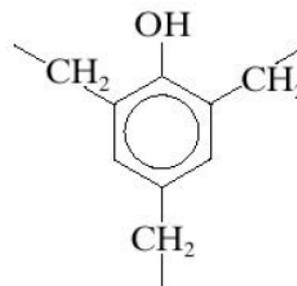
Quando há mais que um tipo de mero presente a molécula é chamada de copolímeros.

Meros que tem 2 terminais ativos são chamados de bifuncionais.

Meros com 3 terminais ativos são trifuncionais. Eles formam uma estrutura tridimensional.

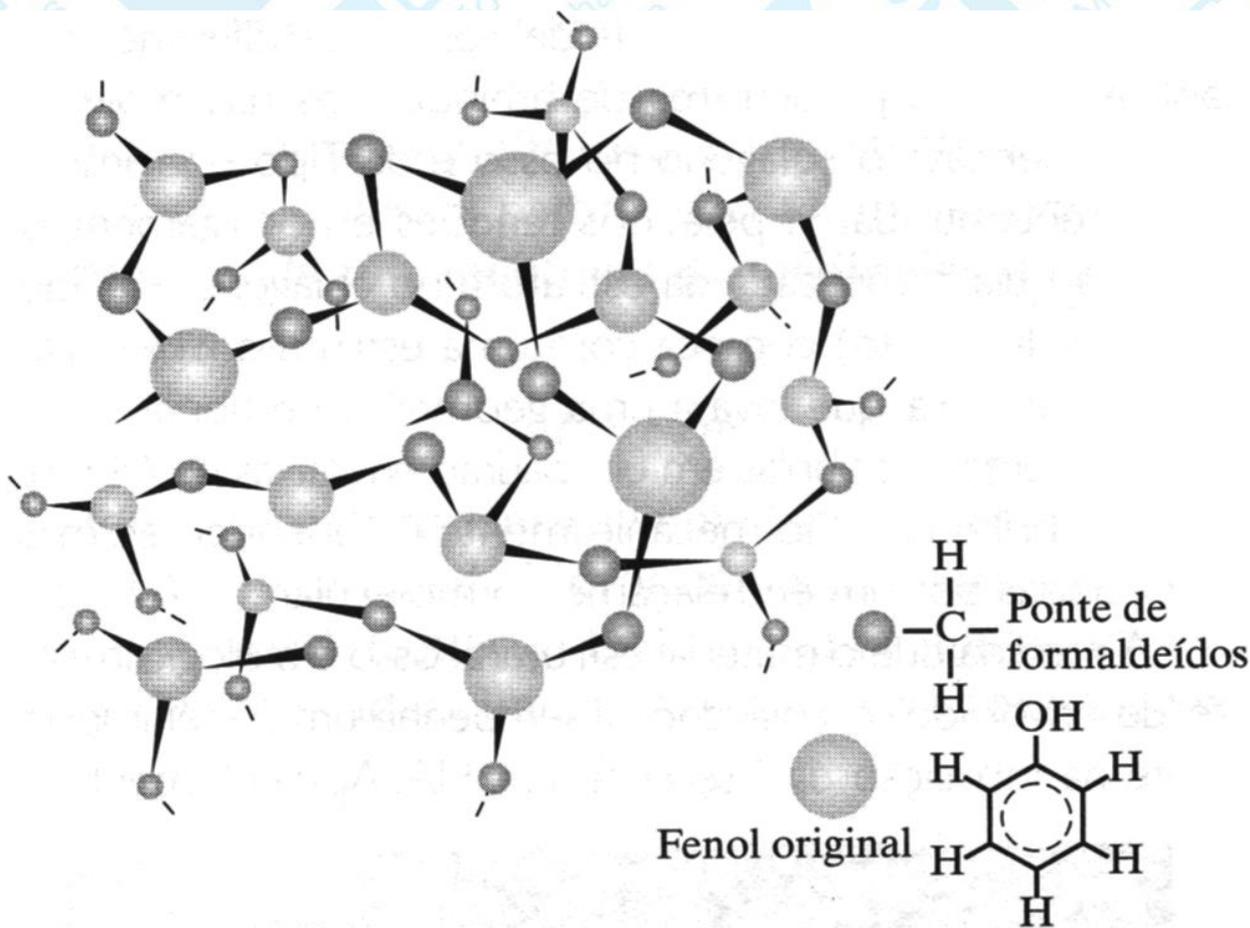


Polyethylene  
(bifunctional)



Phenol-formaldehyde  
(trifunctional)





# Peso molecular

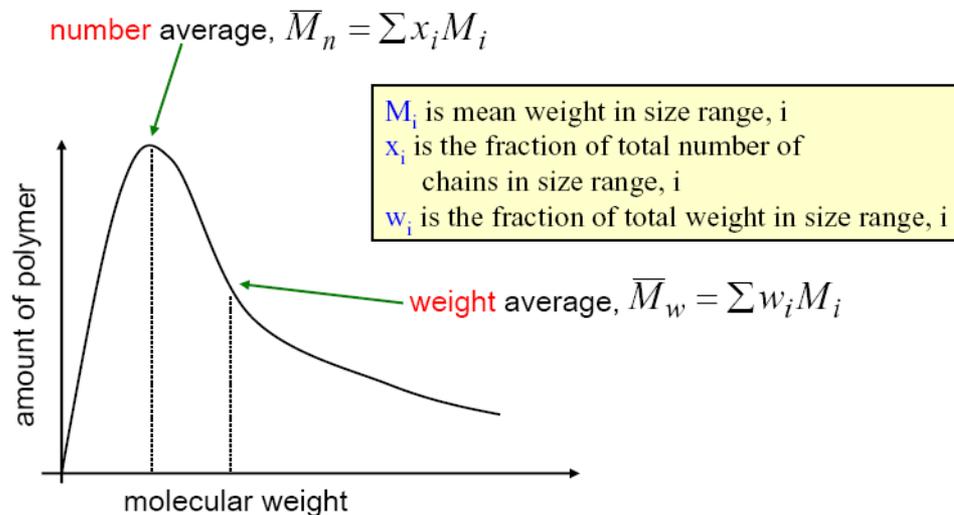
- ✓ Peso molecular (g/mol) (comprimento da cadeia), representa o número de unidades de massa atômica para uma determinada molécula;
- ✓ é controlado pelas taxas de iniciação, propagação e terminação das etapas de polimerização;
- ✓ Há uma distribuição de pesos moleculares resultante da polimerização;
- ✓ O peso molecular médio (pelo número médio ou pelo peso médio)

number-average:

$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i$$

weight-average:

$$\bar{M}_w = \sum w_i M_i$$



## Peso molecular x propriedades físicas

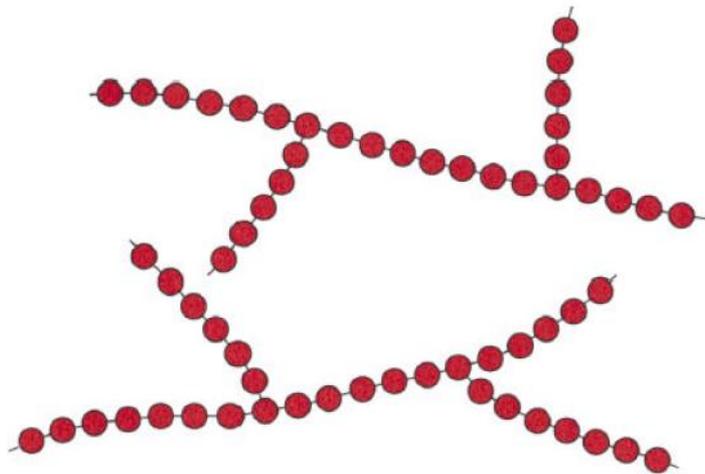
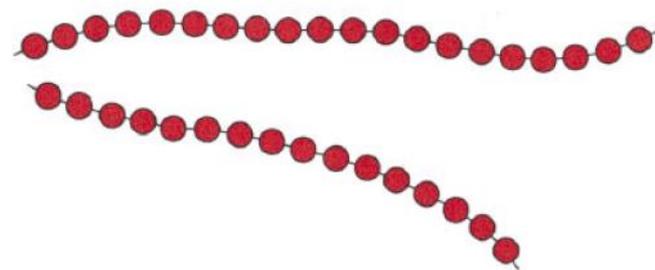
- ✓ A temperatura de fusão/amolecimento aumenta com o peso molecular (até 100.000 g/mol);
- ✓ Estado físico em função do peso molar –  $T_{amb}$ .
  - líquidos ou gases → pequenas cadeias poliméricas (peso molar ~100 g/mol);
  - ceras sólidas → polímeros intermediários (~1000 g/mol);
  - sólidos → pesos moleculares de  $10^4 - 10^7$  g/mol



# Estrutura molecular

As características físicas de material polimérico dependem não somente do peso molecular e da forma, mas também de sua estrutura molecular:

**1 Polímeros lineares:** União de Van der Waals entre as cadeias. Exemplos: polietileno, nylon.



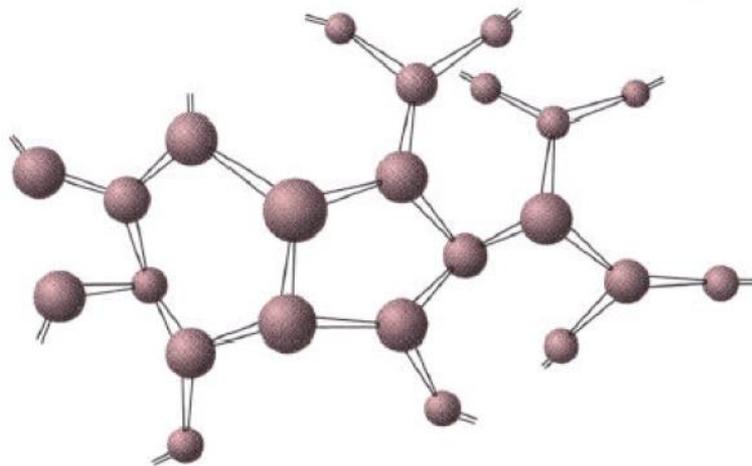
**2 Polímeros ramificados:** a eficiência de empacotamento é reduzida em comparação com os polímeros lineares - menor densidade.





## 4 Polímeros em rede: redes tridimensionais obtidos de meros trifuncionais.

Exemplos: epoxies, fenolformaldeído.





