

MATERIAIS DE ENGENHARIA - (SEM 5908) -

Aula 06 – Polímeros como Materiais de Engenharia

Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan

POLÍMEROS

“Agregado (ou conjunto) de grandes moléculas construídas pela repetição de pequenas unidades químicas simples (meros), ligadas por covalência.”

"AGNELLI (1993)"

Histórico:

1860 - Conhecimento do plástico pelos químicos.

1864 - 1ª aplicação prática do plástico, o celulóide .(Nitrato de Celulose) resolveu o problema de escassez de marfim nos EUA.

1909 - Baquelite.

1935 - Polietileno.

1946 - ABS.

1948 - TEFLON.

1958 - Policarbonato.

1959 - Polipropileno

POLÍMEROS

São moléculas longas consistindo de (pelo menos cinco) unidades químicas repetidas ('meros') unidas em conjunto, parecido como nós em um barbante. Os polímeros usualmente contém muito mais que cinco monômeros, e alguns podem conter centenas ou milhares de monômeros em cada cadeia.

Polímeros podem ser: **naturais**, como a celulose ou DNA

ou

sintéticos, como nylon ou polietileno.

LIGAÇÕES

LIGAÇÕES
PRIMÁRIAS OU
FORTES
100 Kcal/mol

LIGAÇÕES
SECUNDÁRIAS
OU FRACAS
10 Kcal/mol

Ligação
IÔNICA

Ligação
METÁLICA

Ligação
COVALENTE

Forças de
Van-der-Waals

Atração entre
íons negativos e
positivos.

Elétrons Livres
formando uma
Nuvem eletrônica.

Compartilhamento dos elétrons de valência.
Apresentam características de
direcionalidade

Arranjos atômicos

Estruturas Cristalinas

Formação de cristais, isto é, arranjos ordenados e simétricos dos átomos no espaço.

Monocristais

Policristais

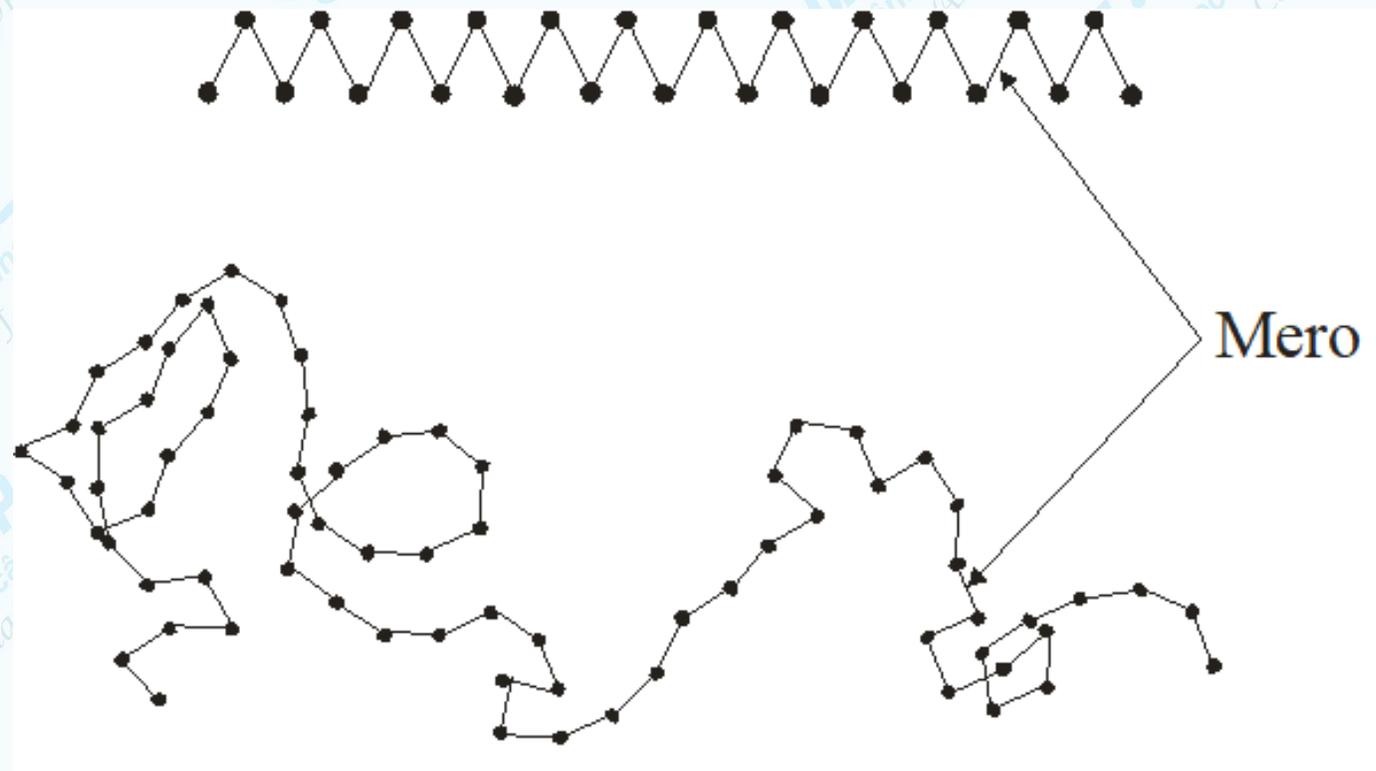
Estruturas Amorfas ou Vítreas

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.

Estrutura macromolecular ou polimérica



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

Classificação Periódica dos Elementos Químicos

 chemkeys <http://www.chemkeys.com>

1											13	14	15	16	17	18		
1	1 H 1,0079											5 B 10,811(7)	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	2 He 4,0026	
2	3 Li 6,941(2)	4 Be 9,0122											13 Al 26,982	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,065(5)	17 Cl 36,453	10 Ne 20,180
3	11 Na 22,990	12 Mg 24,305											31 Ga 69,723	32 Ge 72,64(1)	33 As 74,922	34 Se 78,96(3)	35 Br 79,904	18 Ar 39,948
4	19 K 39,098	20 Ca 40,078(4)	21 Sc 44,956	22 Ti 47,867	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,845(2)	27 Co 58,933	28 Ni 58,693	29 Cu 63,546(3)	30 Zn 65,41	49 In 114,82	50 Sn 118,71	51 Sb 121,76	52 Te 127,60(3)	53 I 126,90	36 Kr 83,80
5	37 Rb 85,468	38 Sr 87,62	39 Y 88,906	40 Zr 91,224(2)	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc 98,906*	44 Ru 101,07(2)	45 Rh 102,91	46 Pd 106,42	47 Ag 107,87	48 Cd 112,41	81 Tl 204,38	82 Pb 207,2	83 Bi 208,98	84 Po 209,98*	85 At 209,99*	54 Xe 131,29
6	55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	57-71 La-Lu	72 Hf 178,49(2)	73 Ta 180,95	74 W 183,84	75 Re 186,21	76 Os 190,23(3)	77 Ir 192,22	78 Pt 195,08(3)	79 Au 196,97	80 Hg 200,59	81 Tl 204,38	82 Pb 207,2	83 Bi 208,98	84 Po 209,98*	85 At 209,99*	86 Rn 222,02*
7	87 Fr 223,02*	88 Ra 226,03*	89-103 Ac-Lr	104 Rf 261*	105 Db 262*	106 Sg 266*	107 Bh 264*	108 Hs 277*	109 Mt 268*	110 Ds 271*	111 Rg 272*	112						

LANTANÍDIOS

57 LANTÂNIO La 138,91	58 CÉRIO Ce 140,12	59 PRASEODÍMIO Pr 140,91	60 NEODÍMIO Nd 144,24(3)	61 PROMÉCIO Pm 146,92*	62 SAMÁRIO Sm 150,36(3)	63 EUROPIO Eu 151,96	64 GADOLÍNIO Gd 157,25(3)	65 TERBIO Tb 158,93	66 DISPRÓSIO Dy 162,50	67 HÓLMIO Ho 164,93	68 ÉRBITO Er 167,26	69 TULIO Tm 168,93	70 ÍTERBITO Yb 173,04(3)	71 LUTÉCIO Lu 174,97
--------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------	---------------------------------	------------------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------	-------------------------------

ACTINÍDIOS

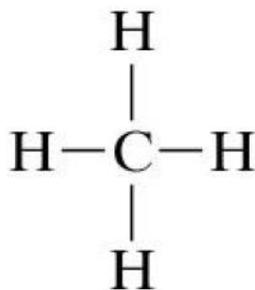
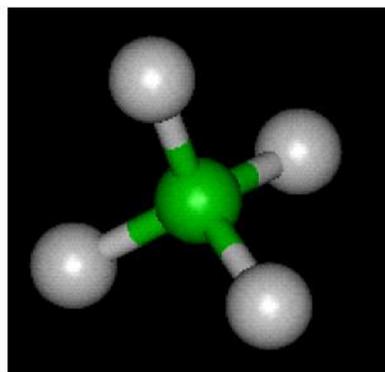
89 ACTÍNIO Ac 227,03*	90 TÓRIO Th 232,04*	91 PROACTÍNIO Pa 231,04*	92 URÂNIO U 238,03*	93 NETÚNIO Np 237,05*	94 PLUTÓNIO Pu 239,05*	95 AMÉRICIO Am 241,06*	96 CÚRIO Cm 244,06*	97 BERQUÉLIO Bk 249,08*	98 CALIFÓRNIO Cf 252,08*	99 EINSTEÍNIO Es 252,08*	100 FÉRMIO Fm 257,10*	101 MENDELEVIO Md 258,10*	102 NOBELIO No 259,10*	103 LAURENCIO Lr 262,11
--------------------------------	------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	----------------------------------

Número atômico	25	
Nome	Mn	Símbolo
	MANGANÊS	
	54,938	

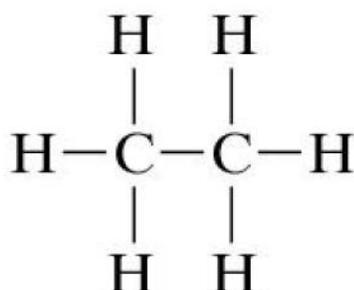
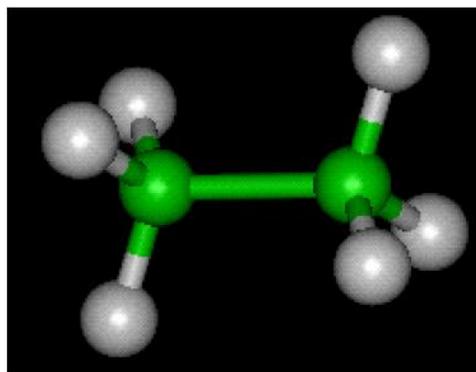
Massa atômica relativa. A incerteza no último dígito é 1, exceto quando indicado entre parênteses. Os valores com * referem-se ao isótopo mais estável.

Estrutura

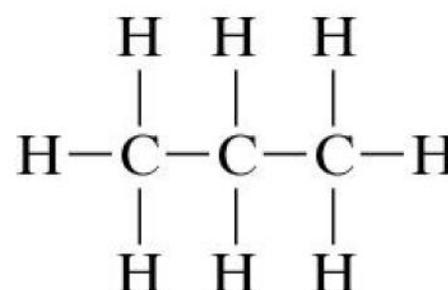
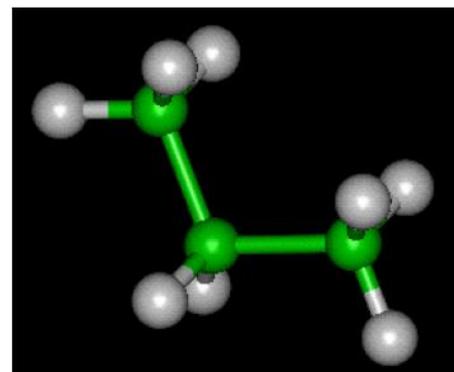
Muitos dos polímeros são orgânicos e formados por moléculas de hidrocarbonetos. Cada átomo de C tem quatro terminais que participa nas ligações, cada átomo de H tem um terminal.



Methane, CH₄

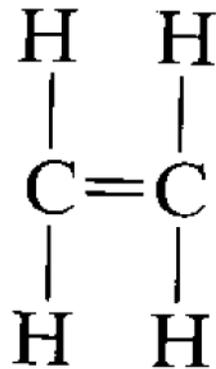


Ethane, C₂H₆

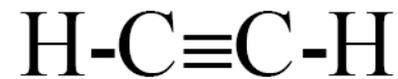


Propane, C₃H₈

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.

