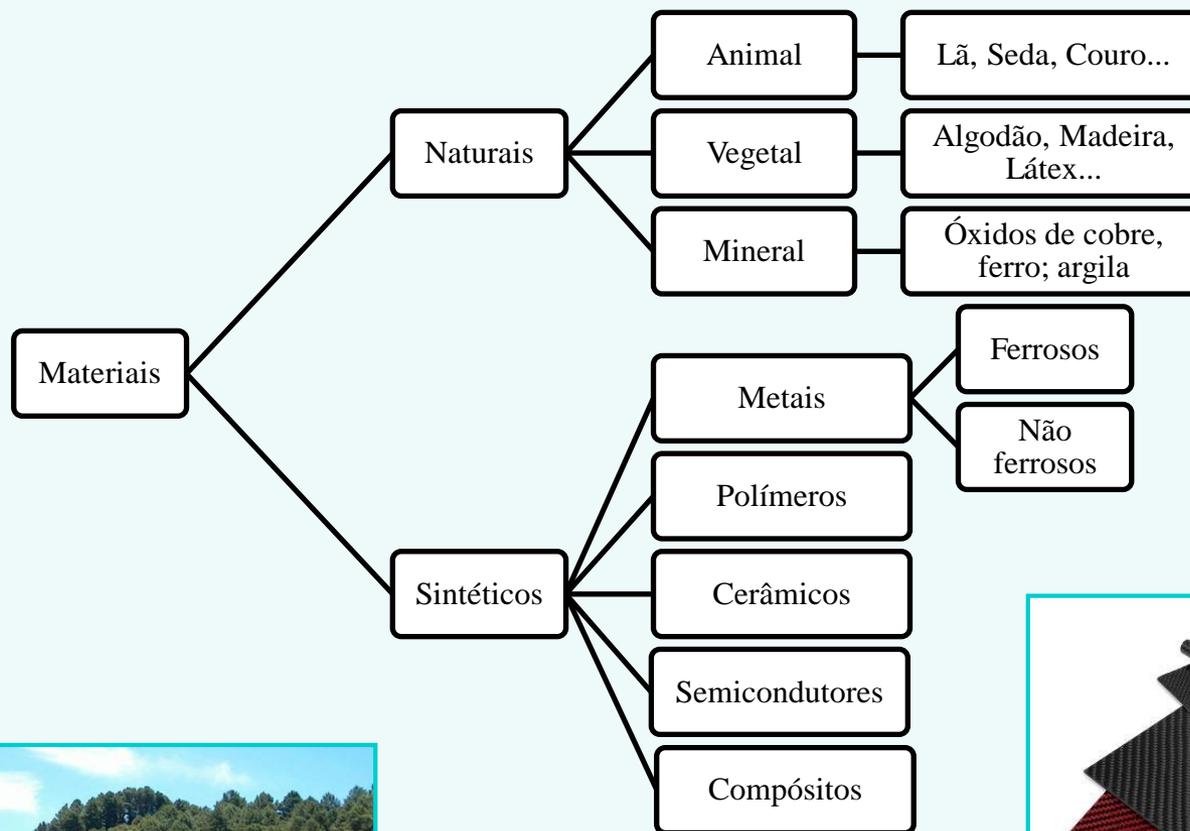


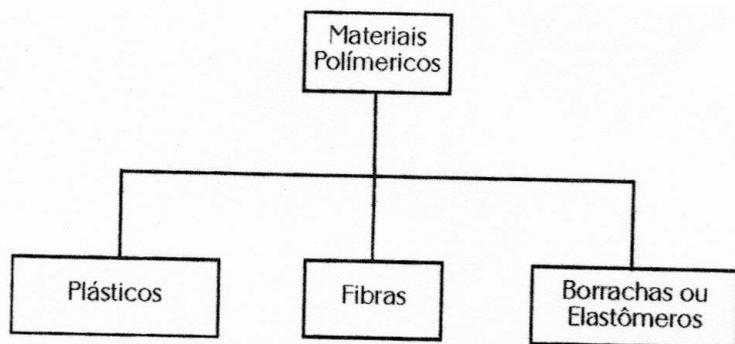
4. Materiais Não Metálicos



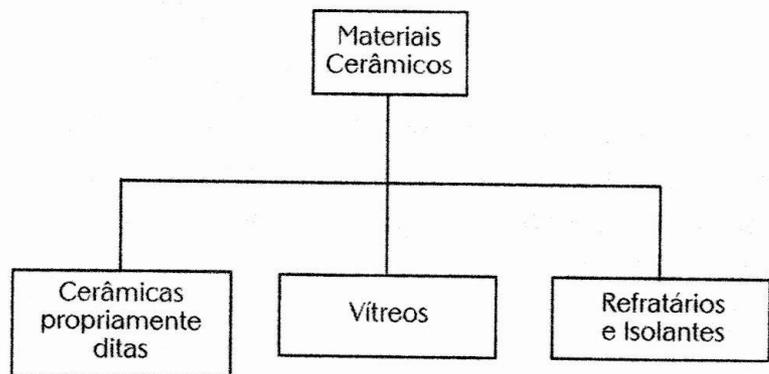
Tipos de Materiais por Origem



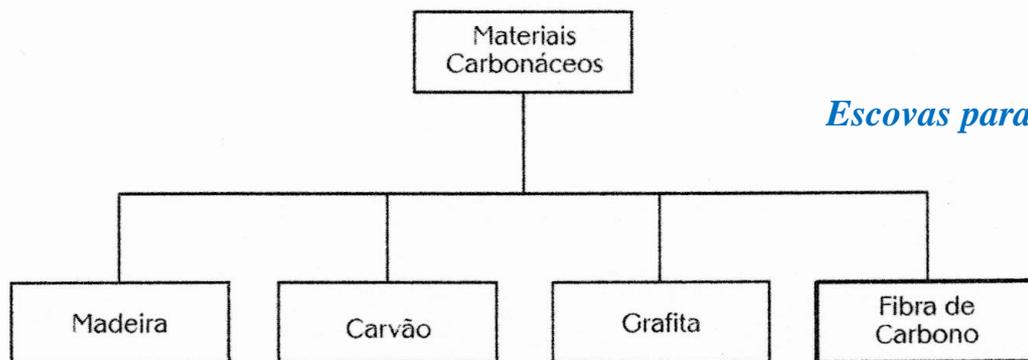
Materiais Não Metálicos



Produtos de PVC



Cerâmica refratária



Escovas para motores elétricos



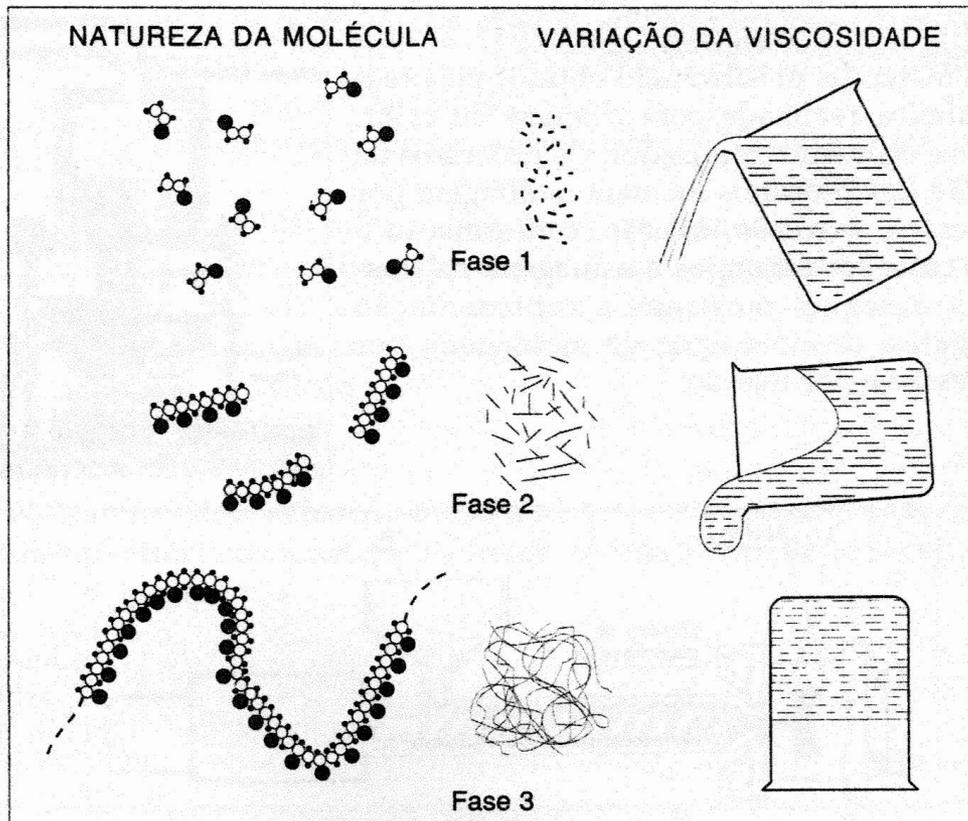
TABELA 4.1 Materiais não metálicos – aplicações e limitações

MATERIAIS NÃO METÁLICOS		APLICAÇÕES TÍPICAS	APLICAÇÕES GENÉRICAS	LIMITAÇÕES
MATERIAIS POLIMÉRICOS	Plásticos	Peças em geral, brinquedos, utensílios domésticos, eletroeletrônicos, tubos, forros	Projetos industriais em geral e indústria automobilística, aeronáutica, construção civil	Propriedades mecânicas. Temperatura. Exposição aos raios ultra-violetas
	Fibras	Tecidos. Compósitos		
	Borrachas ou Elastômeros	Pneumáticos, correias, utensílios pessoais (luvas, botas, etc.).		
MATERIAIS CERÂMICOS	Cerâmicas	Telhas, tijolos, azulejos e revestimentos em geral. Utensílios domésticos. Revestimentos. Rolamentos	Construção civil. Uso geral	Tenacidade e resiliência.
	Vidros	Para-brisas, janelas de automóveis. Vidraças em geral. Utensílios domésticos. Revestimentos	Indústria automobilística, construção civil. Uso geral em vasilhames e utensílios	
	Refratários e isolantes	Revestimentos de fornos, caldeiras e reatores	Projetos Industriais	
MATERIAIS CARBONÁCEOS	Madeira e Bambus	Móveis. Esquadrias. Forros e assoalhos	Construção civil. Uso geral	Combustibilidade. Propriedades mecânicas
	Carvão	Combustível. Redução primária do ferro e estanho	Uso geral	Danos ambientais pela queima
	Grafite	Eletrodos. Ânodos. Escova de motores e geradores. Tubos de permutadores de calor	Projetos industriais de condução de calor. Projetos elétricos e de eletrólise. Projetos de proteção catódica	Propriedades mecânicas

Materiais Não Metálicos



Materiais Poliméricos



O plástico é o único material que foi realmente “inventado”. Na década de 1860, o norte-americano J.W. Hyatt buscava um material para substituir marfim em bolas de bilhar.