# Cristalinidade nos polímeros

- ✓ Os polímeros podem formar estruturas cristalinas, algumas partes das cadeias moleculares se alinham durante o resfriamento formando regiões cristalinas → cristalitos (esferulitos)

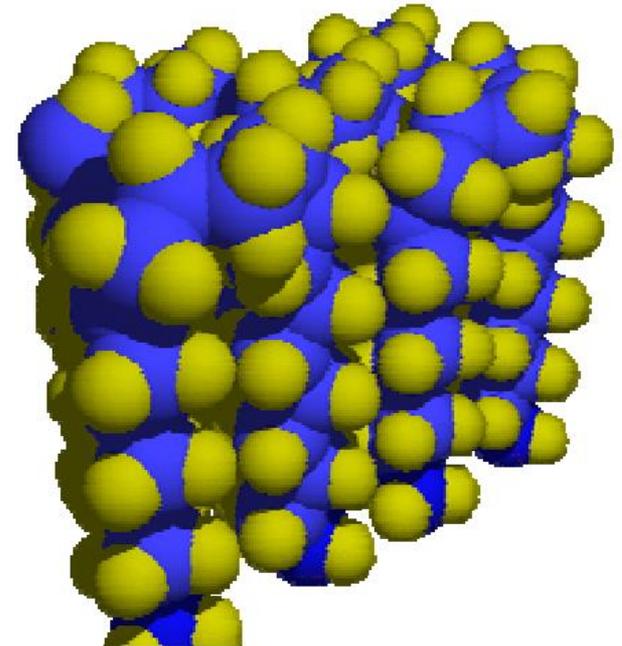
$$\% \text{ crystallinity} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100$$

Where:

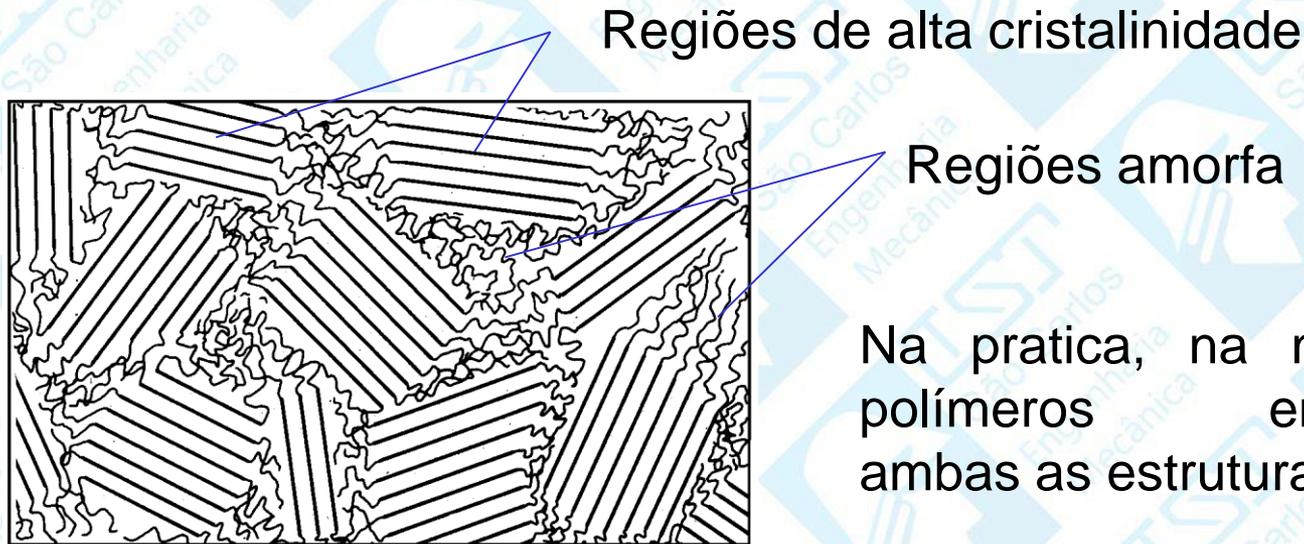
$\rho_s$  = Density of sample

$\rho_a$  = Density of the completely amorphous polymer

$\rho_c$  = Density of the completely crystalline polymer



# Cristalinidade nos polímeros



Na prática, na maioria dos polímeros encontram-se ambas as estruturas .

- taxa de resfriamento (resfriamento mais lento → maior cristalinidade);
- configuração da cadeia: cadeias lineares → maior cristalinidade; copolímeros → menor cristalinidade;
- grau de cristalinidade: faixa de 5 - 95%

*Maior % Cristalinidade → maior resistência mecânica*



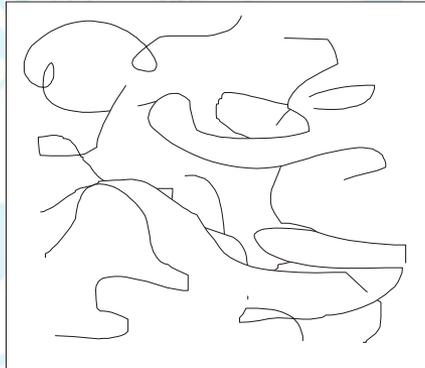
# Polipropileno



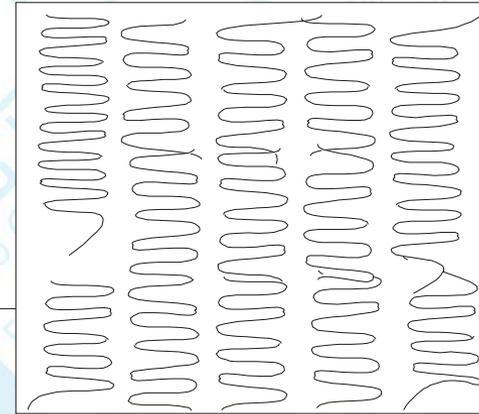
Polímero Cristalino

- ✓ Microscopia ótica;
- ✓ O filme polimérico foi cristalizado à partir de um filme amorfo;
- ✓ Cada cristal é visto radialmente à partir de um núcleo, até encontrar a fronteira com o cristal adjacente.

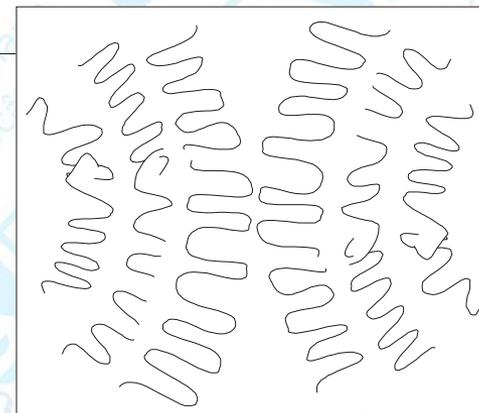




Polímero no estado fundido com cadeias emaranhadas



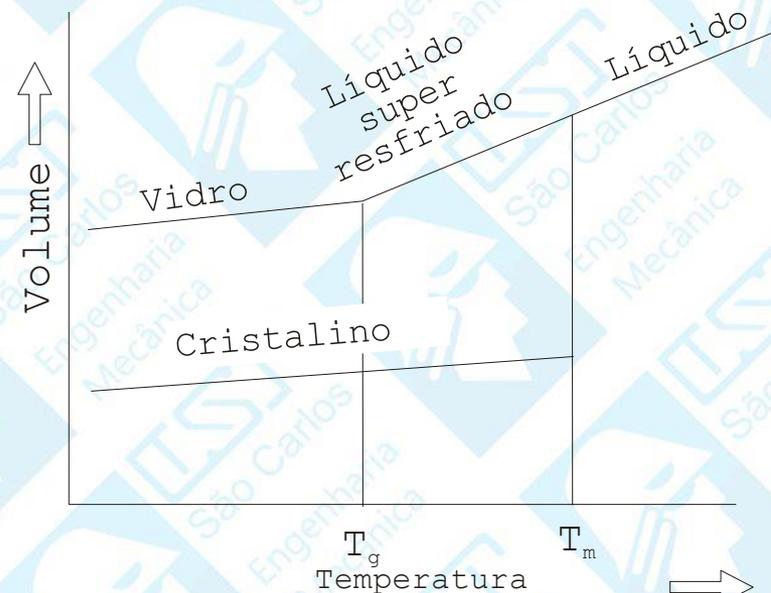
Polímero no estado sólido com cadeias parcialmente ordenadas; cristalitos lamelares



Polímeros no estado sólido com cadeias parcialmente ordenadas; cristalitos esferulitos



# Polímeros



## $T_m$ – Temperatura de fusão cristalina

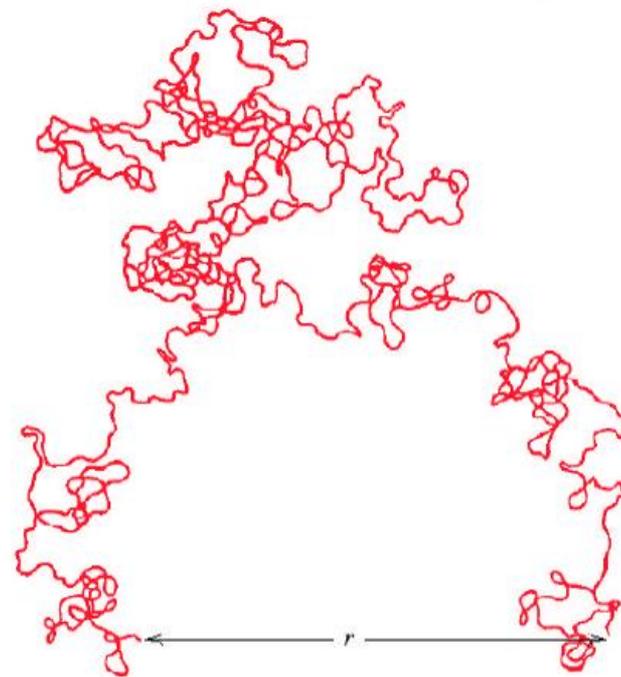
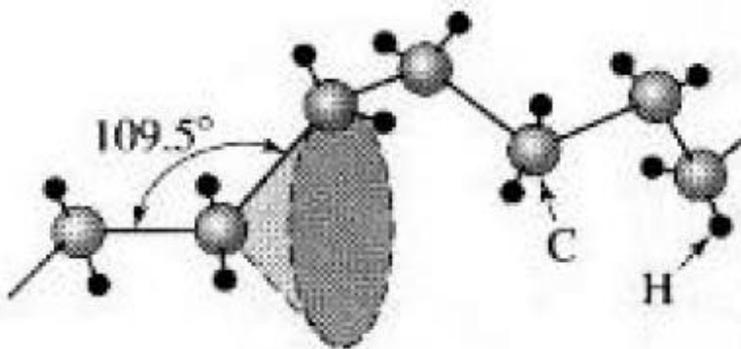
É aquela em que as regiões ordenadas dos polímeros, isto é, os cristalitos e esferulitos, se desagregam e fundem.

## $T_g$ - Temperatura de transição vítrea

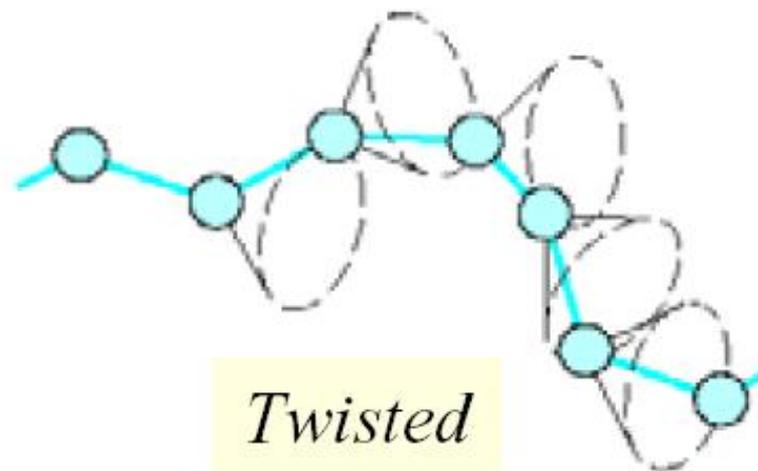
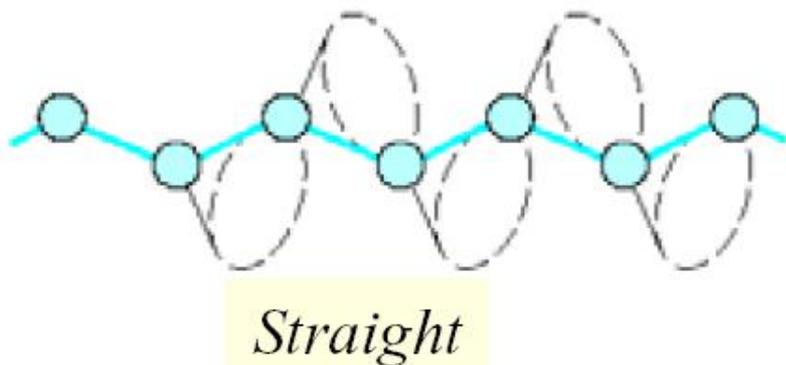
Está associada à região amorfa dos polímeros. A transição é de segunda ordem e representa a temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares, devido a rotação de grupos laterais em torno das ligações primárias, se torna restrita pela coesão intermolecular. Abaixo da  $T_g$  a mobilidade desaparece e o material se torna mais rígido.