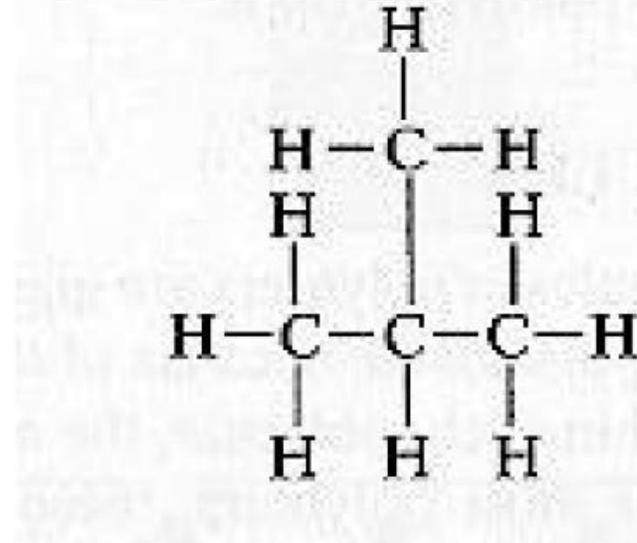
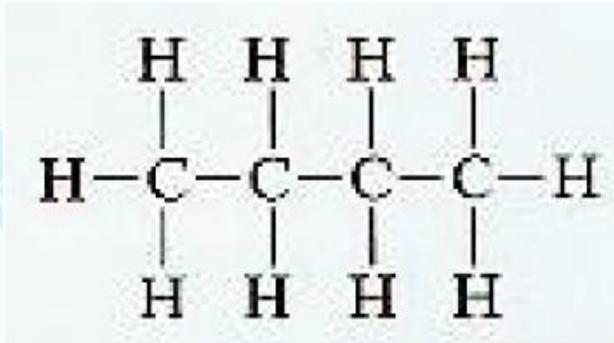


Ethylene, C₂H₄



Acetylene, C₂H₂

Isômeros são moléculas que contêm os mesmos átomos mas em um diferente arranjo. Um exemplo é o butano e o isobutano;



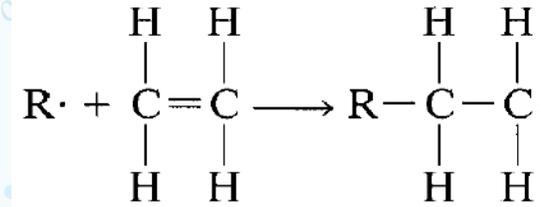
Butane → **C₄H₁₀** ← **Isobutane**

Química das moléculas poliméricas

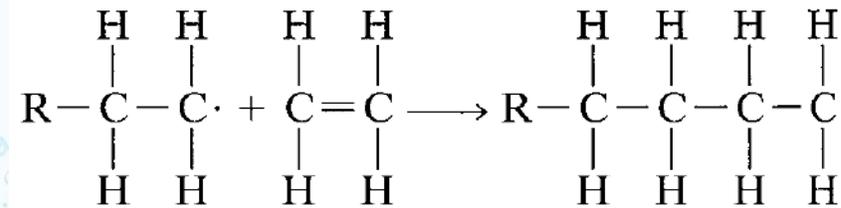
- ✓ Etileno (C_2H_4) é um gás a temperatura e pressão ambiente;
- ✓ O etileno se transforma em polietileno (sólido) pela formação ativa do mero através da reação com iniciador ou radical catalisador (R.)
- ✓ (.) denota elétron livre (posição ativa)

Polimerização por ADIÇÃO:

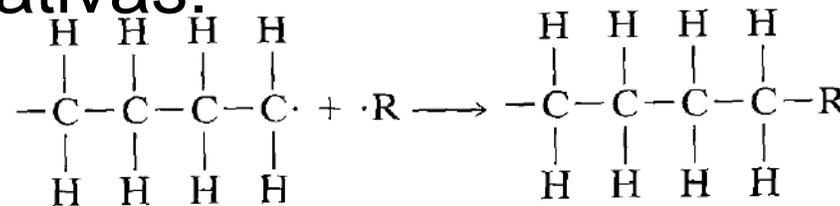
1. Reação de inicialização:



2. Propagação rápida: ~1000 meros em 1-10 ms:



3. Término: quando dois terminais de cadeia ativa encontram um com o outro ou terminais de cadeia ativa encontram com o iniciador ou outras espécies com unidades ativas:



Para o caso específico do grupo hidroxila o peróxido de hidrogênio é uma fonte de radicais.

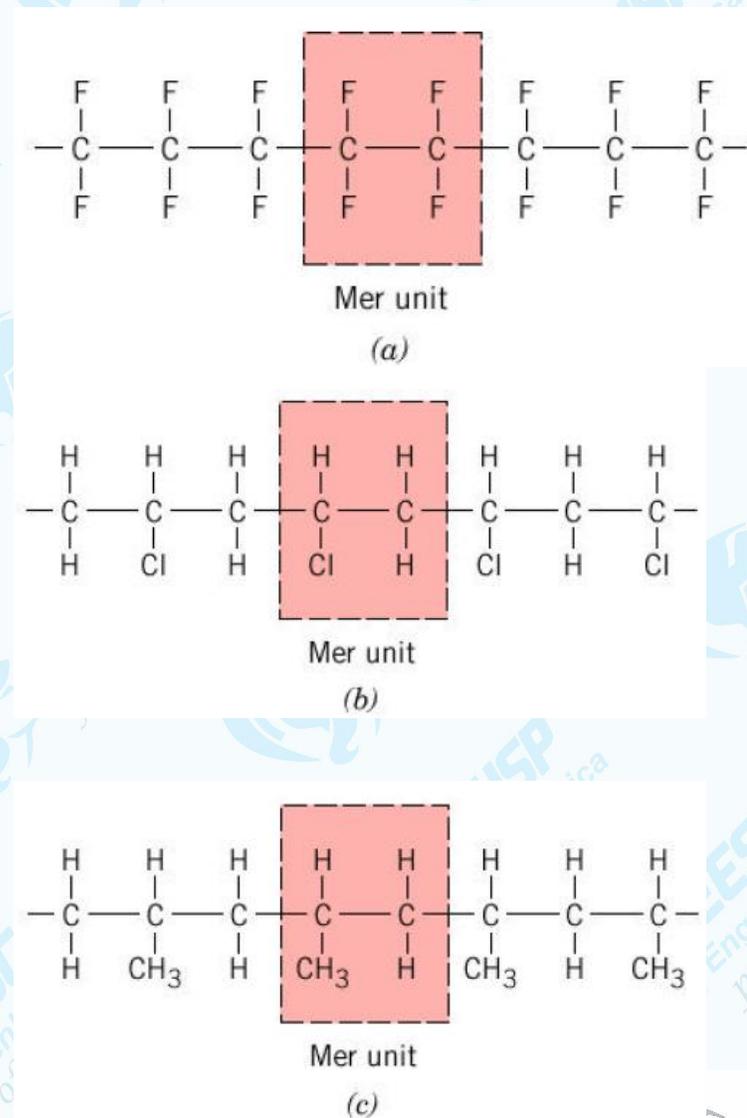


Polimerização por substituição:

Substituição dos átomos de hidrogênio por flúor no polietileno: politetrafluoretileno (PTFE) – Teflon

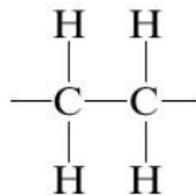
Substituição um dos quatro átomos de hidrogênio por átomos de cloro no polietileno: poli cloreto de vinila. PVC

Substituição um dos quatro átomos de hidrogênio pelo grupo metil (CH_3) no polietileno: polipropileno (PP)

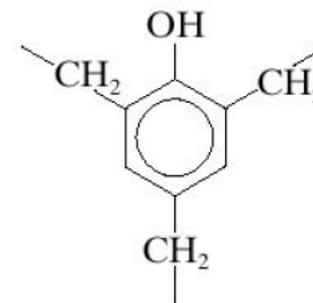


Química das moléculas poliméricas

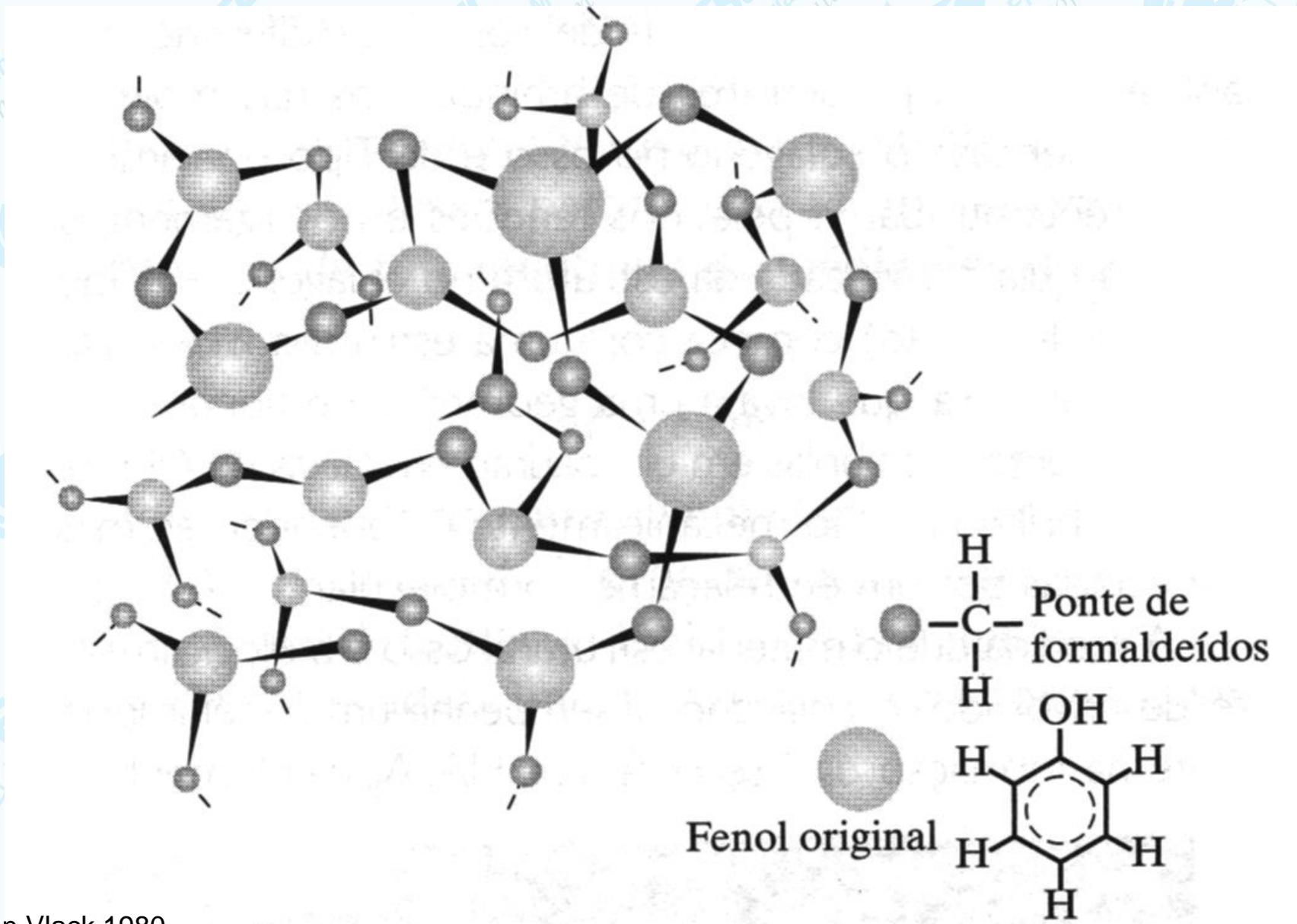
- ✓ Quando todos os meros são idênticos, a molécula é chamada de homopolímeros;
- ✓ Quando há mais que um tipo de mero presente a molécula é chamada de copolímeros;
- ✓ Meros que tem 2 terminais ativos são chamados de bifuncionais;
- ✓ Meros com 3 terminais ativos são tri-funcionais. Eles formam uma estrutura tridimensional.



Polyethylene
(bifunctional)



Phenol-formaldehyde
(trifunctional)



Van Vlack 1980

Peso molecular

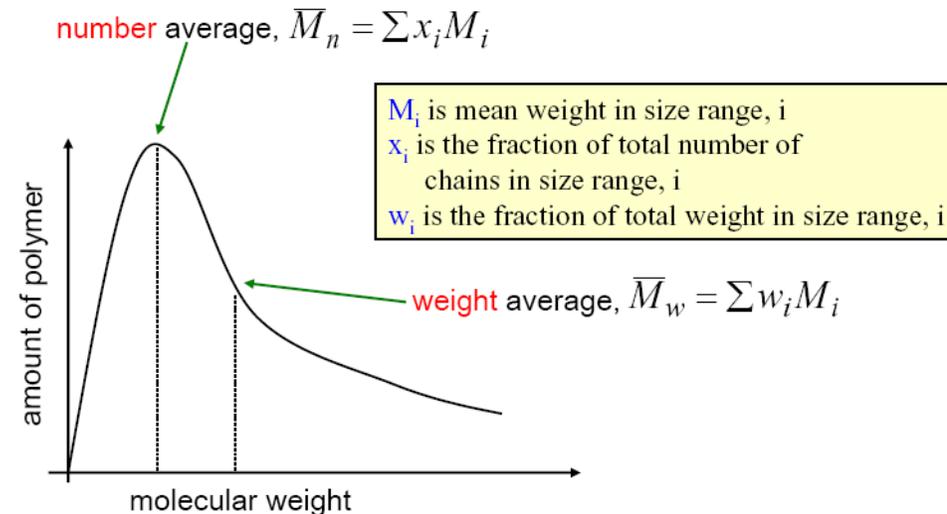
- ✓ Peso molecular (g/mol) (comprimento da cadeia), representa o número de unidades de massa atômica para uma determinada molécula;
- ✓ É controlado pelas taxas de iniciação, propagação e terminação das etapas de polimerização;
- ✓ Há uma distribuição de pesos moleculares resultante da polimerização;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

Uma outra alternativa o tamanho médio da cadeia polimérica é através do grau de polimerização, n , que é o número de meros em uma molécula polimérica.

number-average:

$$n_n = \frac{\overline{M}_n}{\overline{m}}$$

weight-average:

$$n_w = \frac{\overline{M}_w}{\overline{m}}$$

\overline{m} is the mer molecular weight

O peso molecular de um mero em uma cadeia de copolímero

$$\overline{m} = \sum f_j m_j$$

f_j chain fraction of mer j
 m_j molecular weight of mer j

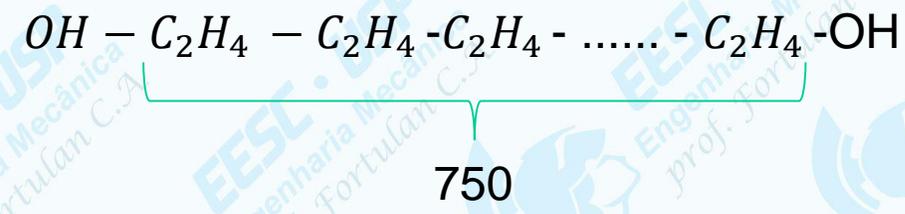
Ex6.01: Uma amostra de polietileno tem um peso molecular médio de 25.000 uma. Qual é o grau de polimerização, n , da molécula de polietileno “média”?

$$n = \frac{M_n}{m} \rightarrow n = \frac{25000}{C_2H_4} = \frac{25000}{2(12) + 4(1)} = \frac{25000}{28} = 893 \text{ uma}$$

Fonte: SHACKELFORD, J. F. *Ciência dos Materiais*. Pearson. 2008. p295

Ex 6.02: O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) fornece dois radicais hidroxila, $\text{OH}\bullet$, que servem para iniciar e terminar a polimerização do etileno (C_2H_4) para o polietileno - $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$. Quanto de H_2O_2 (wt%) é preciso ser acrescentado ao etileno para gerar um grau médio de polimerização de 750? Considere que todo H_2O_2 se dissocie em grupos OH que servem como terminais para as moléculas.