Acrescentando cânfora ao nitrato de celulose e submetendo essa mistura a uma determinada pressão e temperatura, ele obteve um material moldável que denominou **celuloide**.

O belga L.H. Baekeland desenvolveu o primeiro plástico feito por meio de síntese, o **fenol-formaldeído**.

Estudando sobre polimerização, ele conseguiu viabilizar um método de reações controladas para produzir resinas em quantidades viáveis comercialmente. Em uma autoclave a 200°C ele obteve uma massa cor de âmbar. Inventou-se a **baquelite**, o primeiro plástico sintético.

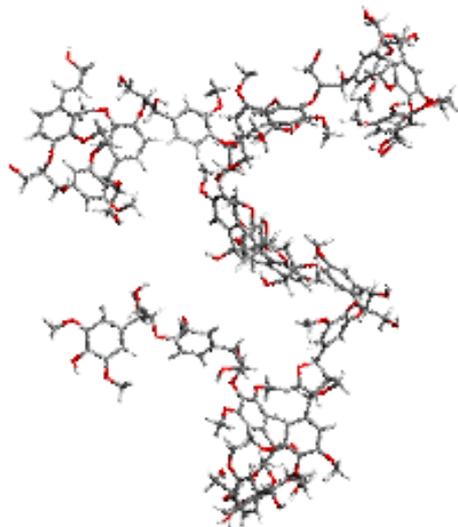
Materiais Poliméricos

	TIPO	EXEMPLOS	CARACTERÍSTICAS GERAIS
Polímeros	Termoplásticos	Policarbonato, Poliestireno Polipropileno, Policloreto de vinila, Polietileno Metacrilato, Fluoro-plásticos etc.	- Alta deformabilidade - Sensível ao calor - Termo deformável - Dúctil - Alto alongamento
	Termorrígidos	Resinas fenólicas, Resinas úricas, Resinas melamínicas, Resina poliéster, Resina epóxi, poliuretano	- Baixa deformabilidade - Não é termo deformável - Frágil - Baixo alongamento
	Elastômeros	-Borracha natural -Borracha sintética	- Altíssima deformabilidade - Altíssima ductilidade - Alto alongamento
	Natural	Algodão, Celulose, Látex, Proteínas, ...	Diversas aplicações dentro e fora da engenharia.

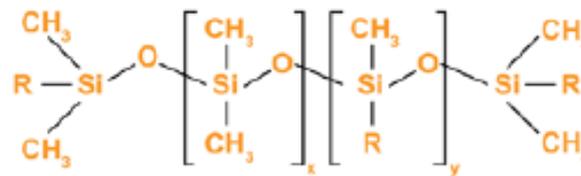
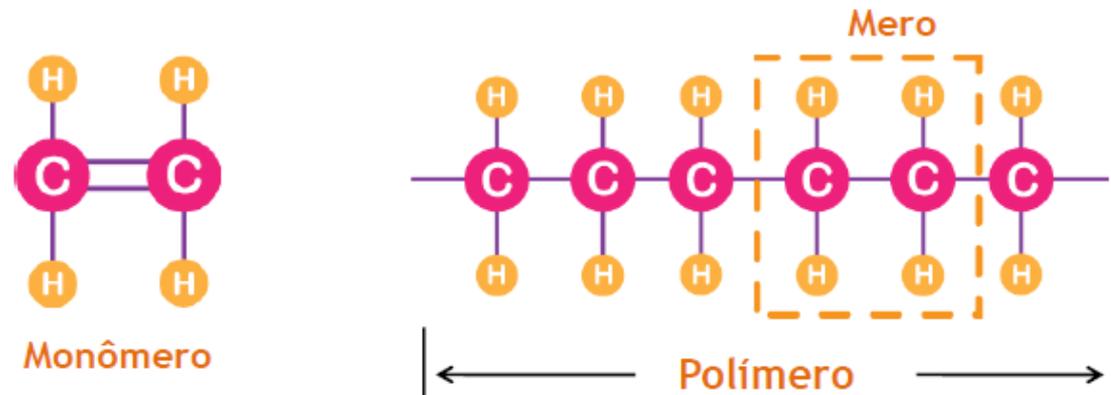


Materiais Poliméricos

1. **Moléculas dos Polímeros:** materiais orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos, de alto peso molecular (macro-moléculas), cuja estrutura molecular consiste na repetição de pequenas unidades, chamadas meros, que compõem as macromoléculas.
2. **Monômero:** moléculas constituída por um único mero.
3. **Polimerização:** reações químicas intermoleculares pelas quais os monômeros são ligados, na forma de meros, à estrutura molecular da cadeia.



Proteína



R = -OH, -CH=CH₂, -CH₃, or another alkyl or aryl group

Silicone

(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)