Torções randômicas e espirais conduzem a um entrelaçamento que lembra a uma imagem de espaguete.



- ✓ Cadeias moleculares podem dobrar, enrolar e torcer;
- ✓ Cadeias vizinhas podem se entrelaçar e se emaranhar;
- ✓ As grandes extensões elásticas das borrachas correspondem ao desvendamento destas cadeias encaracoladas;
- ✓ Características mecânicas e térmicas dependem da habilidade dos segmentos da cadeia em girar.



# Propriedades mecânicas dos polímeros

- ✓ Módulo elástico muito menor que das cerâmicas e metais;
- ✓ A tensão de fratura pode ser maior ou menor que a tensão de escoamento

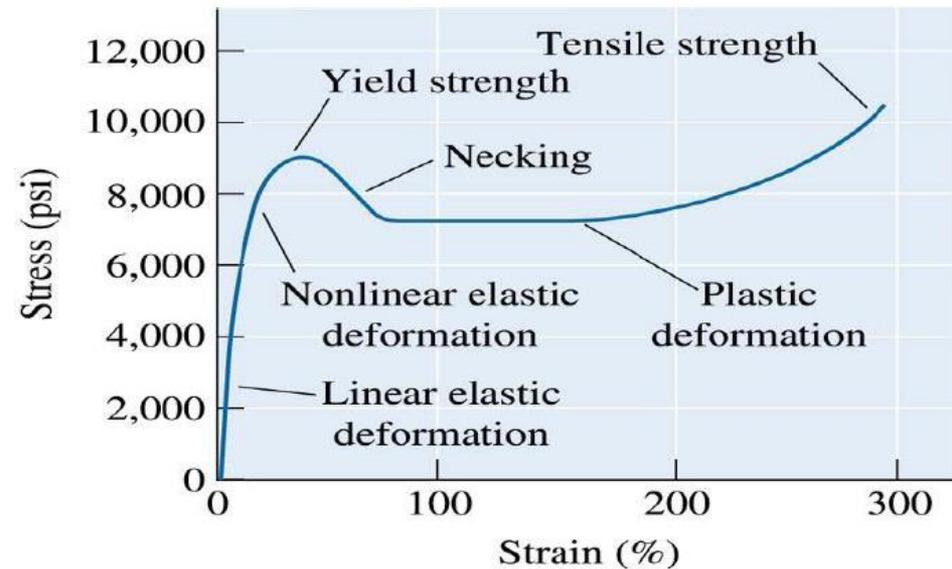
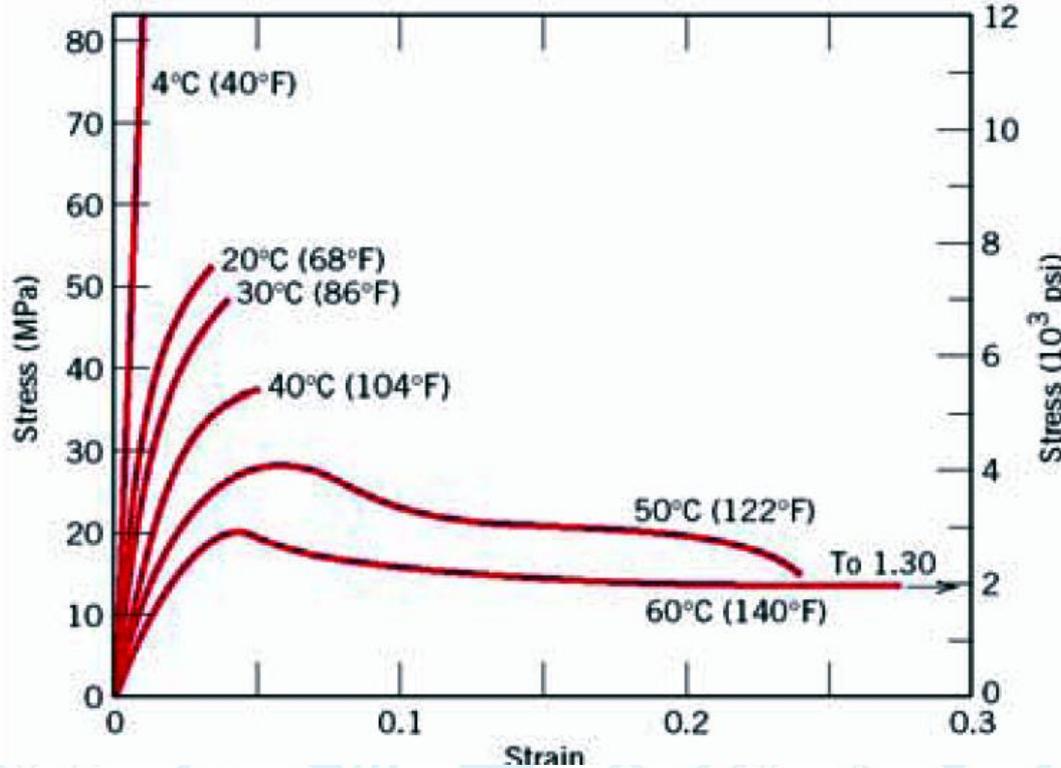


Figure 15.17 The stress-strain curve for 6,6-nylon, a typical thermoplastic polymer. (*The Science and Engineering of Materials* – by D.R. Askeland and P.P. Phule)