Peso atômico: (H=1,008; C=12,01; O=16).



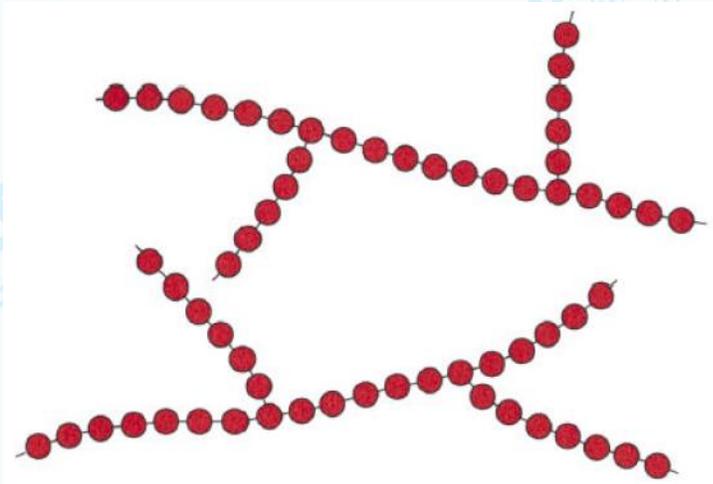
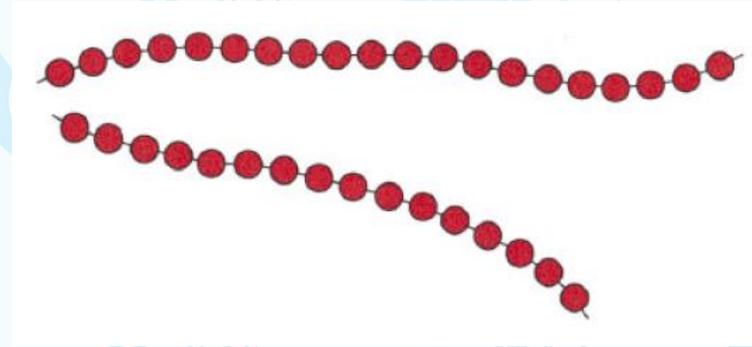
Peso Molecular x Propriedades físicas

- ✓ 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

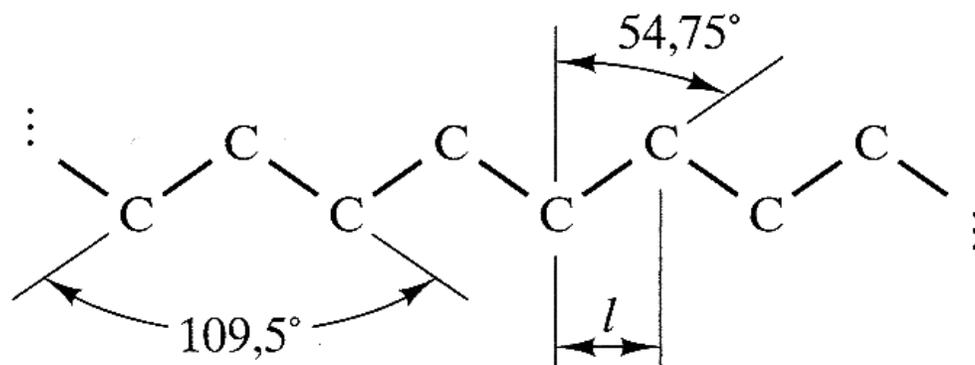
As características físicas de material polimérico dependem não somente do peso molecular e da forma, mas também de sua estrutura molecular:

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



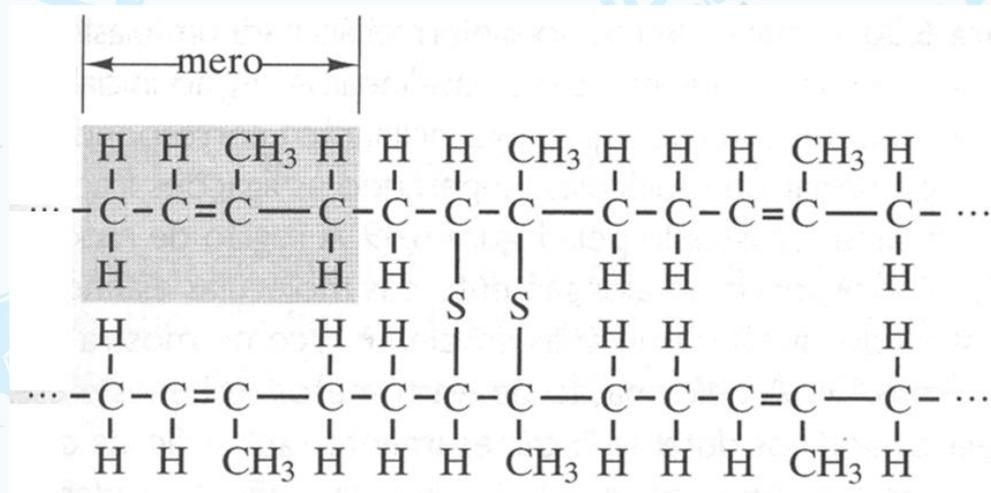
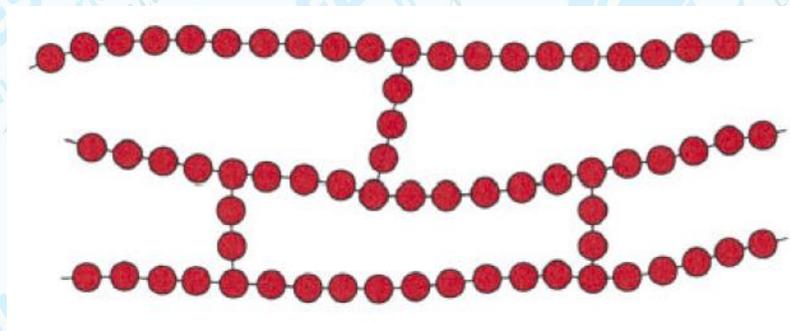
2 Polímeros ramificados: a eficiência de empacotamento é reduzida em comparação com os polímeros lineares - menor densidade.

Ex6.03: Calcule o tamanho de uma molécula de polietileno, $(C_2H_4)_n$, onde $n=500$.



Ligação	Energia de ligação ^a		Comprimento da ligação, nm
	kcal/mol	kJ/mol	
C—C	88 ^b	370	0,154
C=C	162	680	0,130
C≡C	213	890	0,120
C—H	104	435	0,110
C—N	73	305	0,150
C—O	86	360	0,140
C=O	128	535	0,120
C—F	108	450	0,140
C—Cl	81	340	0,180
O—H	119	500	0,100
O—O	52	220	0,150
O—Si	90	375	0,160
N—H	103	430	0,100
N—O	60	250	0,120
F—F	38	160	0,140
H—H	104	435	0,074

3. Polímeros com ligações cruzadas: as cadeias conectadas por ligações covalentes. Frequentemente obtidas pela adição de átomos ou moléculas que formam ligações entre as cadeias. Muitas borrachas tem esta estrutura.



Ex: Vulcanização – átomos de enxofre formam ligações primárias com meros de poliisopreno adjacentes.



Isso muda tudo.

Skyn® é a camisinha da linha Premium de Blowtex, feita com poliisopreno, um material antialérgico que proporciona a sensação de não usar nada. O resultado é mais prazer para o casal. Quer revolucionar sua vida sexual? Descubra em:

blowtex.com.br/skyn

Ex6.04:

38) No dia-a-dia nos deparamos com termos tais como vulcanização e cura de produtos poliméricos. Contudo, poucas pessoas compreendem que esses dois termos pressupõe que se forma, no meio material, uma estrutura macromolecular tridimensional única, interligada por ligações covalentes (ligações cruzadas) que estão separadas por um certo espaçamento. A literatura científica, também, usa o termo reticulação como equivalente a vulcanização ou cura. Assinale a alternativa correta que expressa o significado técnico dos três termos, independentemente, das diversidades de matérias primas empregadas e especificidades das tecnologias usadas para fabricação ou uso e produtos vulcanizáveis ou curáveis ou reticuláveis.

A. a vulcanização ou cura ou reticulação é uma reação química induzida em polímeros, por diversas substâncias e condições específicas ou também ainda pode ser desencadeada pela polimerização de precursores químicos com o objetivo de interligar as macromoléculas do meio reacional que pode ser líquido ou sólido, através de ligações covalentes (ligações cruzadas).

B. a vulcanização ou cura ou reticulação é uma reação de pirólise induzida por meios térmicos com o objetivo de enrijecer o material polimérico, razão pela qual os produtos vulcanizados tais como pneus, anéis de vedação e correias, geralmente, são pretos.

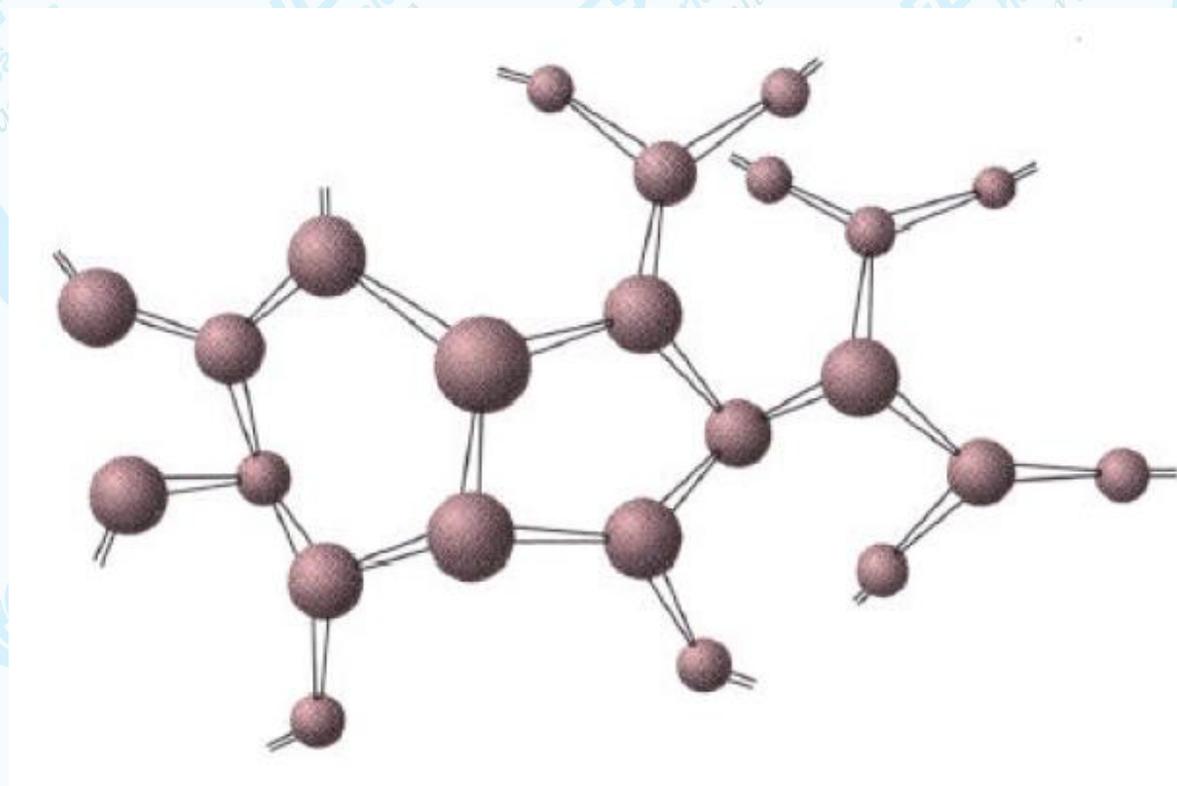
C. a vulcanização ou cura ou reticulação é uma reação de combustão conduzida, numa atmosfera controlada, para promover a queima parcial do polímero e, conseqüentemente, endurecer o material, razão pela qual os produtos vulcanizados tais como pneus, anéis de vedação e correias, geralmente, são pretos.