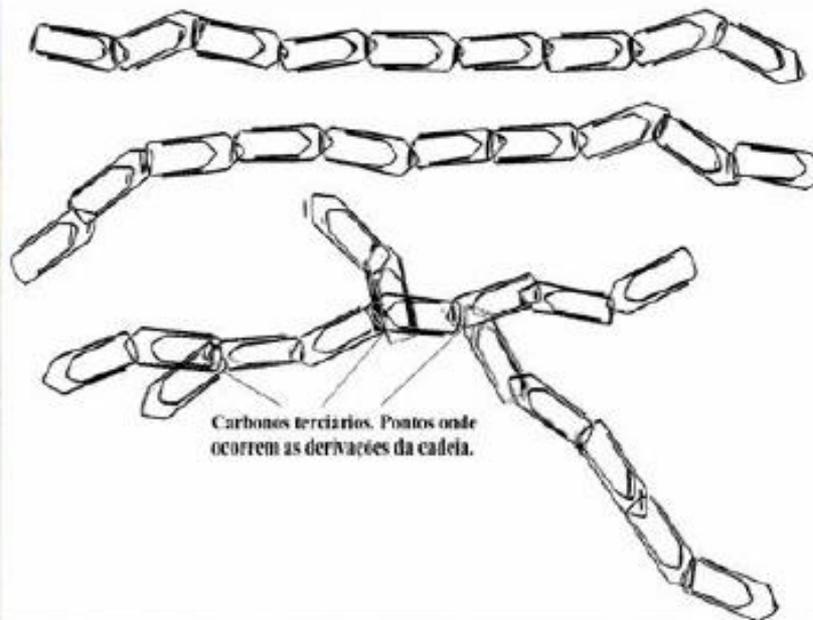


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Materiais Poliméricos - Macromoléculas



■ CADA CLIPE PODE SER ENTENDIDO COMO UMA UNIDADE DE REPETIÇÃO



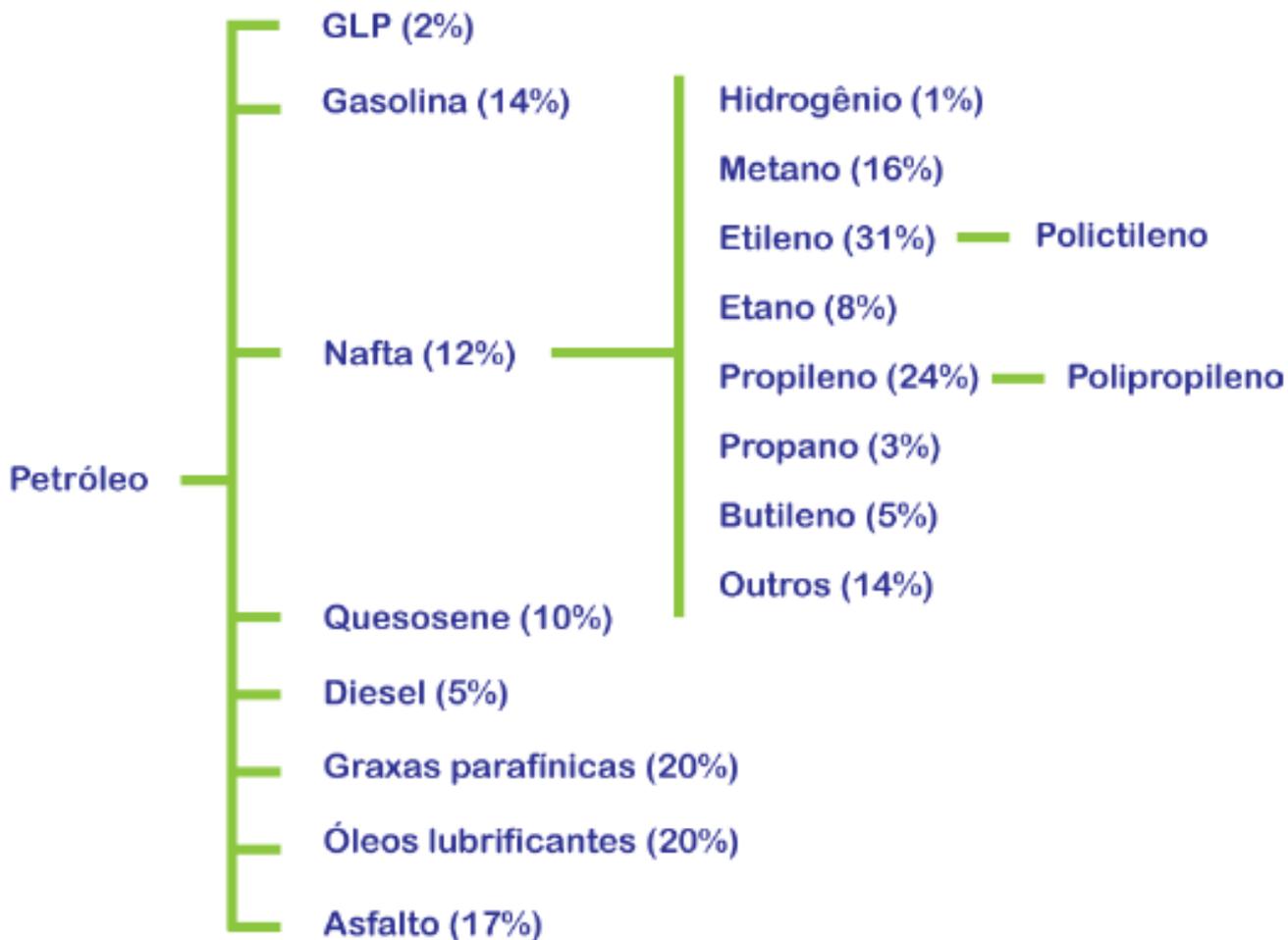
■ PONTOS DE DERIVAÇÃO SÃO "CARBONOS" QUE SE LIGAM EM DIREÇÕES DIFERENTES

(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Petróleo: Matéria Prima para Plásticos

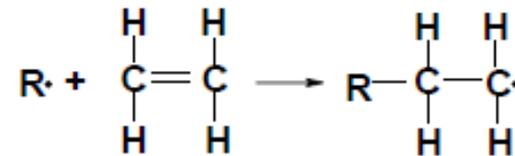


Polimerização

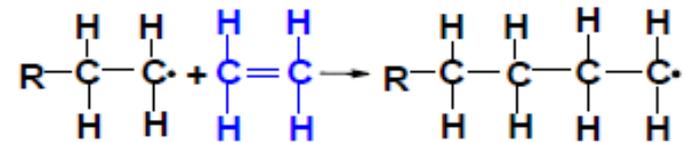
Os monômeros reagem entre si formando uma longa sequência de unidades repetitivas (meros). Os mecanismos de polimerização podem ser classificados em: **adição e condensação**.