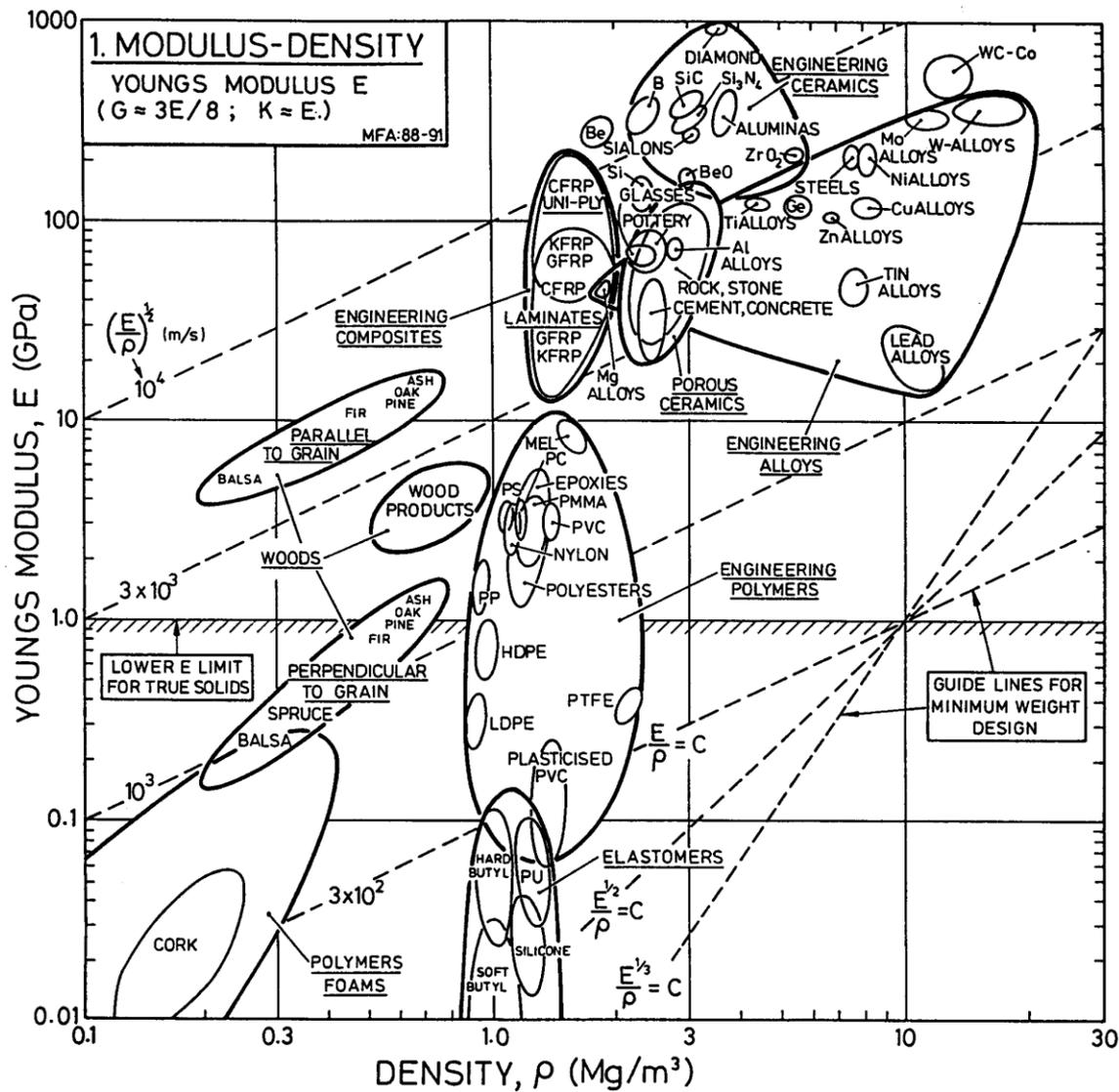


# Propriedades mecânicas dos polímeros x temperatura



Efeito da temperatura no comportamento mecânico do PMMA

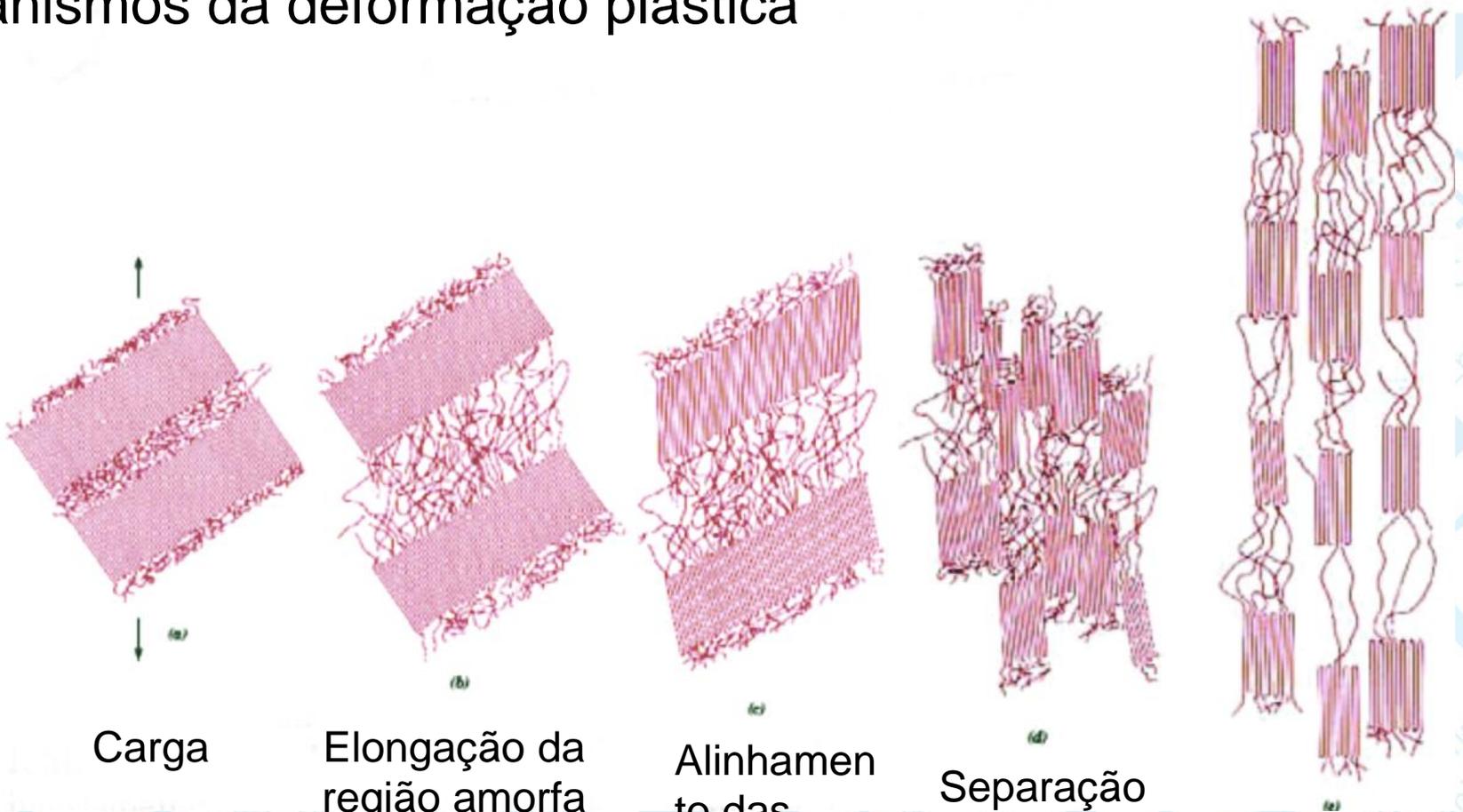




Fonte: ASHBY, M.F. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992



# Mecanismos da deformação plástica



Carga

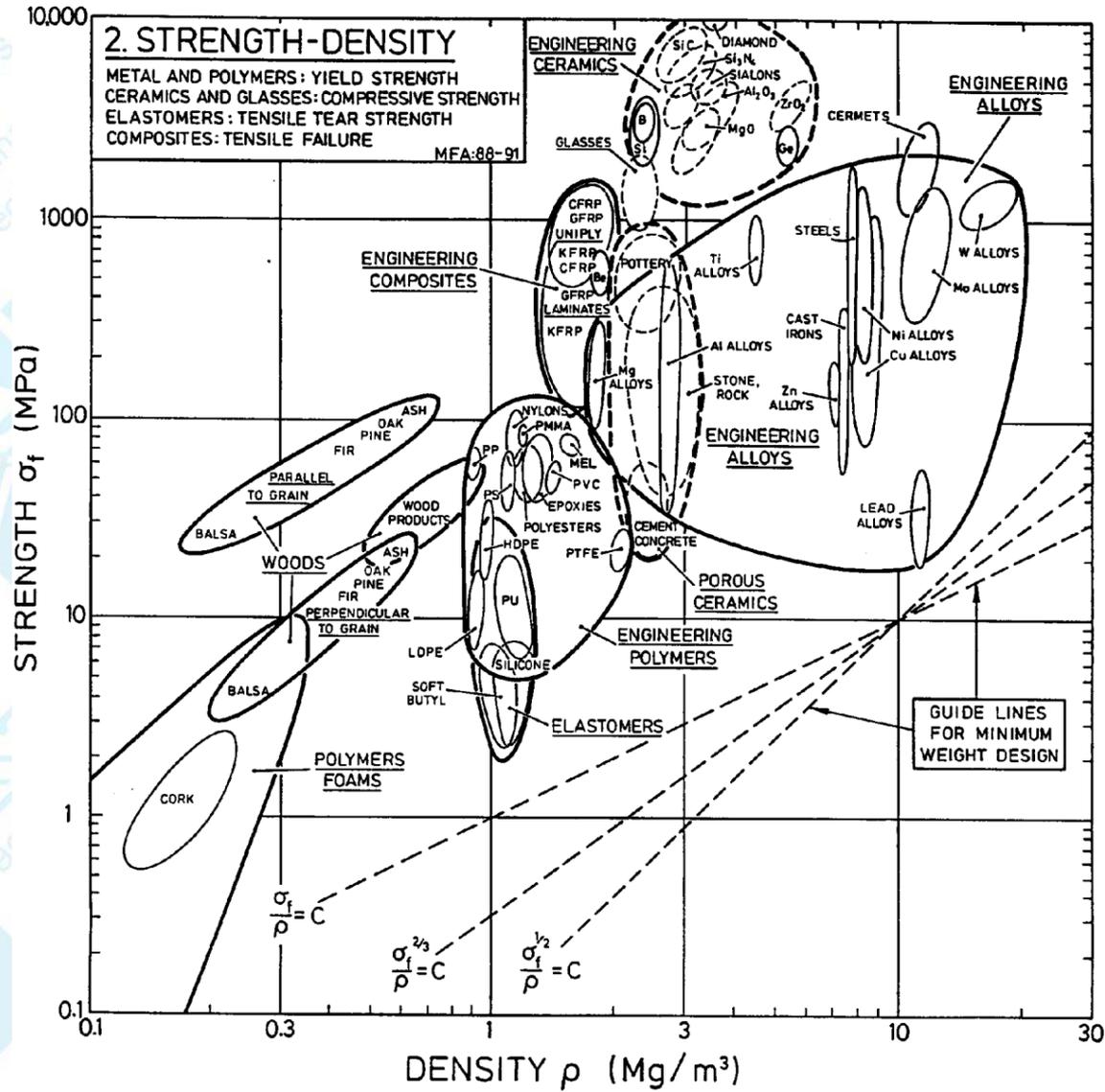
Elongação da região amorfa

Alinhamento das lamelas

Separação em segmentos cristalinos

Orientação dos segmentos e limite de elongação





Fonte: ASHBY, M.F. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992



Material	PM	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	T <sub>m</sub> °C	T <sub>g</sub> °C	Cristalinidade (%)
LDPE	200.000	0,94 – 0,97	130-135	-100 - -125	até 95%
UHMWPE	3.000.000 a 6.000.000	0,93 – 0,94	135	-100 a -125	45%
PP	80.000 a 500.000	0,9	165-175	4 a 12	60-70
PMMA	500.000 a 1.000.000	1,18	160	105	Muito baixa
PC	10.000 a 30.000	1,20	268	150	Muito baixa
PET	15.000 a 42.000	1,33 – 1,45	250-270	70-74	Até 40%



Polímero	$E^a$ [MPa (ksi)]	$E^b_{flex}$ [MPa (ksi)]	LRT [MPa (ksi)]	Alongamento percentual na fratura	Coefficiente de Poisson $\nu$
<b>Polímeros de uso geral</b>					
Polietileno					
Alta densidade	830 (120)		28 (4,0)	15–100	
Baixa densidade	170 (25)		14 (2,0)	90–800	
Policloreto de vinila	2.800 (400)		41 (6,0)	2–30	
Polipropileno	1.400 (200)		34 (5,0)	10–700	
Poliestireno	3.100 (450)		48 (7,0)	1–2	
Poliésteres	—(—)	8.960 (1.230)	158 (22,9)	2,7	
Acrílico (Lucite)	2.900 (420)		55 (8,0)	5,0	
Poliamidas (náilon 66)	2.800 (410)	2.830 (410)	82,7 (12,0)	60	0,41
Celuloses	3.400–28.000 (500–4.000)		14–55 (2–8)	5–40	
<b>Polímeros de engenharia</b>					
Acrilonitrila-butadieno-estireno	2.100 (300)		28–48 (4–7)	20–80	
Policarbonatos	2.400 (350)		62 (9)	110	
Acetais	3.100 (450)	2.830 (410)	69 (10)	50	0,35
Politetrafluoretileno (Teflon)	410 (60)		17 (2,5)	100–350	
<b>Elastômeros termoplásticos</b>					
Tipo poliéster		585 (85)	46 (6,7)	400	



Polímero	$E^a$ [MPa (ksi)]	$E_{Din}^b$ [MPa (ksi)]	LRT [MPa (ksi)]	Alongamento percentual na fratura
<b>Termofixos</b>				
Fenólicos (fenol-formaldeído)	6.900 (1.000)	—	52 (7,5)	0
Uretanos	—	—	34 (5)	—
Uréia-melamina	10.000 (1.500)	—	48 (7)	0
Poliésteres	6.900 (1.000)	—	28 (4)	0
Epóxis	6.900 (1.000)	—	69 (10)	0
<b>Elastômeros</b>				
Copolímero polibutadieno/ poliestireno				
Vulcanizado	1,6 (0,23)	0,8 (0,12)	1,4–3,0 (0,20–0,44)	440–600
Vulcanizado com 33% de negro de fumo	3–6 (0,4–0,9)	8,7 (1,3)	17–28 (2,5–4,1)	400–600
Poliisopreno				
Vulcanizado	1,3 (0,19)	0,4 (0,06)	17–25 (2,5–3,6)	750–850
Vulcanizado com 33% de negro de fumo	3,0–8,0 (0,44–1,2)	6,2 (0,90)	25–35 (3,6–5,1)	550–650
Policloropreno				
Vulcanizado	1,6 (0,23)	0,7 (0,10)	25–38 (3,6–5,5)	800–1.000
Vulcanizado com 33% de negro de fumo	3–5 (0,4–0,7)	2,8 (0,41)	21–30 (3,0–4,4)	500–600
Copolímero poliisobuteno/ poliisopreno				
Vulcanizado	1,0 (0,15)	0,4 (0,06)	18–21 (2,6–3,0)	750–950
Vulcanizado com 33% de negro de fumo	3–4 (0,4–0,6)	3,6 (0,52)	18–21 (2,6–3,0)	650–850
Silicones	—	—	7 (1)	4.000
Fluoreto de vinilideno/ hexafluoropropileno	—	—	12,4 (1,8)	—



exercício



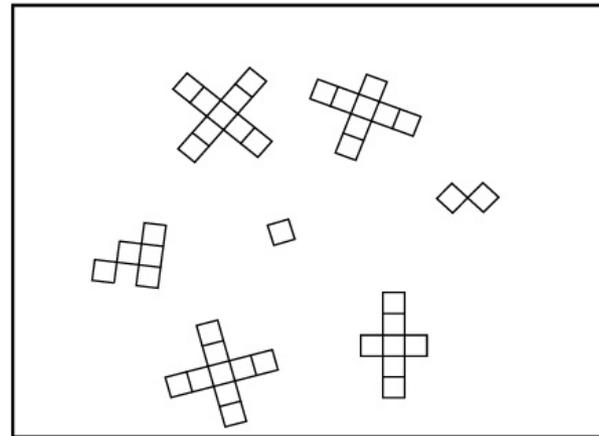
*METAIS*



# Solidificação

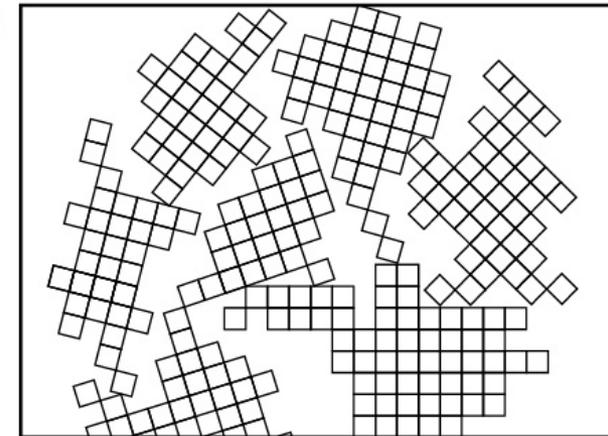
Ilustração esquemática dos estágios de nucleação durante a solidificação.

(a) Nucleação dos cristais.

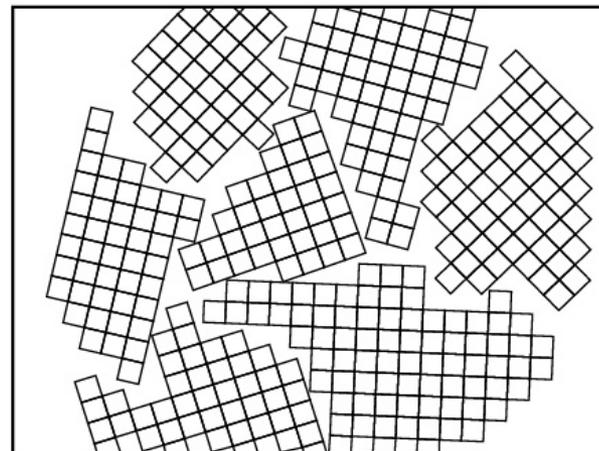


(b) e (c) Crescimento dos cristais como continuidade da solidificação.