D. a vulcanização ou cura ou reticulação é um fenômeno puramente físico que consiste em plastificar o material polimérico com um solvente para melhorar sua fluidez e torna-lo moldável. O processo de endurecimento do material ocorre em duas etapas: a evaporação do solvente seguida de sinterização do material.

E. A vulcanização ou cura ou reticulação é um processo de sinterização para endurecer o material polimérico com o objetivo de evitar que ele amoleça durante o uso. Deste modo, durante a sinterização as partículas de polímero sofrem coalescência, justificando assim, o endurecimento deste material.

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)

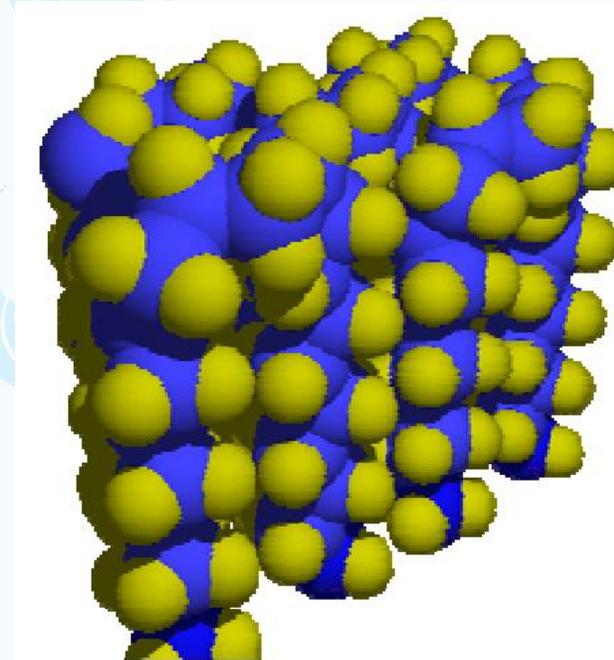
$$\% \text{ crystallinity} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100$$

Where:

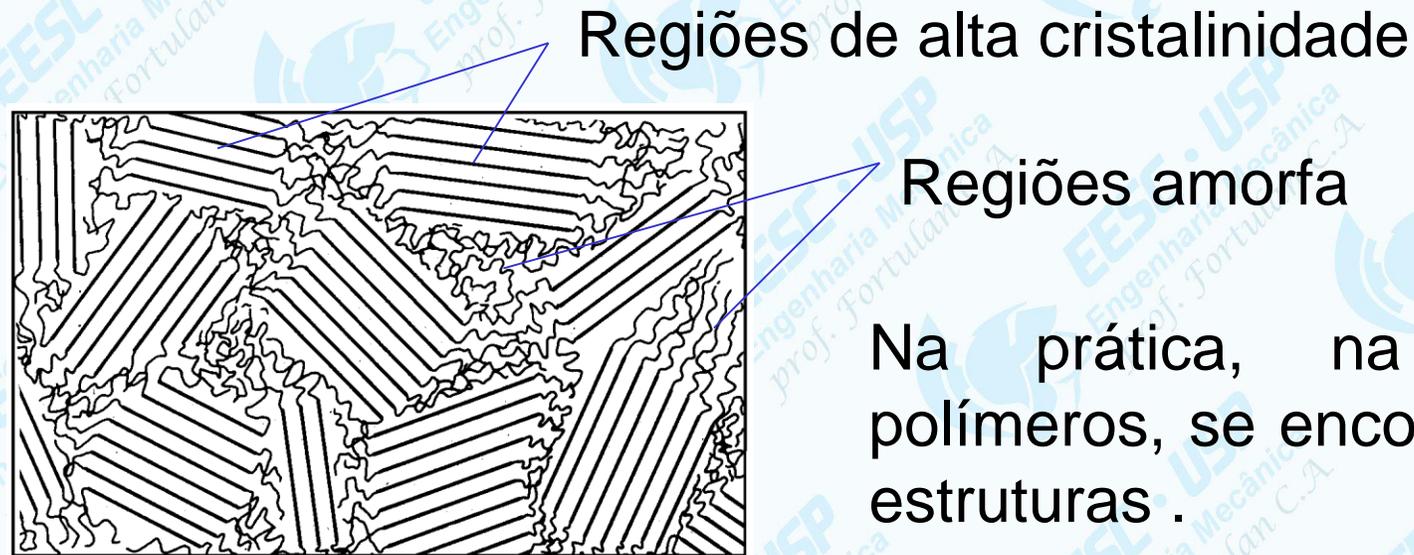
ρ_s = Density of sample

ρ_a = Density of the completely amorphous polymer

ρ_c = Density of the completely crystalline polymer



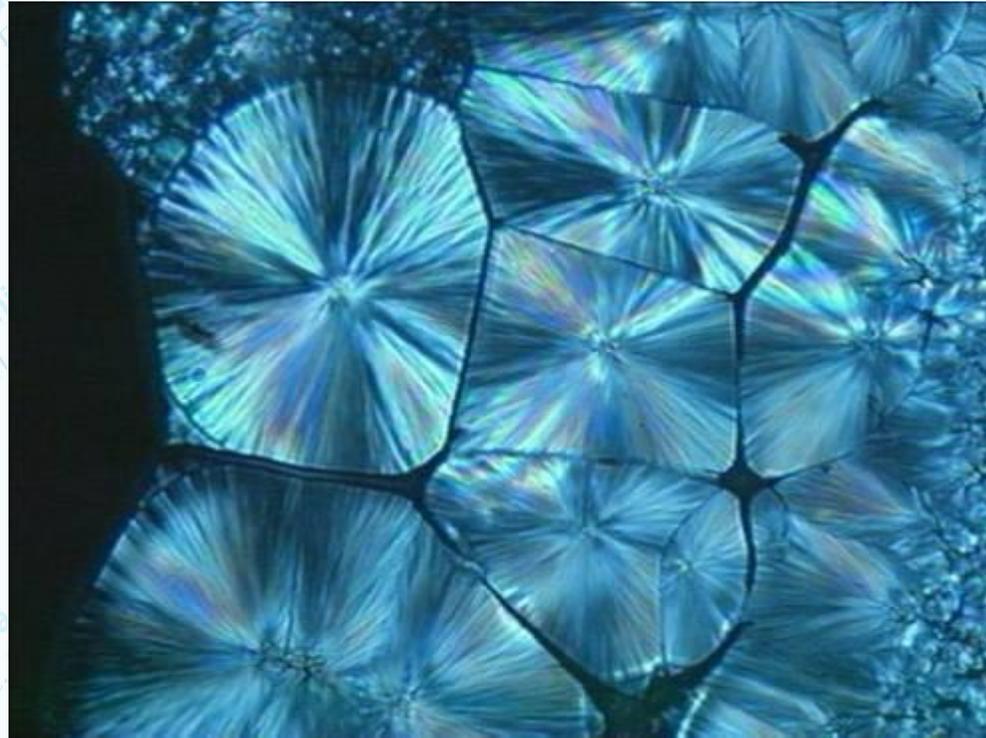
Cristalinidade nos polímeros



- 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.

Polietileno de alta densidade

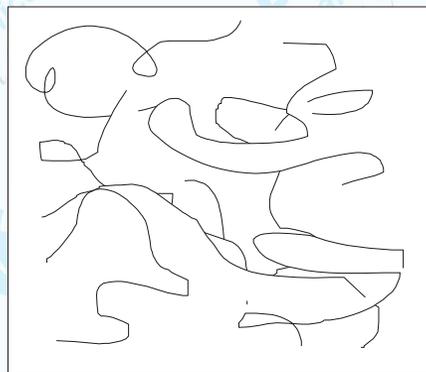


- ✓ Microscopia ótica; (HDPE)
- ✓ O filme polimérico foi cristalizado à partir de um filme inicialmente amorfo (LDPE);
- ✓ Cada cristal é visto radialmente á partir de um núcleo, até encontrar a fronteira com o cristal adjacente.

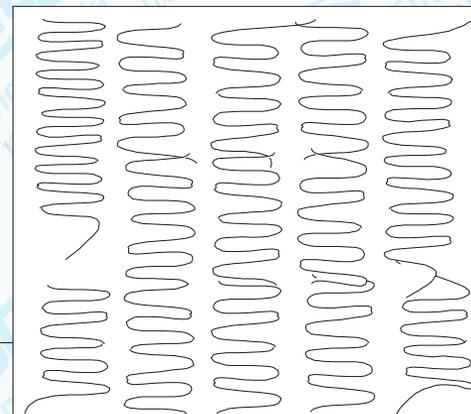
Ex6.05:

33) Verificou-se que os polímeros transparentes, na região do visível (400-700nm), não produzem picos de difração de raios-x. Por outro lado, observou-se que os polímeros opacos, na região do visível (400-700nm), produzem picos de difração dos raios-x. Considere que os polímeros opacos e transparentes avaliados estão isentos de quaisquer aditivos. Assinale a alternativa correta que explica a razão pela qual os polímeros transparentes e opacos interagem de forma distinta com os raios-x e a luz visível.

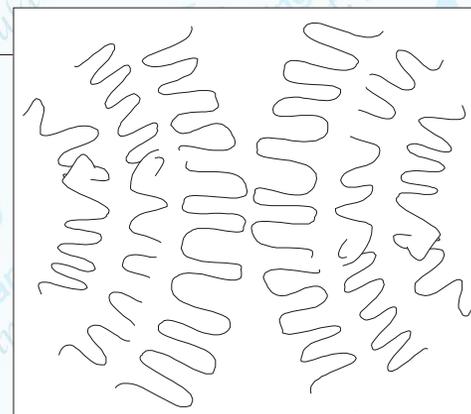
- A. Os polímeros transparentes são cristalinos, isto é, contêm uma estrutura de alta ordem, denominada de cristais, que facilita a passagem das duas radiações eletromagnéticas (raios-x, luz visível), enquanto que os polímeros opacos contêm uma estrutura completamente desordenada responsável pela reflexão da luz visível e difração dos raios-x.
- B. Os polímeros opacos por serem totalmente amorfos provocam a difração dos raios-x e a reflexão da luz visível, enquanto que em polímeros transparentes, a coexistência das duas fases, cristalina e amorfa, é que justifica a interferência destrutiva das duas radiações, raios-x e luz visível, ao atravessar o meio material.
- C. Os polímeros transparentes por serem amorfos não difratam os raios-x e nem refletem a luz visível, devido à ausência dos cristais, enquanto que os polímeros opacos difratam os raios-x e refletem a luz visível, devido à existência de múltiplas estruturas ordenadas denominadas de cristais.
- D. Os polímeros opacos são totalmente amorfos devido à presença de uma estrutura ordenada, que é responsável pela difração dos raios-x e reflexão da luz visível, enquanto que esses dois eventos estão ausentes em polímeros transparentes, devido à interferência destrutiva proporcionada pela coexistência das fases cristalina e a amorfa.
- E. Os polímeros transparentes por conter cristais muito grandes não difratam os raios-x e deixam a luz visível passar, enquanto os opacos por serem amorfos difratam os raios-x e a luz visível.



Polímero no estado fundido com cadeias emaranhadas

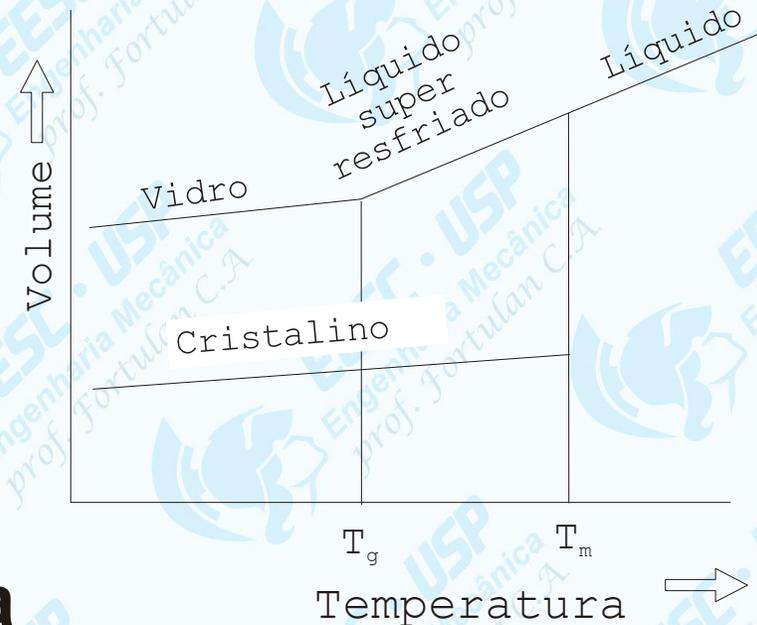


Polímero no estado sólido com cadeias parcialmente ordenadas; cristalitos lamelares



Polímeros no estado sólido com cadeias parcialmente ordenadas; cristalitos esferulitos