Polimerização por adição (por reação em cadeia):

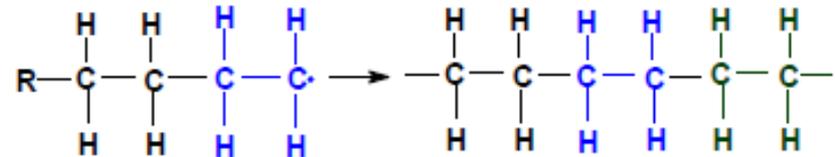
1) **Iniciação:** formação de sítio reativo a partir de uma espécie iniciadora (ou catalisadora) e monômero.



2) **Propagação da reação:** crescimento linear da molécula.



3) **Terminação da reação:** desativação do sítio reativo



Ex.: Polipropileno, cloreto de polivinila e poliestireno.

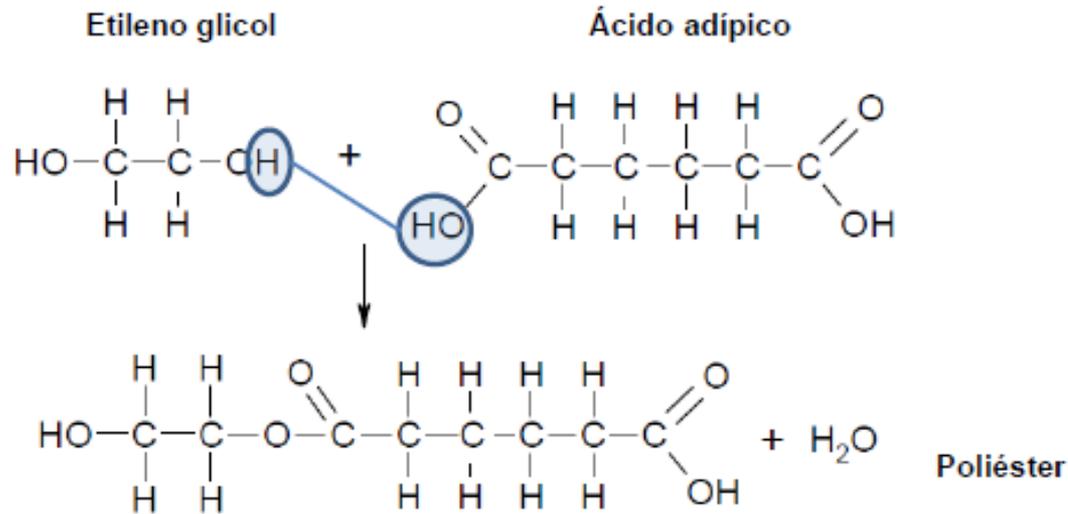
Curiosidade: período para desenvolver uma molécula com 1000 unidades mero é da ordem de 10^{-3} s.

(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



Polimerização

Polimerização por condensação (ou reação em estágios): neste processo, as reações químicas intermoleculares ocorrem por etapas, e em geral envolvem mais de um tipo de monômero.



Ex.: Poliéster, náilon e policarbonato.

Esse processo se repete sucessivamente, produzindo, neste caso, uma molécula linear e um subproduto de peso molecular pequeno.

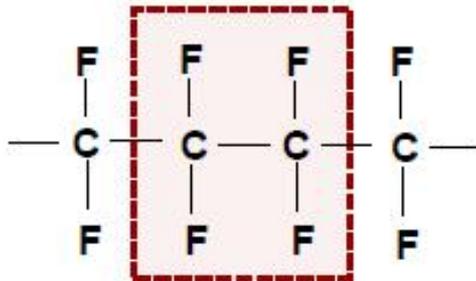
(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

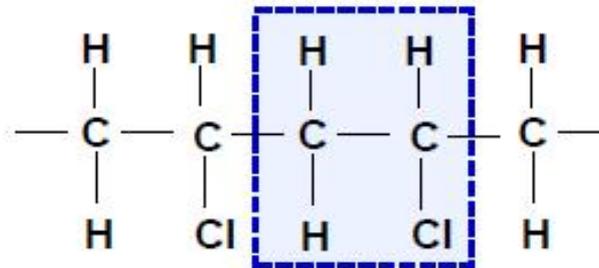
Alguns Exemplos

Politetrafluoroetileno
(PTFE) Teflon



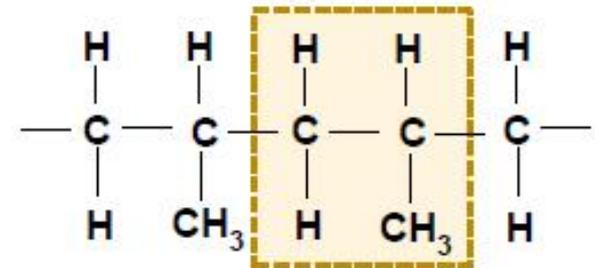
Unidade mero

Cloreto de polivinila
(PVC)



Unidade mero

Polipropileno
(PP)



Unidade mero

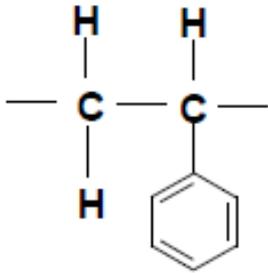


(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)