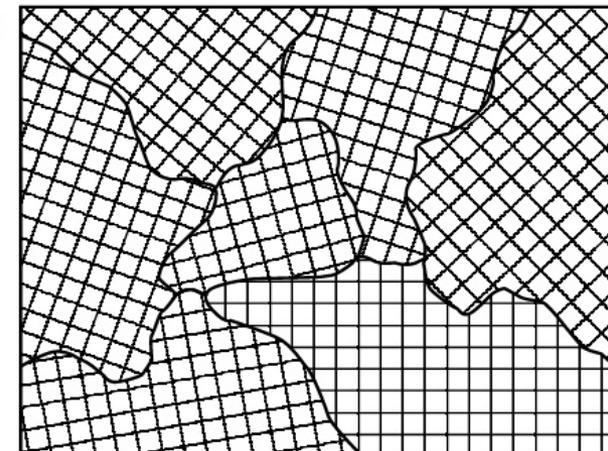
(b)



(c)



(d)



(d) Metal solidificado mostrando os grão individuais e os contornos de grãos. Note os diferentes ângulos em relação aos grãos vizinhos.

Source: W. Rosenhain



## Metais como materiais estruturais

- Metal Puro.
  - Baixa Resistência Significativa, observar como um metal comporta-se na zona elástica.
  - Misturar os Metais; Fazer ligas com critérios, obedecendo as regras de solubilidade sólida, raio atômico, estrutura cristalina, eletronegatividade e Valencia.
- Metais e Ligas
  - o binômio Resistência Mecânica e Ductilidade estão presentes.



# Aços

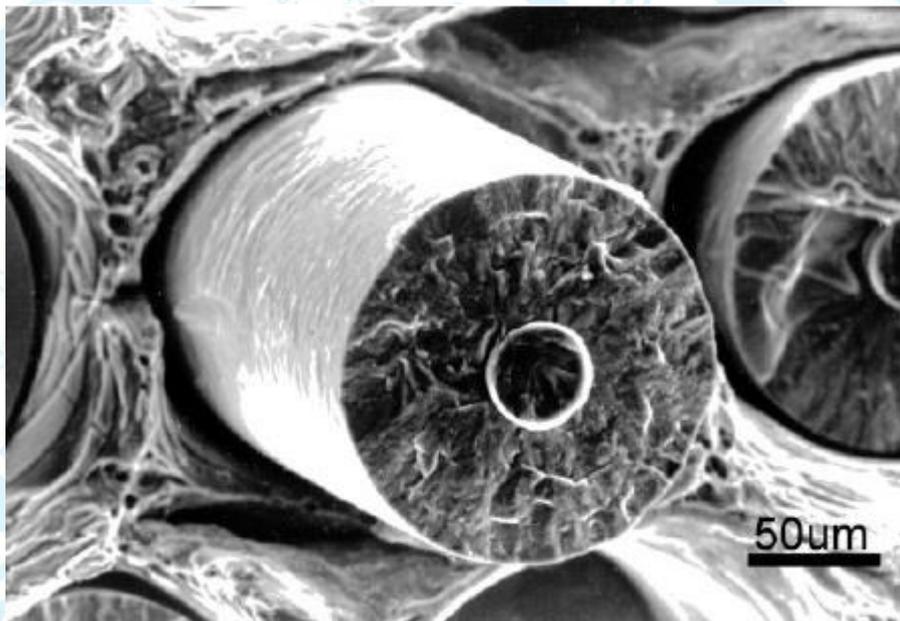
- Ligas a base de ferro ou ferrosas, presença do elemento carbono.
  - Aço carbono comum;
  - Aços ligas aços especiais;
  - No estado de equilíbrio, “Recozido”, uso de diagrama de equilíbrio entre as fases;
  - Fora de equilíbrio, “Temperado”, uso do diagrama temperatura, tempo e transformação
  - Procurar o binômio: Ductilidade e Resistência mecânica.



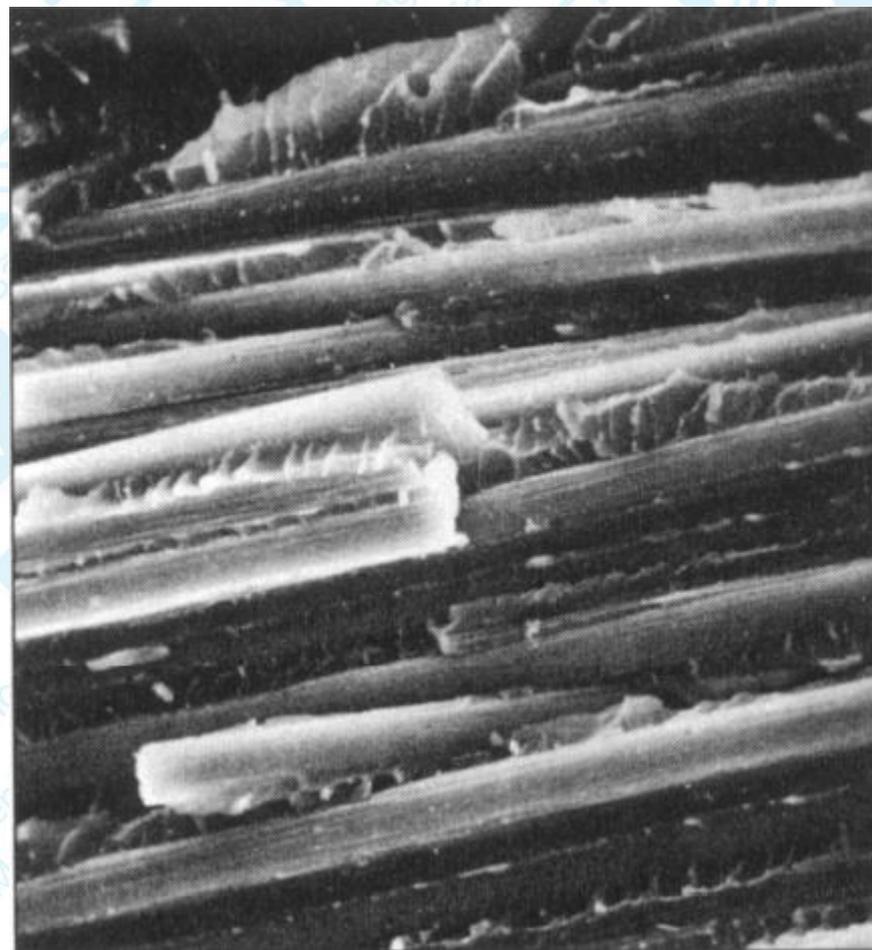
exercício



# *COMPÓSITOS*



Compósito de fibra polimérica



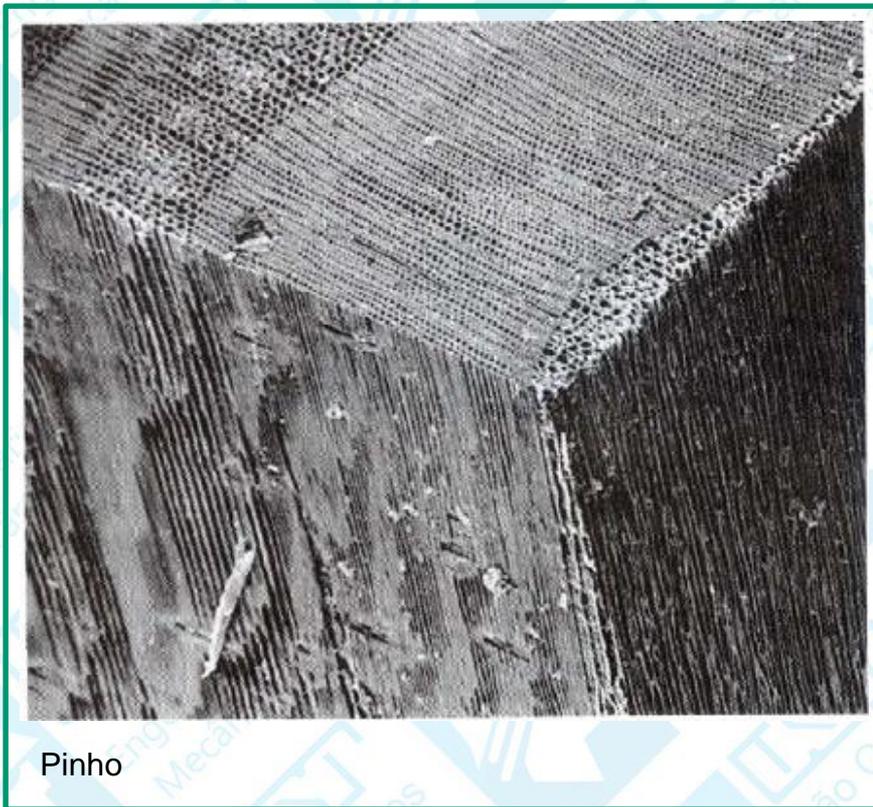
Compósito de matriz polimérica



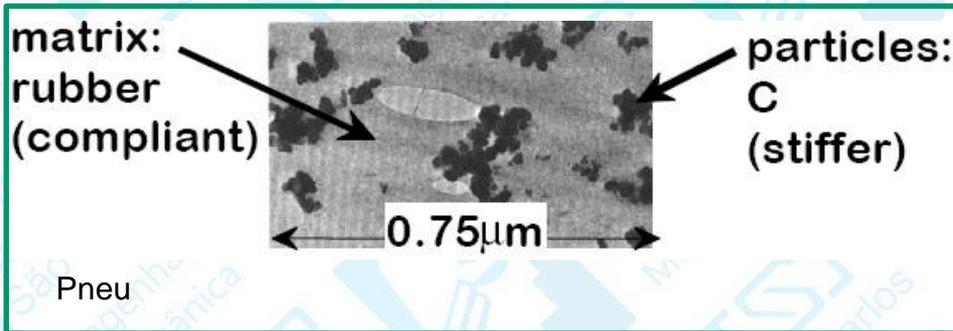
## Tipos e exemplos

- Pessoas (tecidos ósseos, ...)
- Árvores
- Matrizes reforçadas com fibras  
fibras de vidro-epoxi
- Matrizes reforçadas com particulados  
pneus (negro de fumo na borracha, mas também contém fibras  
contínuas (arame de aço ou cinta polimérica))

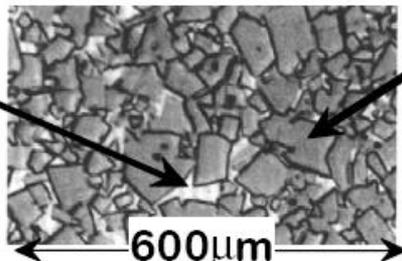




Pinho

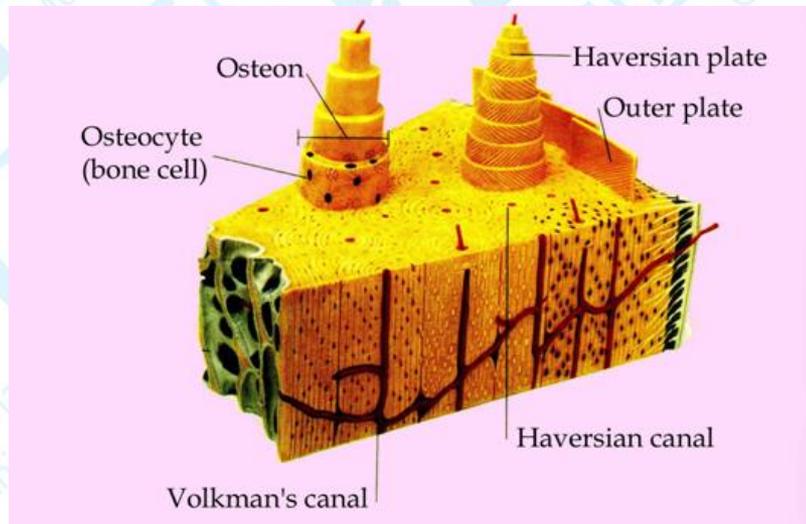


matrix: cobalt (ductile)  
Vm: 10-15vol%!



particles: WC (brittle, hard)

Ferramenta de corte WC/Co



Constituintes do osso: colágeno (20% em peso), fosfatos de cálcio (70% em peso) e água (9% em peso), proteínas, polissacarídeos, e lipídeos.