Polímeros



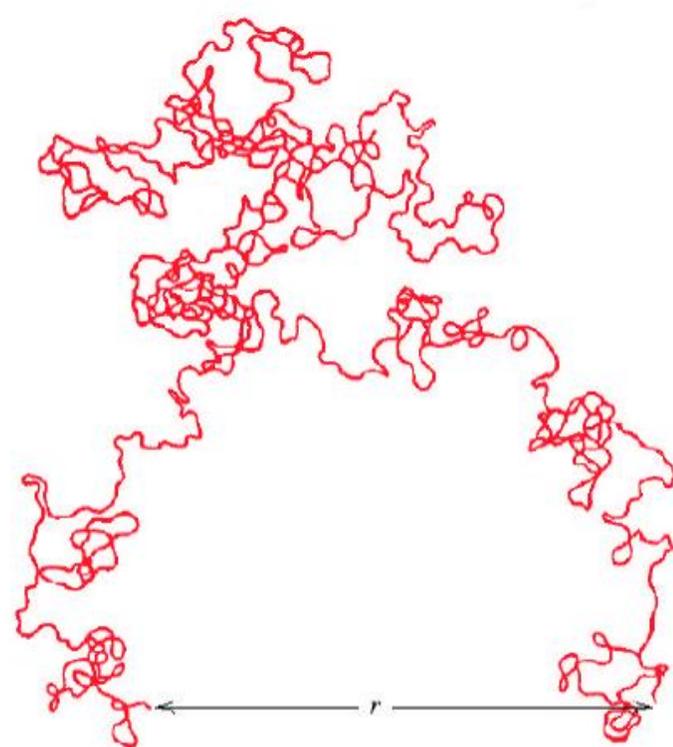
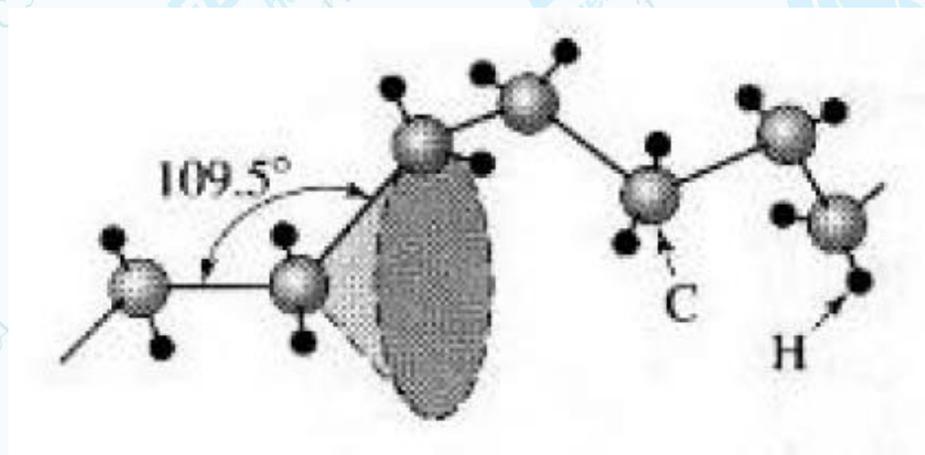
T_m – Temperatura de fusão cristalina

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

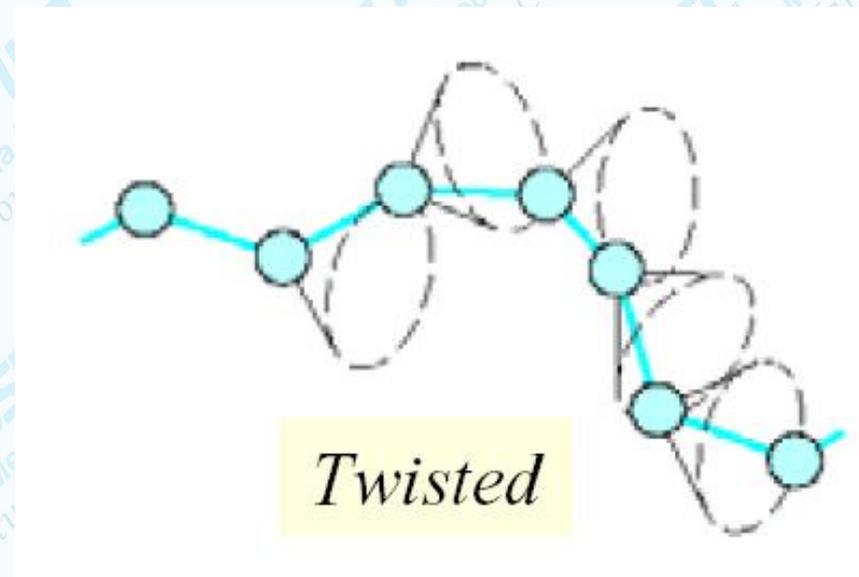
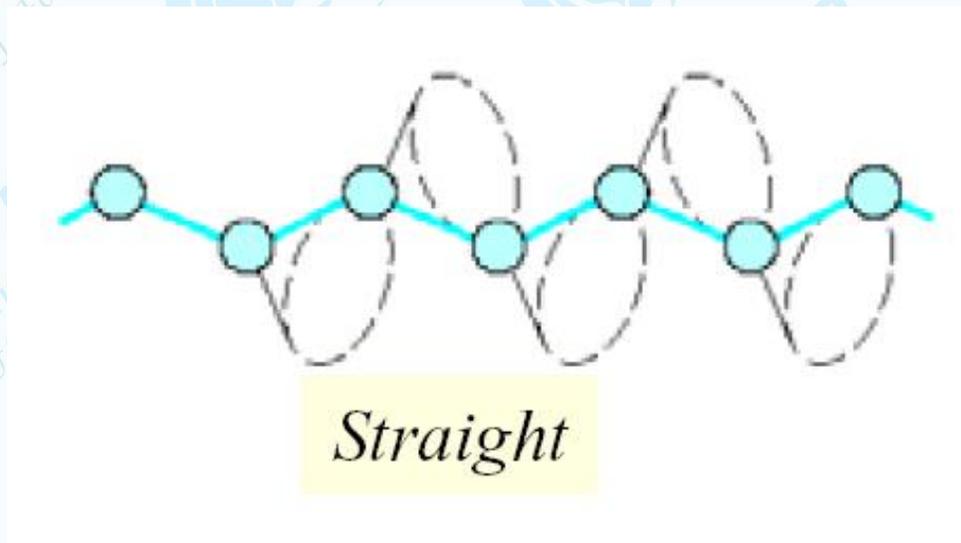
T_g - Temperatura de transição vítrea

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 desvondamento 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

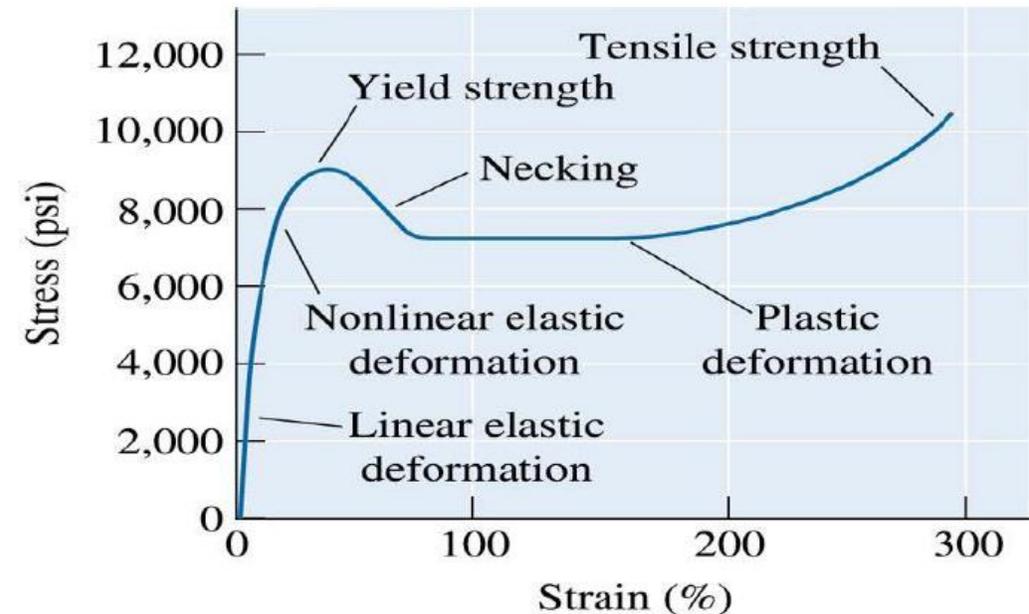
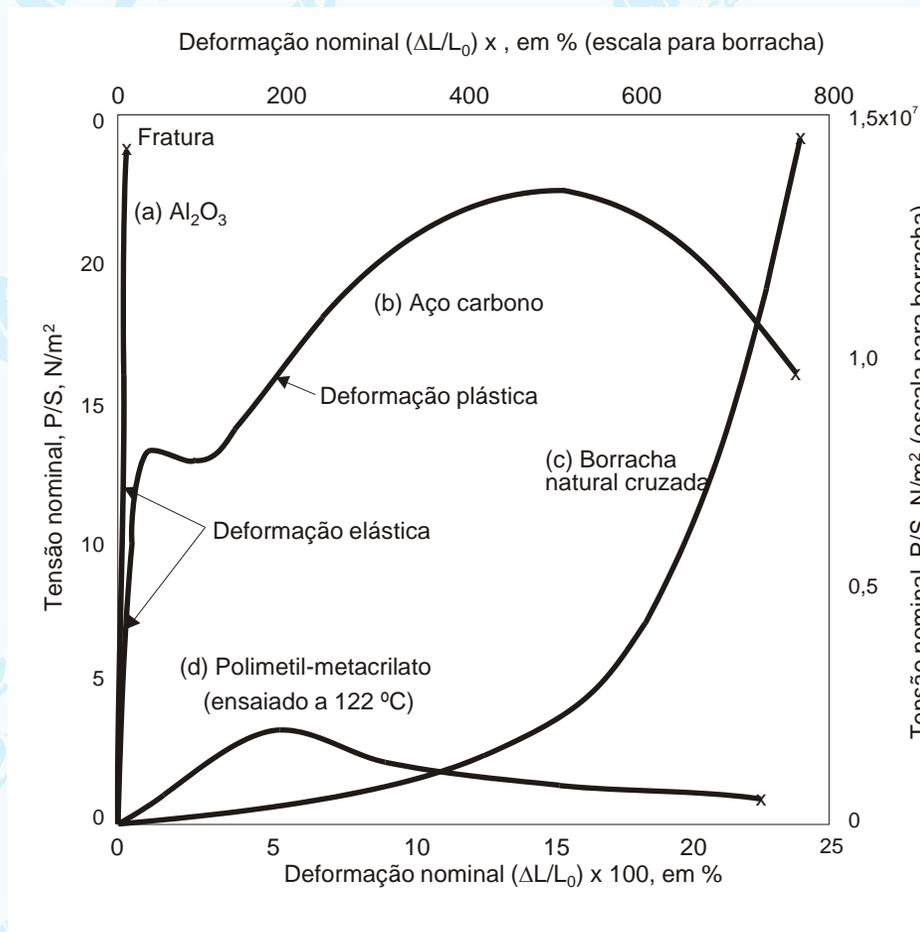


Figure 15.17 The stress-strain curve for 6,6-nylon, a typical thermoplastic polymer. (The Science and Engineering of Materials – by D.R. Askeland and P.P. Phule)

Propriedades mecânicas dos materiais



Ex6.06:

37) Construiu-se uma extrusora que só possuía zona de alimentação para estudar a influencia dos dois coeficientes de atrito dos grãos de polímero contra a superfície da rosca e contra a parede interna do cilindro, ambos a temperatura ambiente. O ensaio consistiu em combinar vários cilindros e duas roscas com diferentes rugosidades para as medidas da vazão de sólidos. Os coeficientes de atrito supracitados foram determinados por uma técnica independente. A figura 4 abaixo mostra as curvas de vazão obtidas em função do coeficiente de atrito dos grãos de polímero contra parede interna do cilindro, usando duas roscas (roscas 1 e 2) com rugosidades distintas. Admitindo-se que a rosca 1 possui menor coeficiente de atrito que a rosca 2, compare e analise as curvas do gráfico e assinale a alternativa correta.

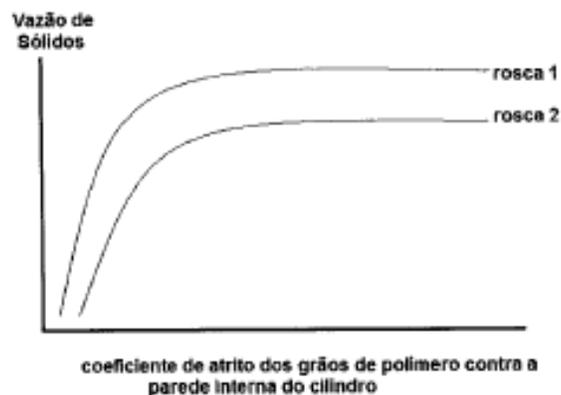


Figura 4 – Vazão de sólidos medidos combinando-se vários cilindros e duas roscas, cujos coeficientes de atrito contra os grãos de polímeros são diferentes.

A. a vazão de sólidos independe dos coeficientes dos grãos de polímero contra a superfície da rosca e a parede interna do cilindro.