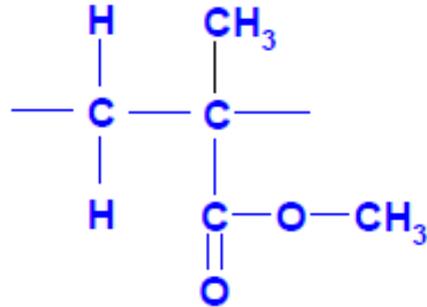


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

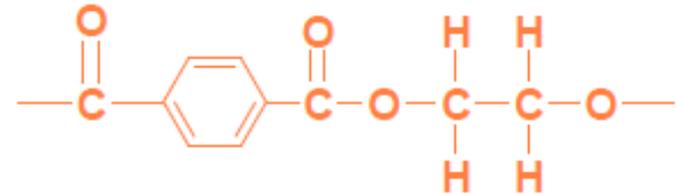
Alguns Exemplos



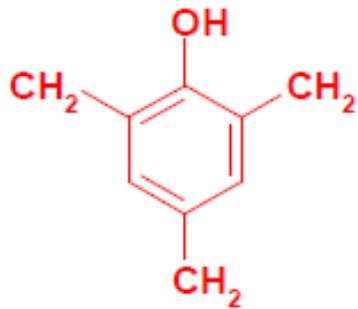
Poliestireno (PS)



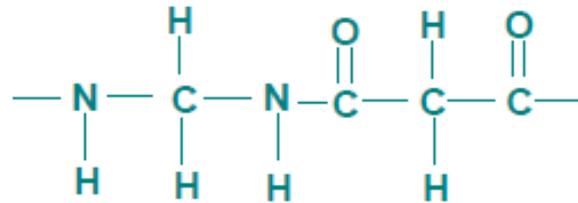
Polimetil metacrilato (PMMA)



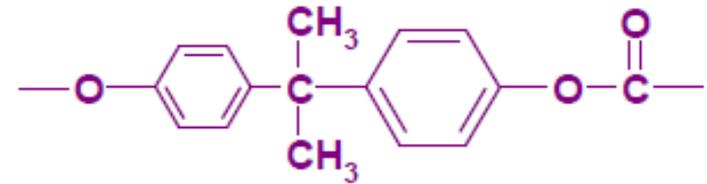
Polietileno tereftalato (PET)



Fenol-formaldeído (Baquelite)



Polioxametileno adipamida (náilon)



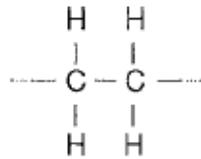
Policarbonato

(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)

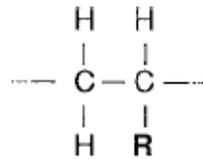


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Alguns Exemplos



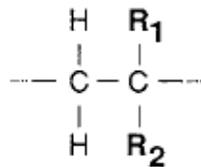
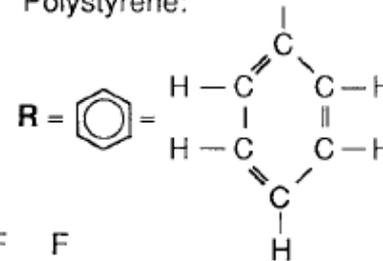
Polyethylene



Polyvinyl chloride: $\text{R} = \text{Cl}$

Polypropylene: $\text{R} = \text{CH}_3$

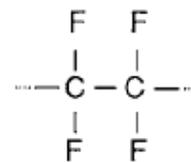
Polystyrene:



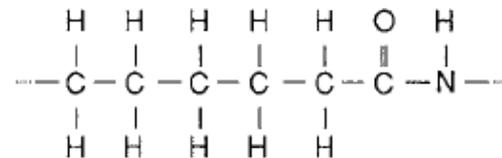
$\text{R}_1 = \text{CH}_3$

$\text{R}_2 = \text{COOCH}_3$

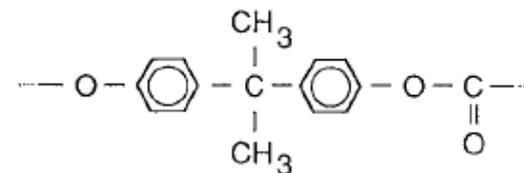
Polymethyl methacrylate



Polytetrafluoroethylene



Nylon 6



Polycarbonate

Figure 3.12 Molecular structure of several linear polymers. All but the last two are related to the polyethylene structure by simple substitutions, R , R_1 and R_2 , or F .



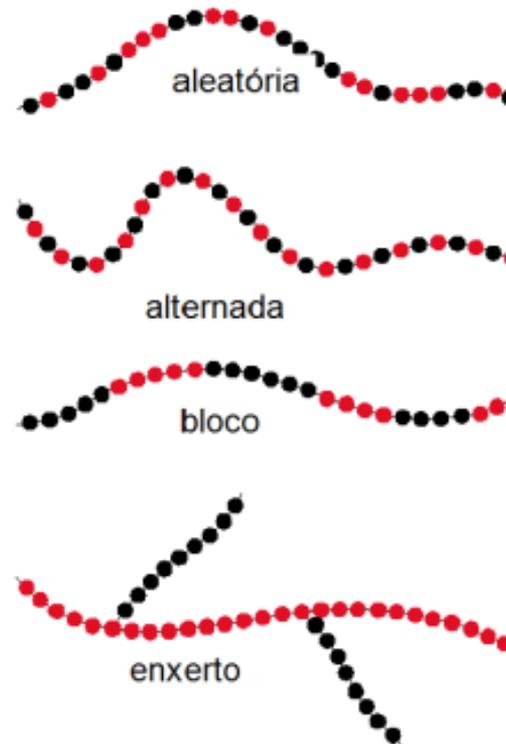
Copolímeros

- Homopolímero: polímero derivado de apenas uma espécie de monômero.
- Copolímero: polímero derivado de duas ou mais espécies de monômero