## Agente de reforço- fibras e partículas

Vidro;  
Kevlar;  
Carbono;  
Thermoplástico;  
Alumina  
SiC (Carbeto de Silício)  
Aço  
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Nitreto de Silício)  
SiO<sub>2</sub> - Sílica  
Talco  
Rochas  
Negro de Fumo  
Carbonato de Cálcio



# Fibras de vidro

Convencional - com fibras de vidro com valor de módulo elástico moderadamente alto.

Compósitos avançados – com fibras de vidro valores de módulo elástico maiores que o do E-vidro.

Table 14.1 Compositions of Glass-Reinforcing Fibers

Designation	Characteristic	Composition <sup>a</sup> (wt %)								
		SiO <sub>2</sub>	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
A-glass	Common soda–lime silica	72	<1	10		14				
AR-glass	Alkali resistant (for concrete reinforcement)	61	<1	5	<1	14	3		7	10
C-glass	Chemical corrosion resistant	65	4	13	3	8	2	5		
E-glass	Electrical composition	54	15	17	5	<1	<1	8		
S-glass	High strength and modulus	65	25		10					

Source: Data from J. G. Mohr and W. P. Rowe, *Fiber Glass*, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., NY, 1978.

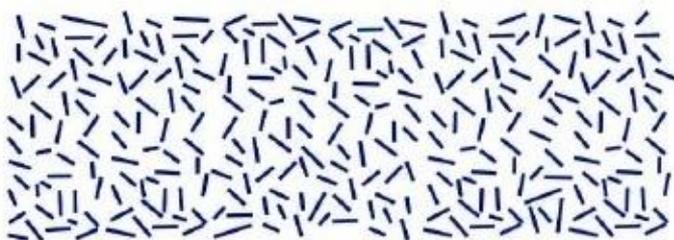
<sup>a</sup> Approximate and not representing various impurities.



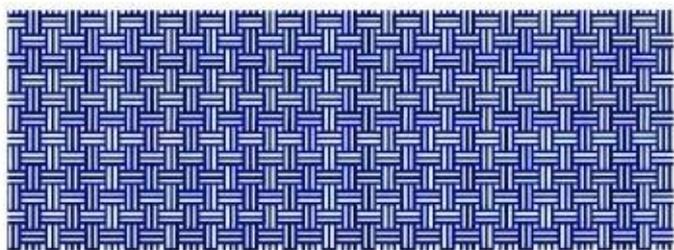
# Formatos



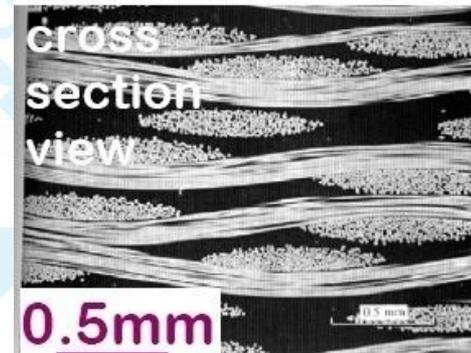
(a)



(b)



(c)



a) contínuo, b) particulado, c) tecido, pulvrento.



## Reforço - tecido

Tecido de material contínuo

Tecido de material cortado



-Superfície (Vel)



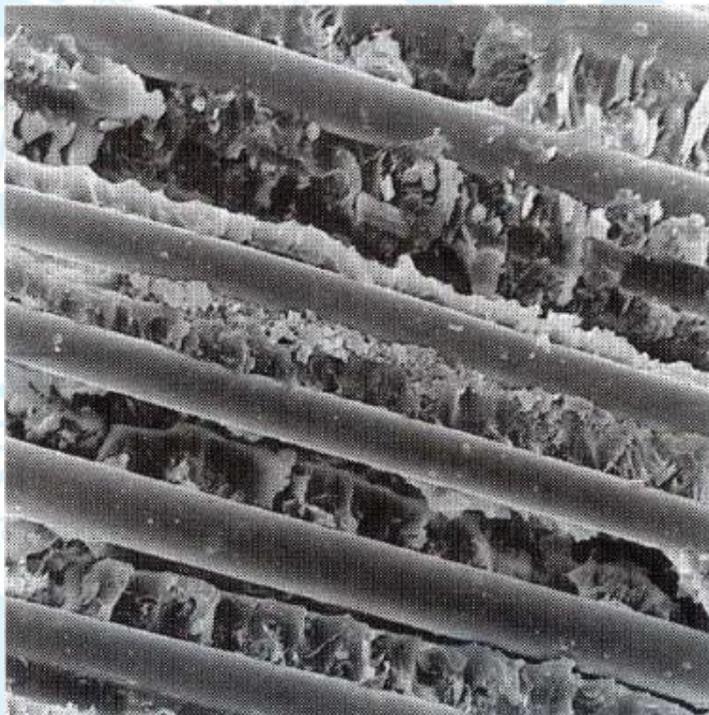
## Matrizes

Protegem e separam os reforços, transmitem esforços

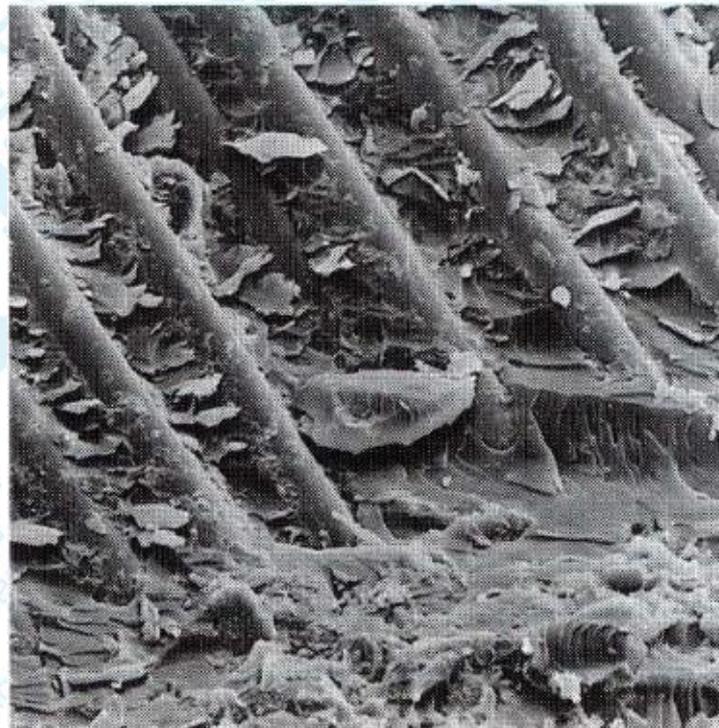
- Polímeros
  - Epoxi; poliéster, poliuretano, borracha
- Metal
  - Al, Cu, Ti, Ni
- Cerâmica
  - vidro, cimento



# Interface x interfase



Fraca união química matriz-reforço



Forte união química matriz-reforço



**Table 14.2** *Polymeric Matrix Materials for Fiberglass*

<b>Polymer<sup>a</sup></b>	<b>Characteristics and applications</b>
Thermosetting	
Epoxies	High strength (for filament-wound vessels)
Polyesters	For general structures (usually fabric reinforced)
Phenolics	High-temperature applications
Silicones	Electrical applications (e.g., printed-circuit panels)
Thermoplastic	
Nylon 66	Less common, especially good ductility
Polycarbonate	
Polystyrene	

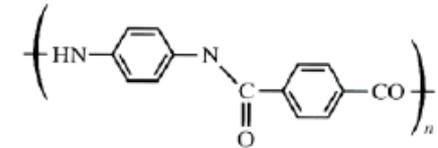
Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967, Chapter 13.

<sup>a</sup>See Tables 13.1 and 13.2 for chemistry.

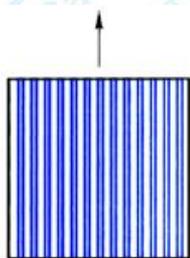


**Table 14.3** *Advanced Composite Systems Other Than Fiberglass*

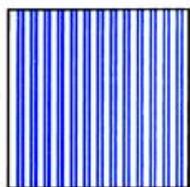
<b>Class</b>	<b>Fiber/Matrix</b>
Polymer matrix	Para-aramid (Kevlar <sup>a</sup> )/epoxy
	Para-aramid (Kevlar <sup>a</sup> )/polyester
	C (graphite)/epoxy
	C (graphite)/polyester
	C (graphite)/polyetheretherketone (PEEK)
	C (graphite)/polyphenylene sulfide (PPS)
Metal matrix	B/Al
	C/Al
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg
	SiC/Al
	SiC/Ti (alloys)
Ceramic matrix	Nb/MoSi <sub>2</sub>
	C/C
	C/SiC
	SiC/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	SiC/SiC
	SiC/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
	SiC/Li–Al–silicate (glass-ceramic)


**Formula for para-aramid**

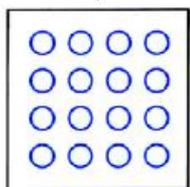

# Propriedades



(a)



(b)



(c)

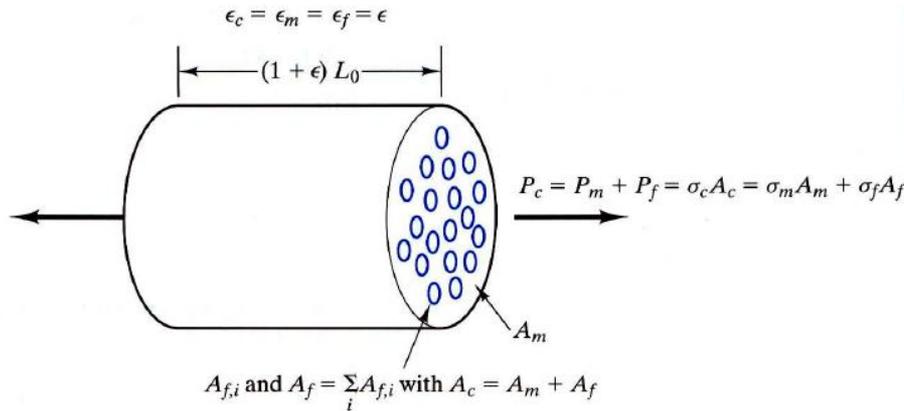
De natureza altamente anisotrópica

De natureza isotrópica



# Carregamento paralelo ao reforço das fibras - isostrain

(Iso deformação)