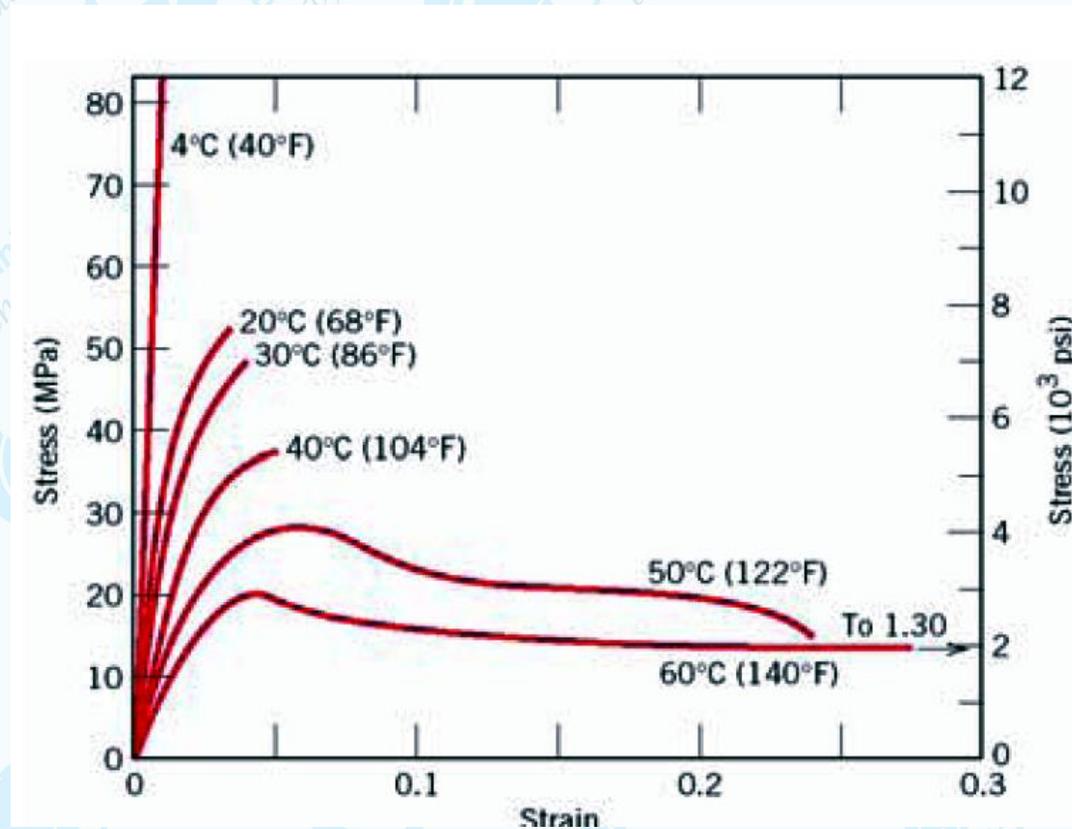
B. a vazão de sólidos só depende do coeficiente de atrito dos grãos de polímero contra a superfície da rosca.

C. a vazão de sólidos aumenta, quando o coeficiente de atrito dos grãos de polímero sólido contra a superfície da rosca aumenta.

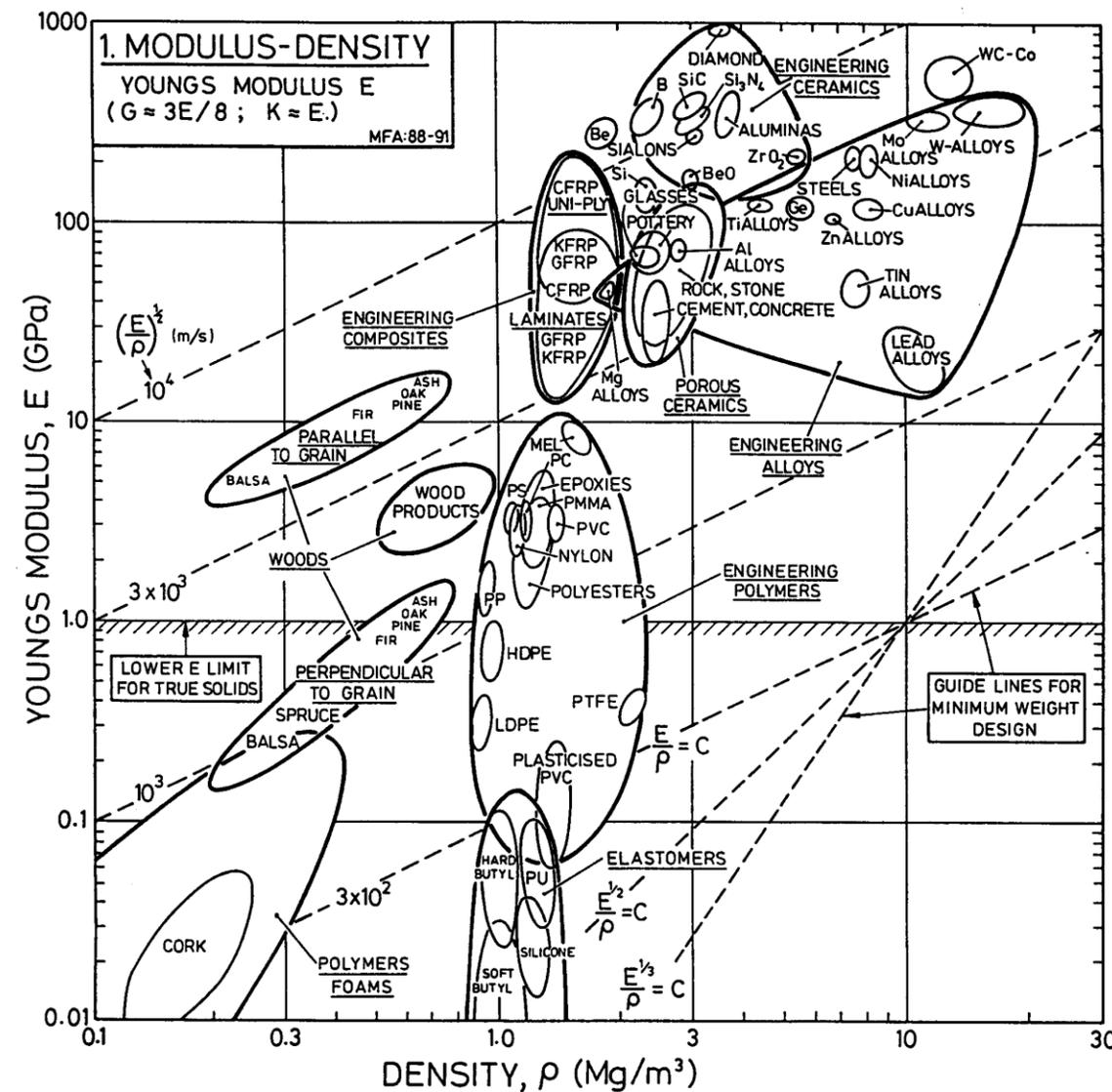
D. a vazão de sólidos aumenta, quando os coeficientes de atrito dos grãos de polímero contra a superfície do cilindro é muito baixo.

E. a vazão de sólidos aumenta e se torna constante ao aumentar o coeficiente de atrito dos grãos de polímero contra a parede interna do cilindro e o mesmo ocorre, numa menor magnitude, quando o coeficiente de atrito dos grãos de polímero contra a rosca reduz.

Propriedades mecânicas dos polímeros x temperatura

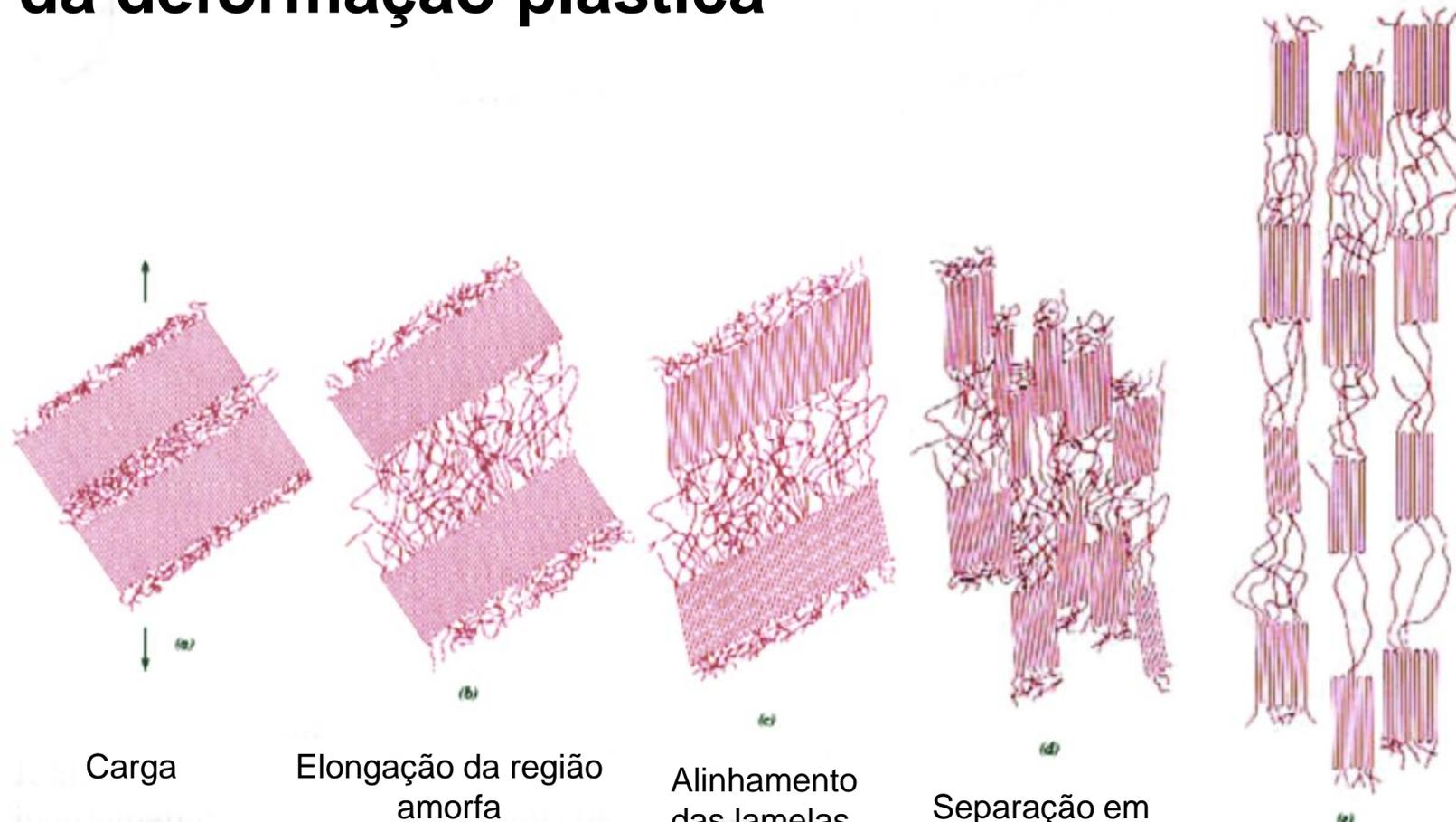


Efeito da temperatura no comportamento mecânico do PMMA



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

Ex6.07:

34) Duas curvas tensão aparente – deformação, mostradas na figura 2 abaixo, são obtidas em iguais condições de ensaio numa máquina universal de tração. Durante a deformação, notou-se que as reduções de área da seção transversal dos corpos de prova dos materiais A e B são, praticamente, iguais à medida que deformação prossegue até a fratura. Comparando-se as duas curvas, concluiu-se que:

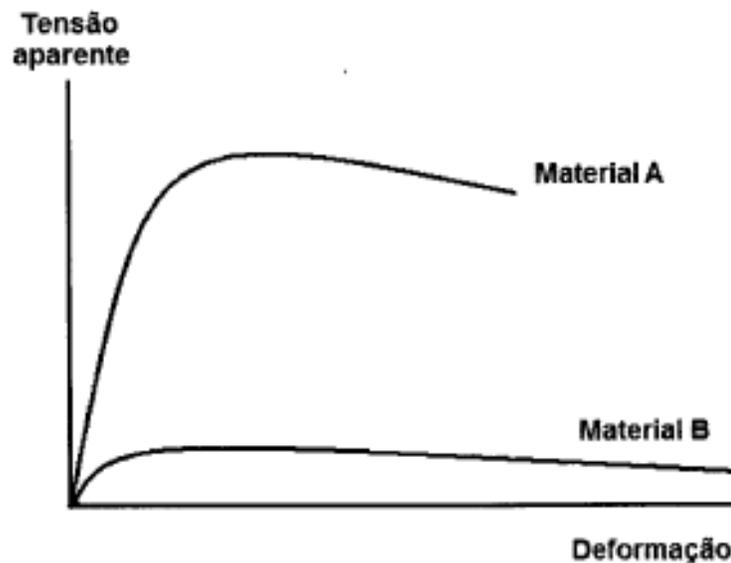
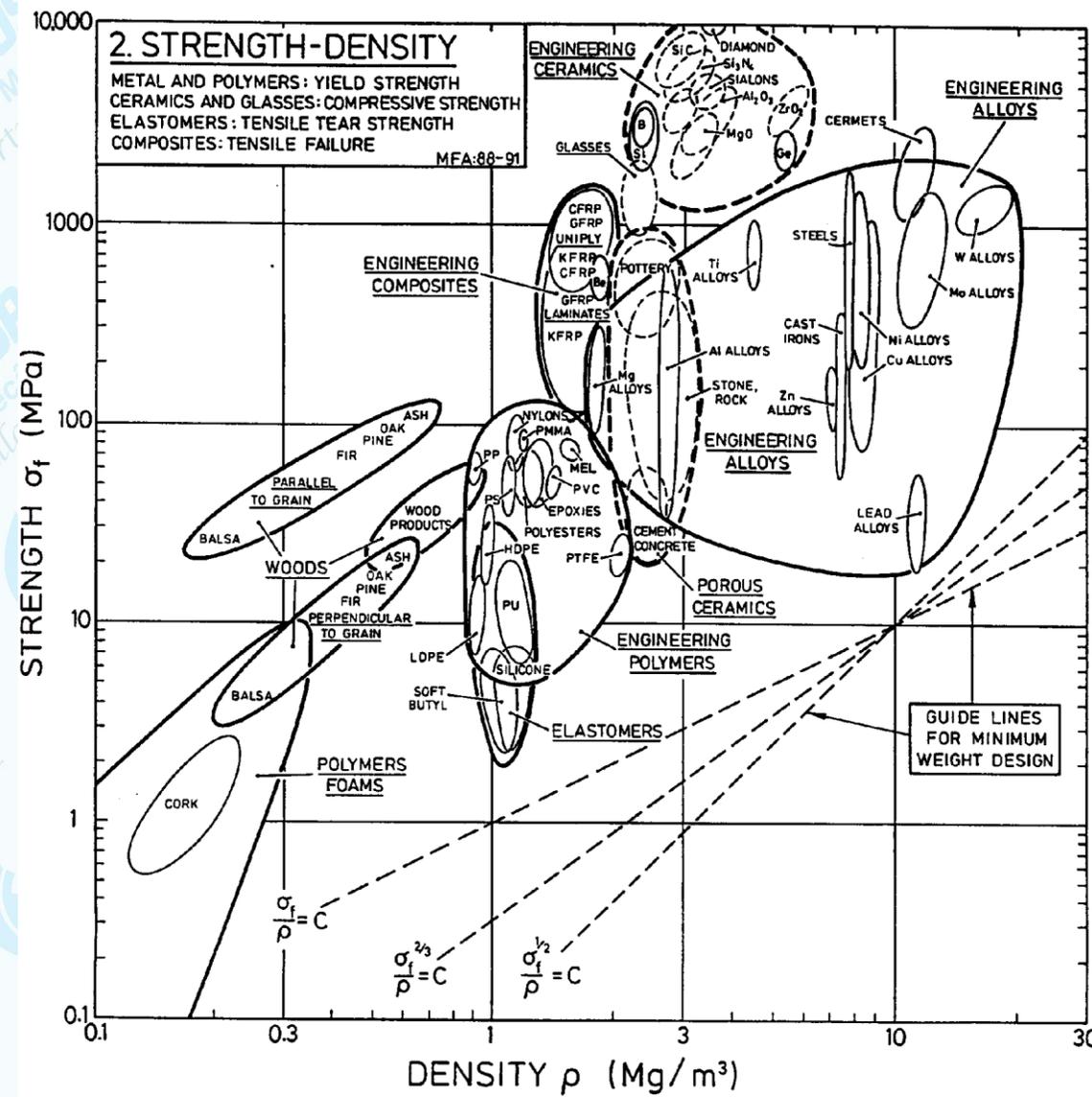