Dois ou mais monómeros se polimerizam juntos

- **aleatório** – A e B variam aleatoriamente na cadeia
- **alternado** – A e B se alternam na cadeia
- **bloco** – grande blocos de A se alternam com grandes blocos de B
- **Enxerto** – cadeias de B se se enxertam em A

A – ● B – ●



(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



Classificação dos Polímeros

Termoplásticos

- Necessitam de calor para serem moldados (amolecem quando aquecidos e endurecem quando são resfriados);
- Processo reversíveis e que podem ser repetidos (transformação física), ou seja, são recicláveis;
- Materiais moles e dúcteis;
- Polímeros com cadeias lineares e ramificados (com força de interação relativamente fracas);
- Maior utilização industrial (70% em peso da quantidade total de plásticos)



Ex.: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poli(cloreto de vinila) PVC, poli(metacrilato de metila) (PMMA), Poliestireno (PS).



(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Classificação dos Polímeros

Termofixos

- Cadeias com alta densidade de ligações cruzadas (covalentes);
- Ligações entre as cadeias impedem o movimento rotacional e vibracional da cadeia em alta temperatura;
- Permanecem rígidos com o aumento da temperatura;
- Temperatura excessiva promoverá o rompimento das ligações cruzadas e a degradação do polímero, ou seja, polímeros termofixos não são recicláveis;

Ex.: Adesivos, tintas, resina fenólica (baquelite), resina epóxi, resinas de poliéster, embutimento de amostras metalográficas.



(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Aditivos para Polímeros

Substâncias exógenas que modificam ou melhoram as propriedades mecânicas, químicas e físicas tornando o polímero útil para determinado serviço

- ➔ ENCHIMENTOS – melhora o limite de resistência à tração e compressão, a resistência à rasgadura, tenacidade estabilidade dimensional e térmica.
 - ➔ PLASTICIZANTES – melhora a ductibilidade, flexibilidade e tenacidade. Reduz a dureza e rigidez
 - ➔ ESTABILIZADORES – evita deterioração do polímero causada pela exposição à luz e a oxidação
 - ➔ CORANTES – conferem uma cor específica ao polímero
- RETARDADORES DE CHAMA – conferem ao polímero resistência à inflamabilidade

(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Conformação de Polímeros

- Moldagem por Compressão.
- Moldagem por Transferência.
- Extrusão.
- Injeção.
- Insuflação.
- Fundição.