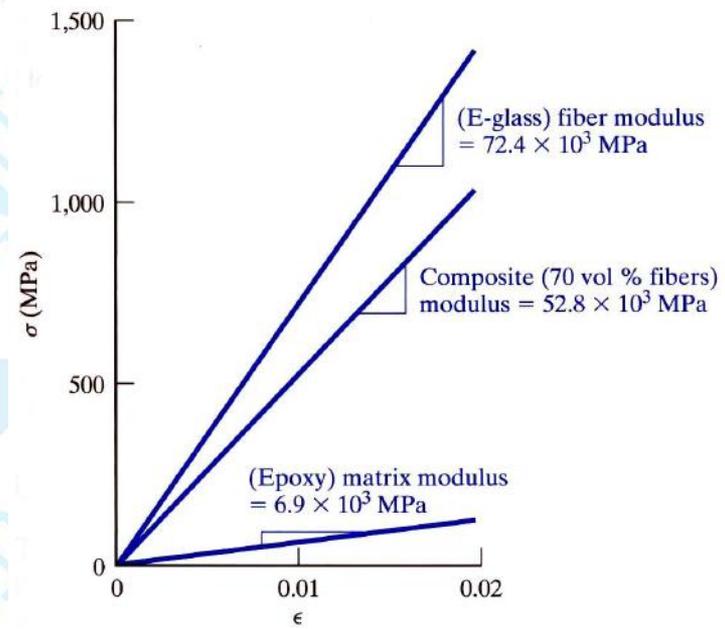
$$E_c = V_m E_m + V_f E_f$$

$$V_m + V_f = 1$$

$$P_f/P_c = E_f/E_c \cdot V_f$$

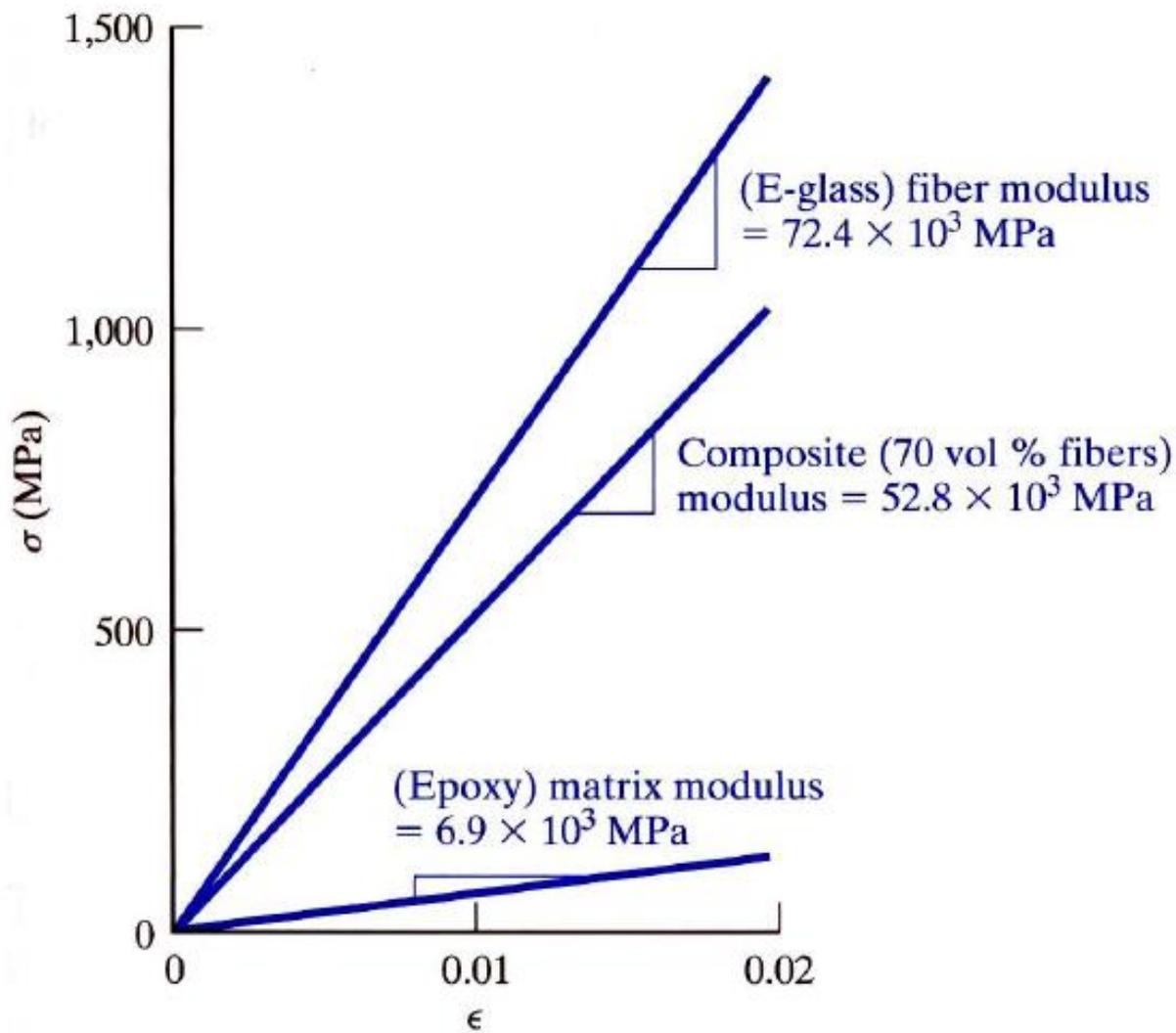
$$X_c = V_m X_m + V_f X_f$$

X pode ser diferentes propriedades como: difusividade, condutividade térmica, cond. elétrica,...



70vol% reinforcing phase





## 70vol% reinforcing phase



Calcule o módulo elástico do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isodeformação.

$$E_{\text{poliéster}} = 6,9 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{poliéster}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$

$$E_c = 42,2 \text{ GPa}$$

$$k_c = 0,65 \text{ W/m.K}$$



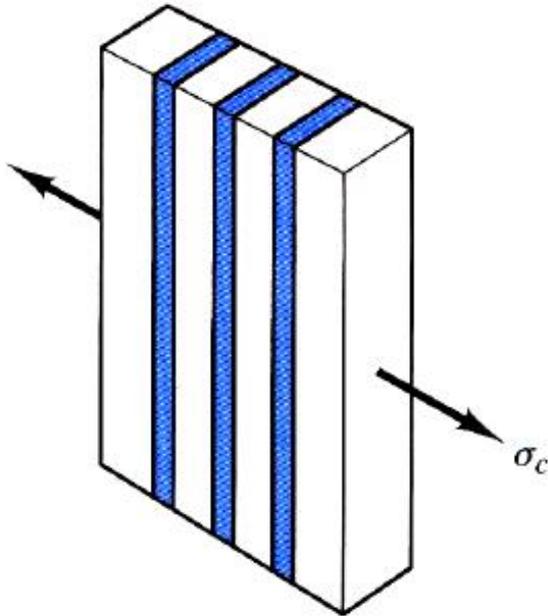
# Carregamento perpendicular ao reforço das fibras: isostress

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \quad (\text{Iso tensão})$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\nu_m}{E_m} + \frac{\nu_f}{E_f},$$

$$E_c = \frac{E_m E_f}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}.$$

$$X_c = \frac{X_m X_f}{\nu_m X_f + \nu_f X_m},$$



Calcule o módulo elástico do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isotensão.

$$E_{\text{poliéster}} = 6,9 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{poliéster}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

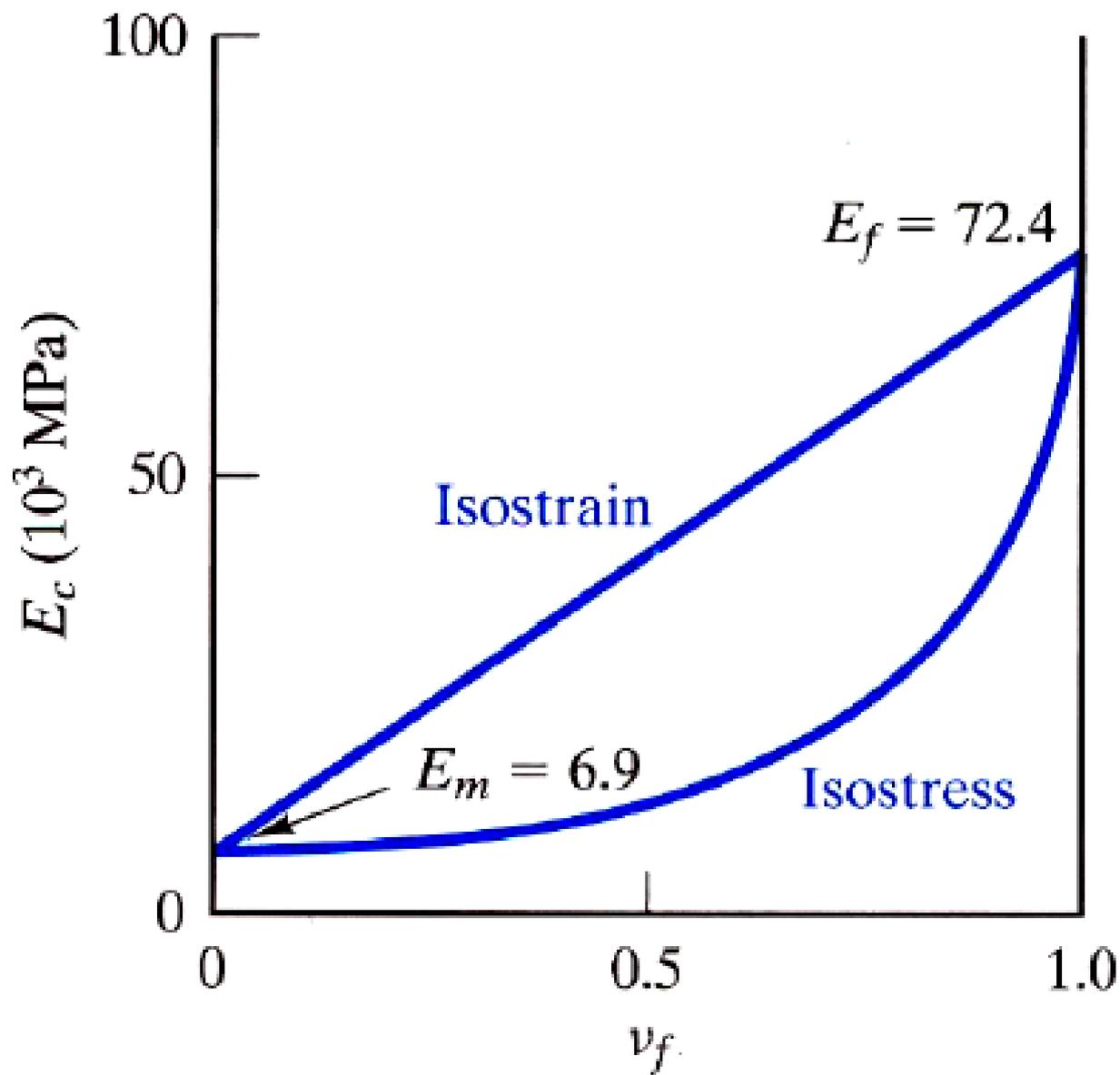
$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$

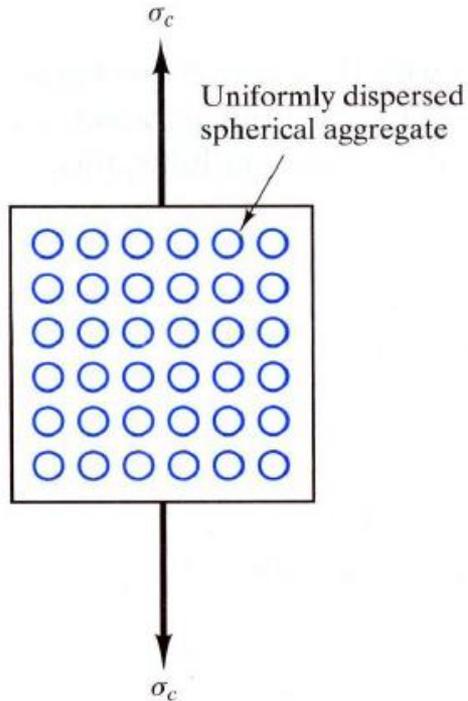
$$E_c = 15,1 \text{ GPa}$$

$$k_c = 0,34 \text{ W/m.K}$$





# Carregamento compósito com particulado uniformemente distribuído



$$E_c^n = v_l E_l^n + v_h E_h^n$$

***l*** – the low-modulus phase

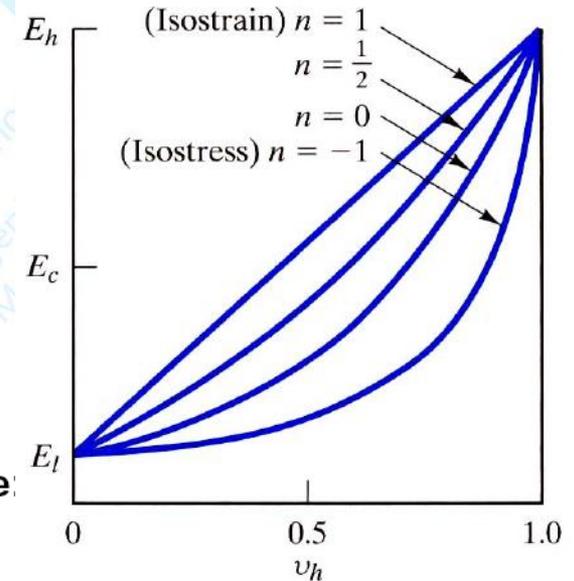
***h*** – the high modulus phase

***n = 1***, for the isostrain case, an extreme case: rubber balls in a steel matrix

***n = -1***, for the isostress case, such as steel balls in a rubber matrix

***n = 0***, a higher-modulus aggregate in a low-modulus matrix

***n = 1/2***, a low-modulus aggregate in a higher-modulus matrix



Deseja-se fabricar um implante com mesmo módulo elástico do osso cortical (17-25 GPa),