Figura 2 - Curvas tensão aparente–deformação de dois materiais em iguais condições de ensaio.

- A. O material B é o mais tenaz.
- B. O material A é o mais dúctil.
- C. O material A é o mais flexível.
- D. O material B é o mais rígido.
- E. O material A é mais rígido, mais tenaz e menos dúctil.



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

Material	PM	ρ g/cm ³	T _m °C	T _g °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 ν
Polímeros de uso geral					
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
Celulosas	3.400–28.000 (500–4.000)		14–55 (2–8)	5–40	
Polímeros de engenharia					
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	
Elastômeros termoplásticos					
Tipo poliéster		585 (85)	46 (6,7)	400	

Polímero	E^a [MPa (ksi)]	E^b_{Din} [MPa (ksi)]	LRT [MPa (ksi)]	Alongamento percentual na fratura
Termofixos				
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
Elastômeros				
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)	—

Módulo elástico médio GPa

Borracha.....	0,0035-3,5	PMMA.....	3,5
Nylon.....	2,8		

K_{IC}	MPa.m ^{-1/2}
PMMA	1
PS	0,8-1,1

DUREZA SHORE

Durômetro tipo A

Polímeros mais flexíveis

Durômetro tipo D

Polímeros mais rígidos

Ex6.08:

(43) Nas últimas décadas, é notório que o peso dos veículos automotores tem reduzido em função da substituição de peças metálicas por peças poliméricas. Assinale a alternativa correta que explicita a grandeza física responsável pela redução de peso dos veículos automotores proporcionada por essa substituição.

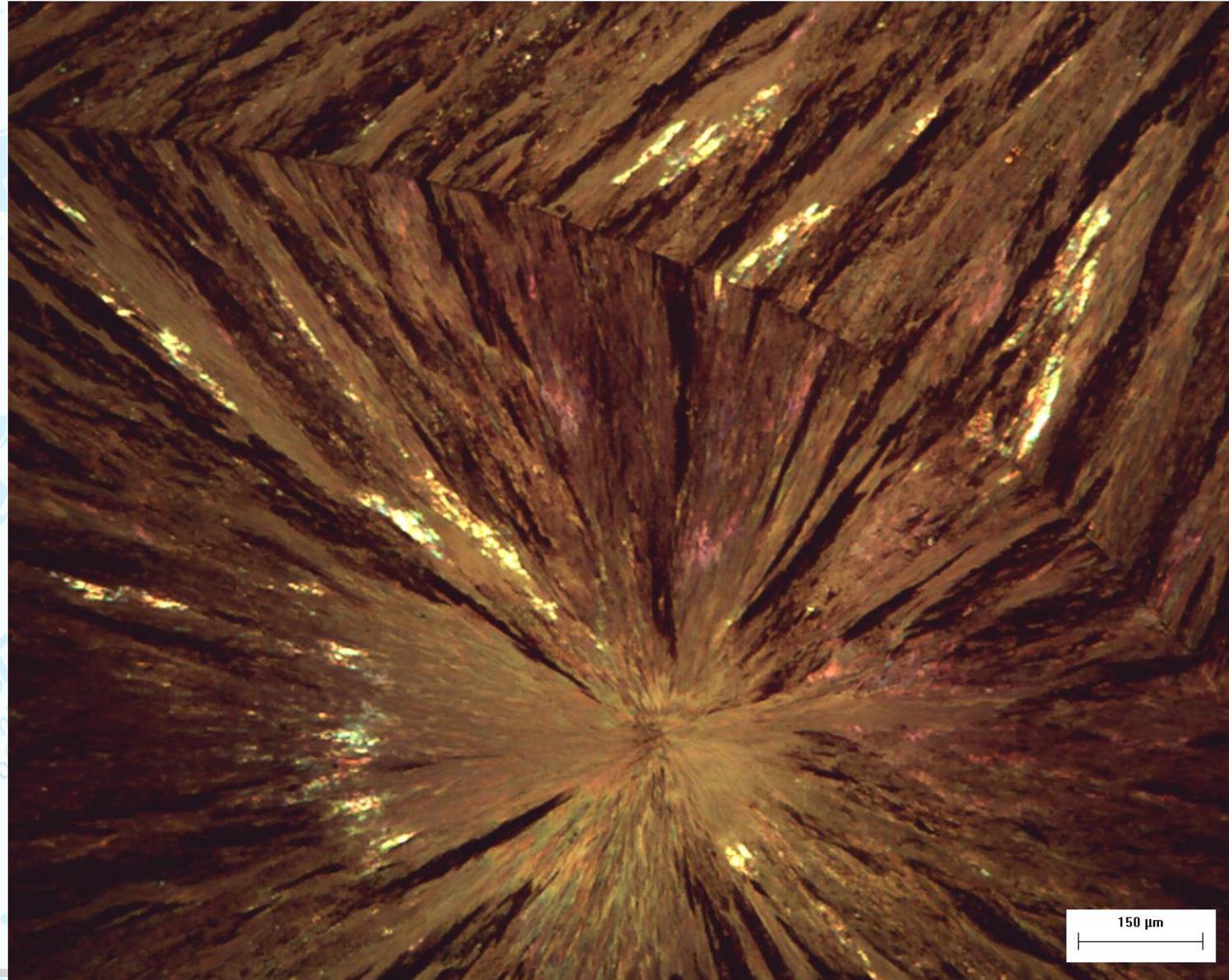
- A. volume específico
- B. condutividade térmica
- C. coeficiente de expansão térmica
- E. calor específico.
- E. capacidade calorífica

Experimento: Cristalização do Polietileno Glicol (Carbovax)

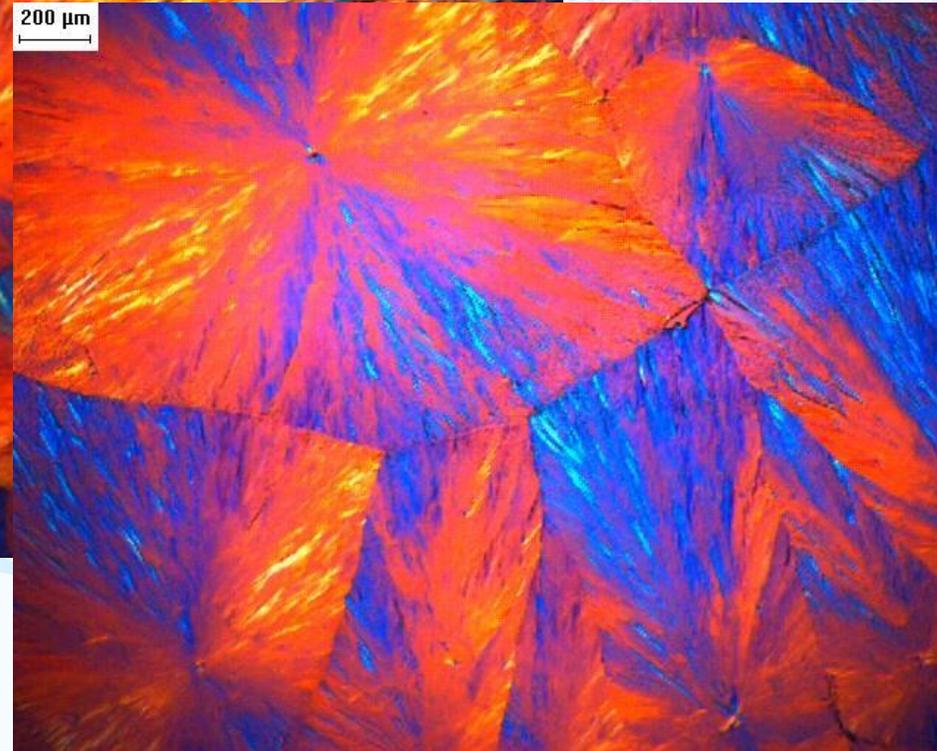
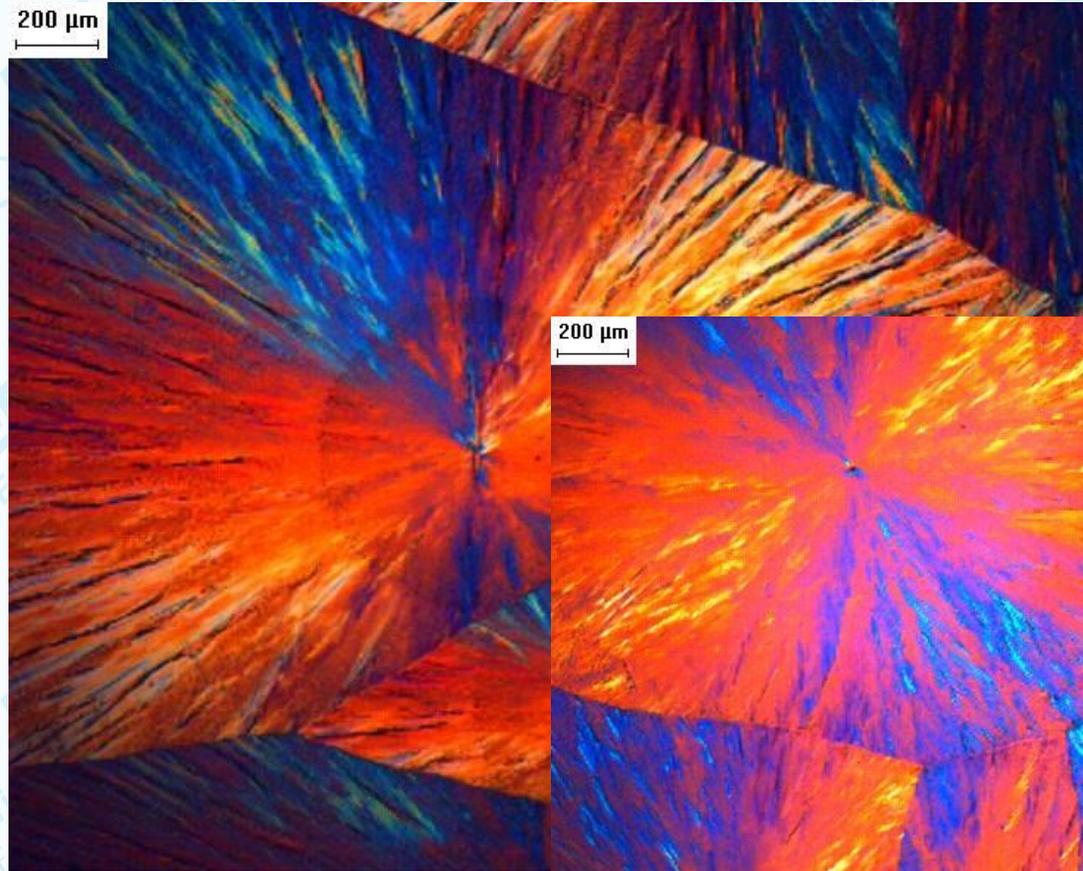
- ✓ *pelet* de PEG e colocá-lo sobre lâmina de vidro;
- ✓ aquecer até fusão cristalina T_m e pressionar com outra lâmina;
- ✓ amostra 01: desligar a chapa quente e esperar esfriar;
- ✓ amostra 02: refrigerar em água T_{amb} ;
- ✓ Amostra 03: refrigerar em água c/ gelo
- ✓ Observar em microscópio ótico com luz polarizada.