- quanto deve ser adicionado em micro fibra de biovidro (vol%) no acrílico;
- E se o acrílico (matriz densa) for poroso a 60 vol%;

... Use seu feeling para determinar o valor de n...

$$E_{\text{acrílico}} = 3,5 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{bioglass}} = 70 \text{ GPa}$$



Table 14.10 Mechanical Properties of Common Matrix Materials

Class	Example	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength (after 28 days) [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
Polymer <sup>a</sup>	Epoxy	6,900 (1,000)	69 (10)	—	—	0	0.3–0.5
	Polyester	6,900 (1,000)	28 (4)	—	—	0	—
Metal <sup>b</sup>	Al	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	76 (11)	—	—	—	—
	Cu	$115 \times 10^3 (17 \times 10^3)$	170 (25)	—	—	—	—
Ceramic <sup>c</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	550 (80)	—	—	4–5
	SiC	—	—	500 (73)	—	—	4.0
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (reaction bonded)	—	—	260 (38)	—	—	2–3
Portland cements <sup>d</sup>	Type I	—	2.4 (0.35)	—	24 (3.5)	—	—
	Type II	—	2.3 (0.33)	—	24 (3.5)	—	—
	Type III	—	2.6 (0.38)	—	21 (3.0)	—	—
	Type IV	—	2.1 (0.30)	—	14 (2.0)	—	—
	Type V	—	2.3 (0.33)	—	21 (3.0)	—	—

<sup>a</sup>From Tables 6.8 and 8.3.

<sup>b</sup>For high-purity alloys with no significant cold working from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

<sup>c</sup>Source: Data from A. J. Klein, *Advanced Materials and Processes*, 2, 26 (1986).

<sup>d</sup>Source: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.



Table 14.11 Mechanical Properties of Common Dispersed-Phase Materials

Group	Dispersed phase	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
Glass fiber <sup>a</sup>	C-glass	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	3,100 (450)	—	4.5
	E-glass	$72.4 \times 10^3 (10.5 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	4.8
	S-glass	$85.5 \times 10^3 (12.4 \times 10^3)$	4,800 (700)	—	5.6
Ceramic fiber <sup>a</sup>	C (graphite)	$340 - 380 \times 10^3 (49 - 55 \times 10^3)$	2,200–2,400 (320–350)	—	—
	SiC	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	2,400 (350)	—	—
Ceramic whisker <sup>a</sup>	$Al_2O_3$	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	$21 \times 10^3 (3,000)$	—	—
Polymer fiber <sup>b</sup>	Kevlar <sup>c</sup>	$131 \times 10^3 (19 \times 10^3)$	3,800 (550)	—	2.8
Metal filament <sup>a</sup>	Boron	$410 \times 10^3 (60 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	—
Concrete aggregate <sup>d</sup>	Crushed stone and sand	$34 - 69 \times 10^3 (5 - 10 \times 10^3)$	1.4–14 (0.2–2)	69–340 (10–50)	—

<sup>a</sup> Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967.

<sup>b</sup> Source: Data from A. K. Dhingra, Du Pont Company.

<sup>c</sup> Trade name, Du Pont.

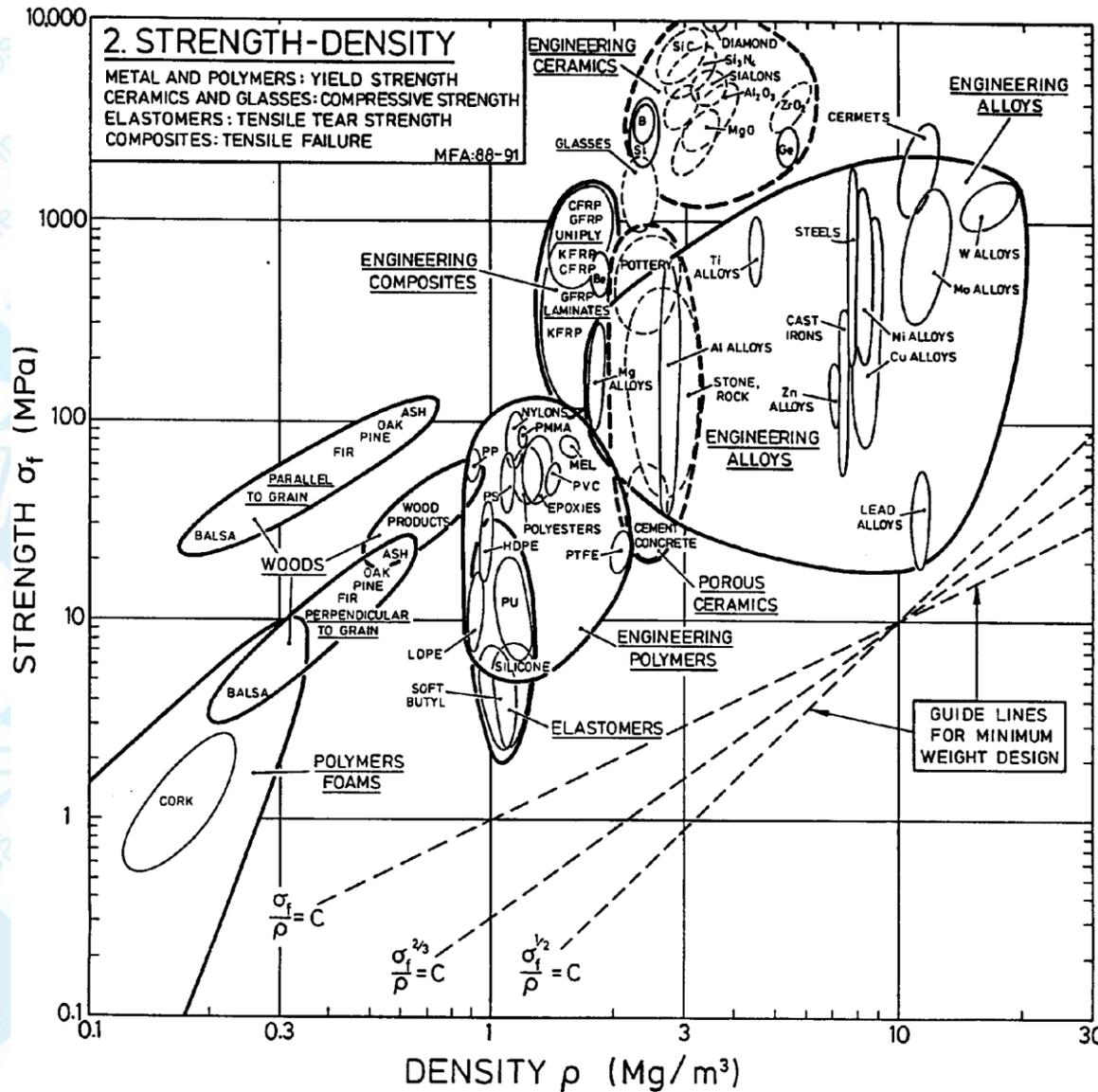
<sup>d</sup> Source: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.



Table 14.12 Mechanical Properties of Common Composite Systems

Class	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	$K_{IC}^a$ (MPa $\sqrt{m}$ )
<b>Polymer–matrix</b>						
E-glass (73.3 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous fibers) <sup>b</sup>	$56 \times 10^3$ ( $8.1 \times 10^3$ )	1,640 (238)	—	—	2.9	42–60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> whiskers (14 vol %) in epoxy <sup>b</sup>	$41 \times 10^3$ ( $6 \times 10^3$ )	779 (113)	—	—	—	—
C (67 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>c</sup>	$221 \times 10^3$ ( $32 \times 10^3$ )	1,206 (175)	—	—	—	—
Kevlar <sup>d</sup> (82 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>c</sup>	$86 \times 10^3$ ( $12 \times 10^3$ )	1,517 (220)	—	—	—	—
B (70 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous filaments) <sup>b</sup>	$210 - 280 \times 10^3$ ( $30 - 40 \times 10^3$ ) <sup>c</sup>	1,400–2,100 (200–300) <sup>c</sup>	—	—	—	46
<b>Metal matrix</b>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 vol %) dispersion-strengthened aluminum <sup>b</sup>	—	330 (48)	—	—	—	—
W (50 vol %) in copper (parallel loading of continuous filaments) <sup>b</sup>	$260 \times 10^3$ ( $38 \times 10^3$ )	1,100 (160)	—	—	—	—
W particles (50 vol %) in copper <sup>b</sup>	$190 \times 10^3$ ( $27 \times 10^3$ )	380 (55)	—	—	—	—
<b>Ceramic–matrix</b>						
SiC whiskers in Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>c</sup>	—	—	800 (116)	—	—	8.7
SiC fibers in SiC <sup>e</sup>	—	—	750 (109)	—	—	25.0
SiC whiskers in reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>e</sup>	—	—	900 (131)	—	—	20.0
<b>Wood</b>						
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded parallel to grain) <sup>d</sup>	$13.4 \times 10^3$ ( $1.95 \times 10^3$ ) <sup>f</sup>	85.5 (12.4) <sup>f</sup>	—	49.9 (7.24)	—	11–13
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded perpendicular to grain) <sup>d</sup>	—	—	—	5.5 (0.80)	—	0.5–1
<b>Concrete</b>						
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) <sup>g</sup>	—	—	—	41 (6.0)	—	0.2
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) with air entrainer <sup>g</sup>	—	—	—	33 (4.8)	—	—





Fonte: ASHBY, M.F. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992



## Resistência à tração

Ou tração na ruptura é a carga aplicada no material por unidade de área, no momento da ruptura

Ferro fundido nodular,	480 a 930 MPa
Ferro fundido cinzento, classe 20	138 MPa
Aço fundido,	450 a 1380 MPa
Aço carbono comum,	414 a 1034 MPa
Polímeros	28 - 152 MPa
Titânio (cp)	$\sigma_e$ 140 – $\sigma_{rt}$ 200 MPa*
Titânico Liga	$\sigma_e$ 850 - $\sigma_{rt}$ 950 MPa*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> policristalina	400 MPa

\* <http://www.matweb.com>



# *Aula Prática 06*

## Aula 06 - Prática

Fazer croqui do conjunto considerando as delimitações e o foco.

### Delimitações

- Maromba → 600 x 400mm, pressão 20MPa, L/D 10/1
- Dispenser → Embolo 16mm; volume 20ml, Q 1 a 10 ml/min,  $p=1,5$  MPa, 500 x 500 mm
- Speed Mixer → volume 200 ml
- Cabeçote planetário → furos de 3 a 12 mm, diâmetro de rebolo 2 mm, rotação 15.000 rpm, motor comercial, eixo para pinça.