Material	PM	ρ g/cm ³	T_m °C	T_g °C	Cristalinidade (%)
Polietileno Glico			52	-22	

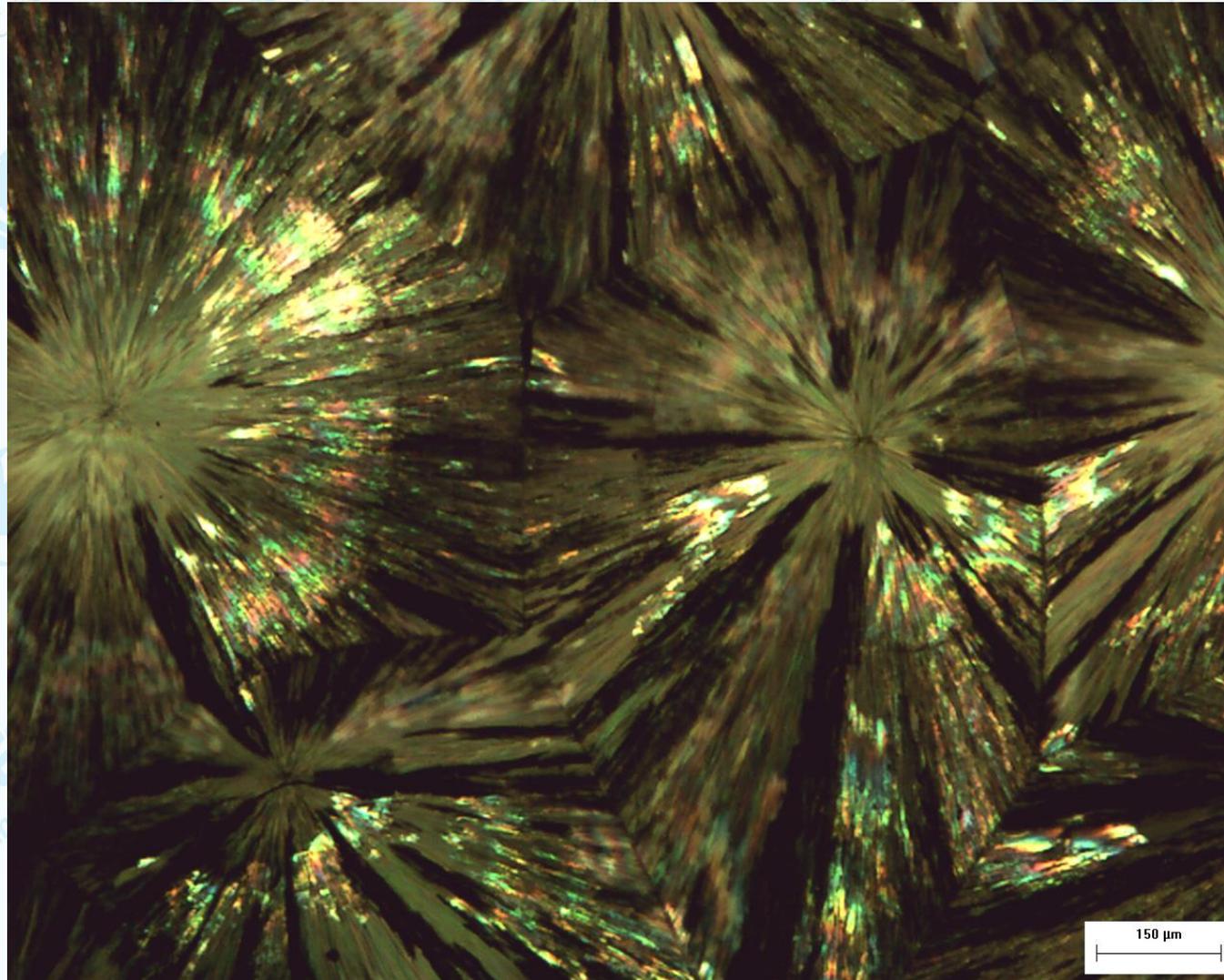
Amostra 01 – Resfriamento lento



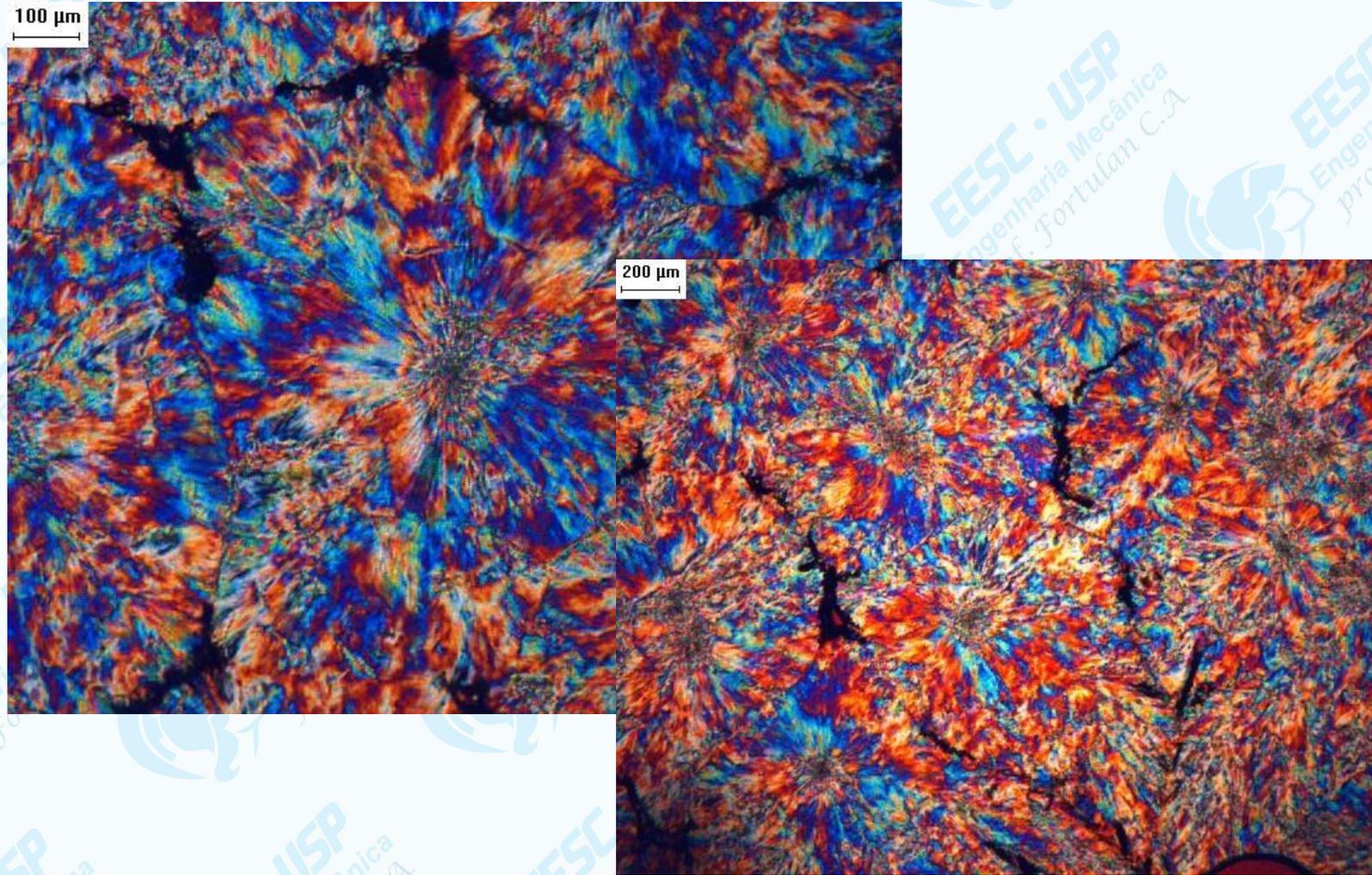
Amostra 01



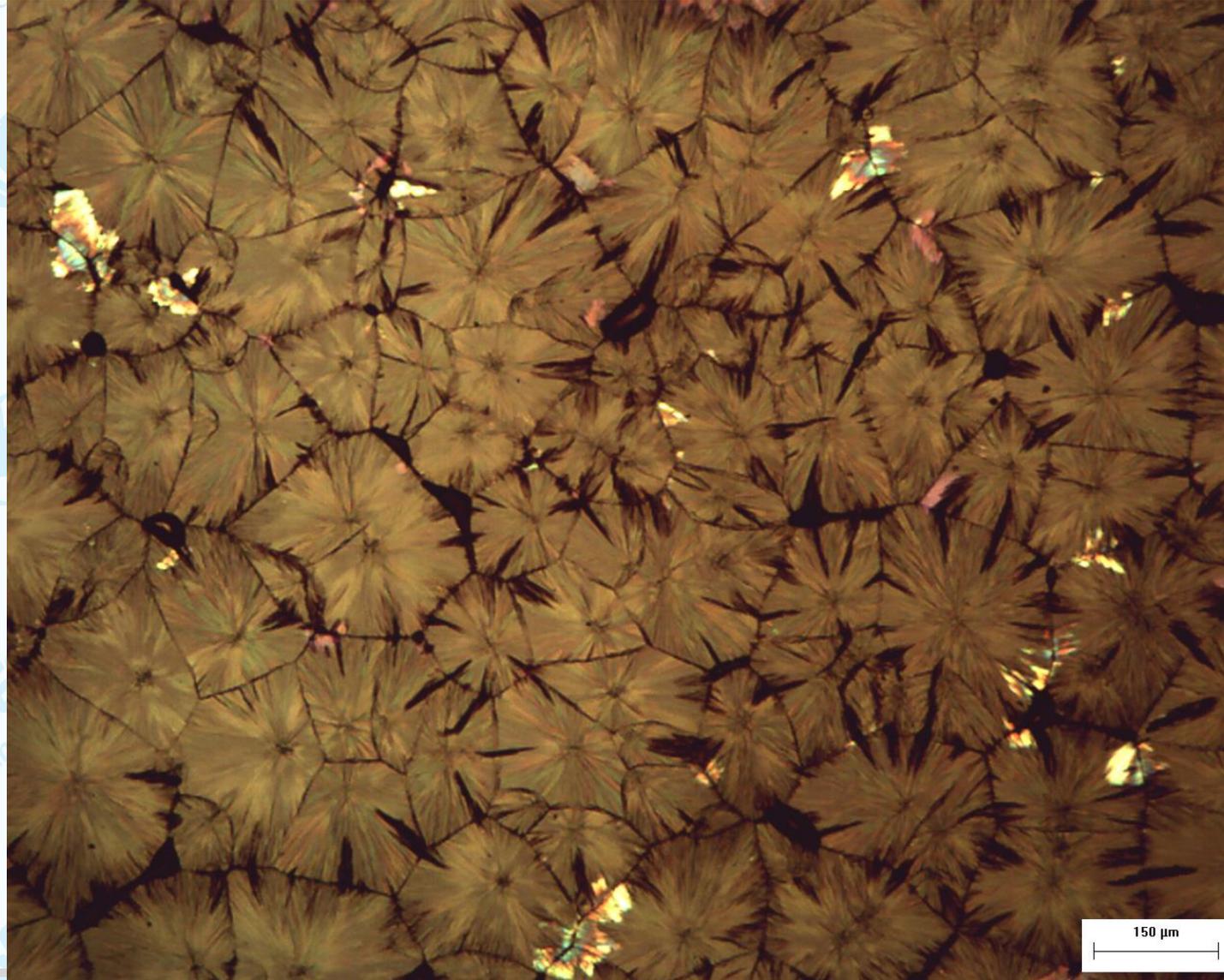
Amostra 02 – Resfriamento em água T_{amb} .



Amostra 02



Amostra 03 – Resfriamento em água com gelo.



Expansão térmica, variações na temperatura provocam deformações dos materiais. Em materiais isotrópicos homogêneos uma variação de ΔT K ($^{\circ}$ C) causa a deformação expressa por:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$$

ABNT 1045,	20-250 $^{\circ}$ C	13,0x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 4340,	20-10\0 $^{\circ}$ C	11,5x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 8620,	20-100 $^{\circ}$ C	11,6x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 304,	20-200 $^{\circ}$ C	17,1x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Fofo cinzento	37,8-548 $^{\circ}$ C	12,7X10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Ligas de alumínio – geral –	20-250 $^{\circ}$ C	25,0 x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Ligas de titânio – geral-	20-250 $^{\circ}$ C	9,2x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Al ₂ O ₃ 99,9%	20-400 $^{\circ}$ C	7,4x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Nylon 6.6	10-100 $^{\circ}$ C	100x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C

42) A conformação de polímeros é realizada por diferentes técnicas de processamento. Assinale a alternativa correta que contém a técnica de processamento adequada para produzir fios e cabos elétricos, perfis e tubos hidráulicos.

- A. extrusão
- B. injeção
- C. laminação
- D. coinjeção
- E. extrusão e sopro.

Bibliografia

- ASHBY, M.F. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992
- Crawford RJ; *Plastics Engineering*. Pergamon Press. 1987.
- MANO, E. B. *Polímeros como materiais de engenharia*. Editora Edgard Blücher Ltda. 1991.
- Principles of polymer systems, Ferdinando Rodrigues. McGraw-Hill Book Inc. 1970.
- SHACKELFORD, J. F. *Ciência dos Materiais*. Pearson. 2008.
- VAN VLACH, L. A. *Princípios de ciência dos materiais*. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1985, 427p.