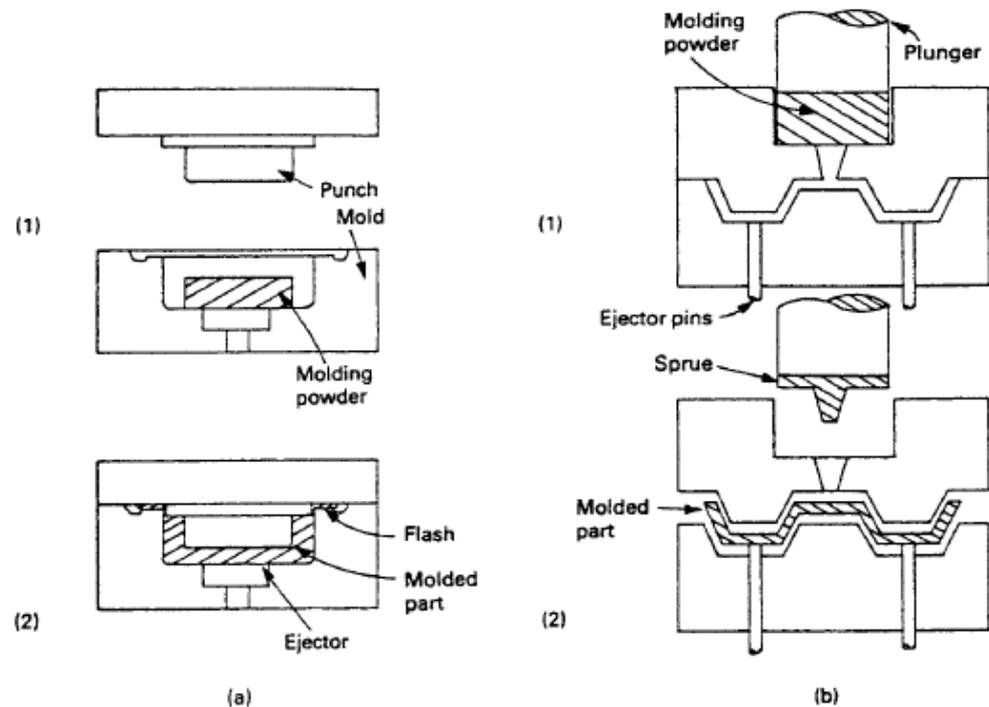
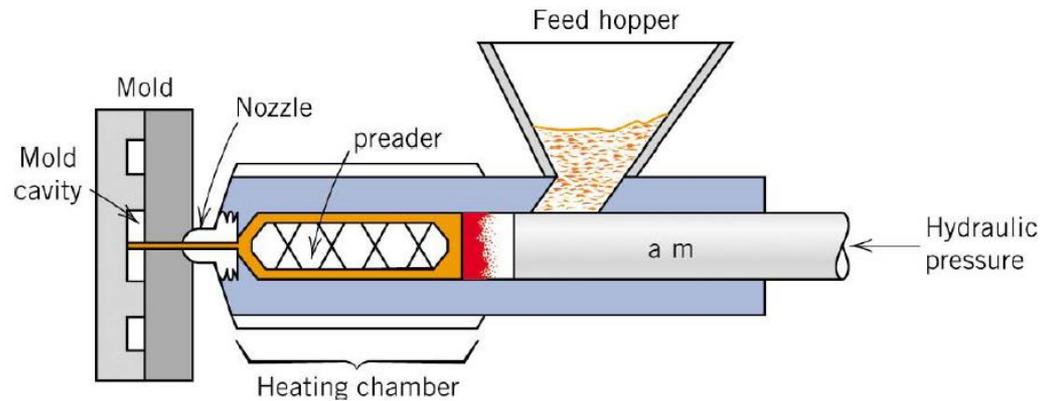
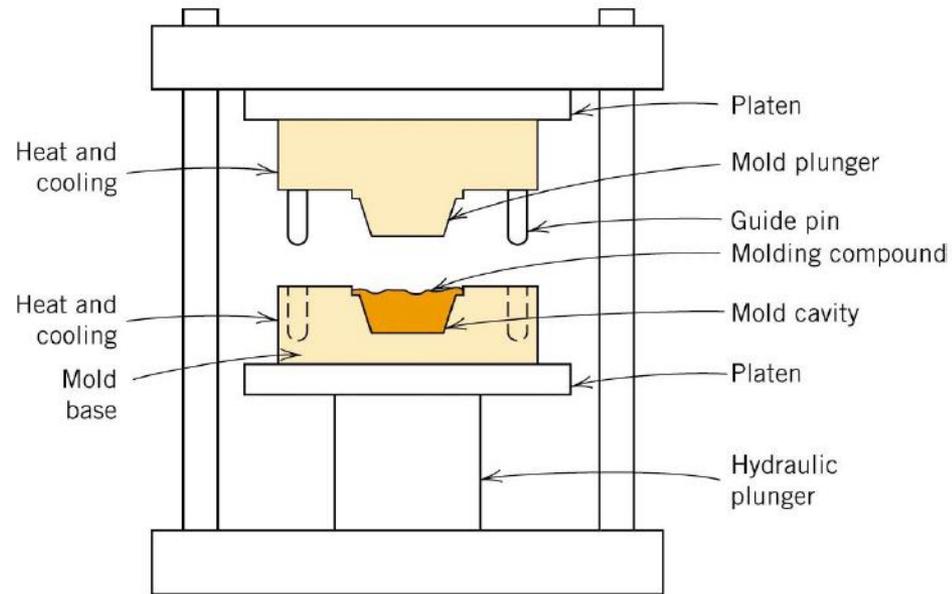


Figure 3.11 Forming of plastics by (a) compression molding and (b) transfer molding. (From [Farg 89] p. 91; used with permission.)

Conformação de Polímeros

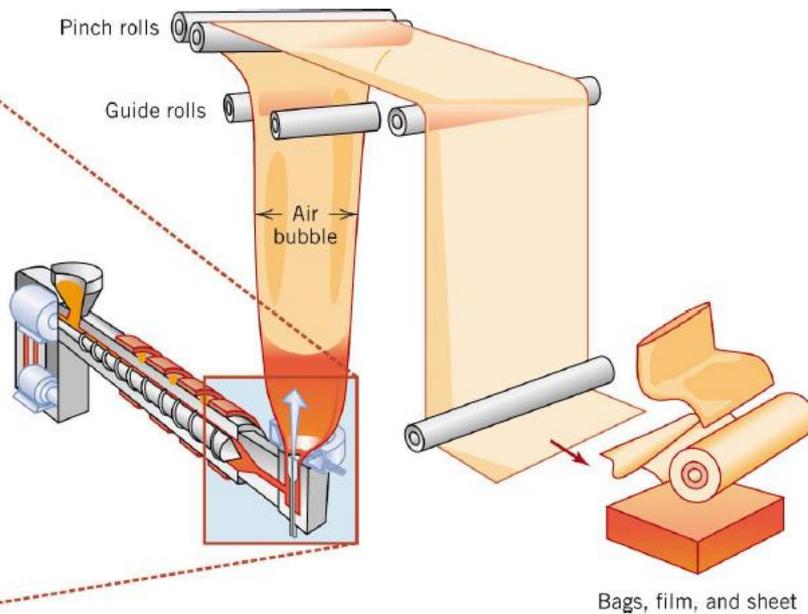
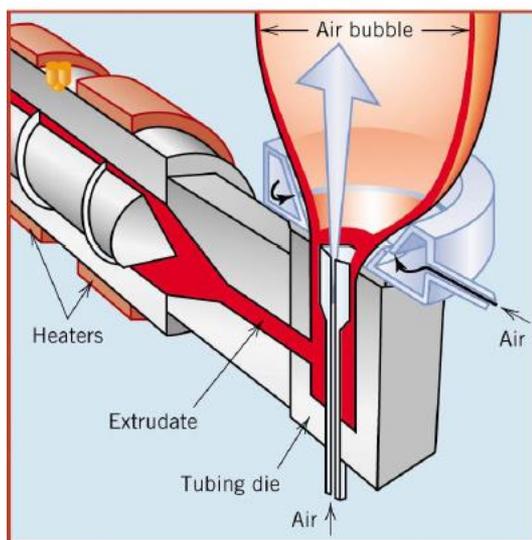
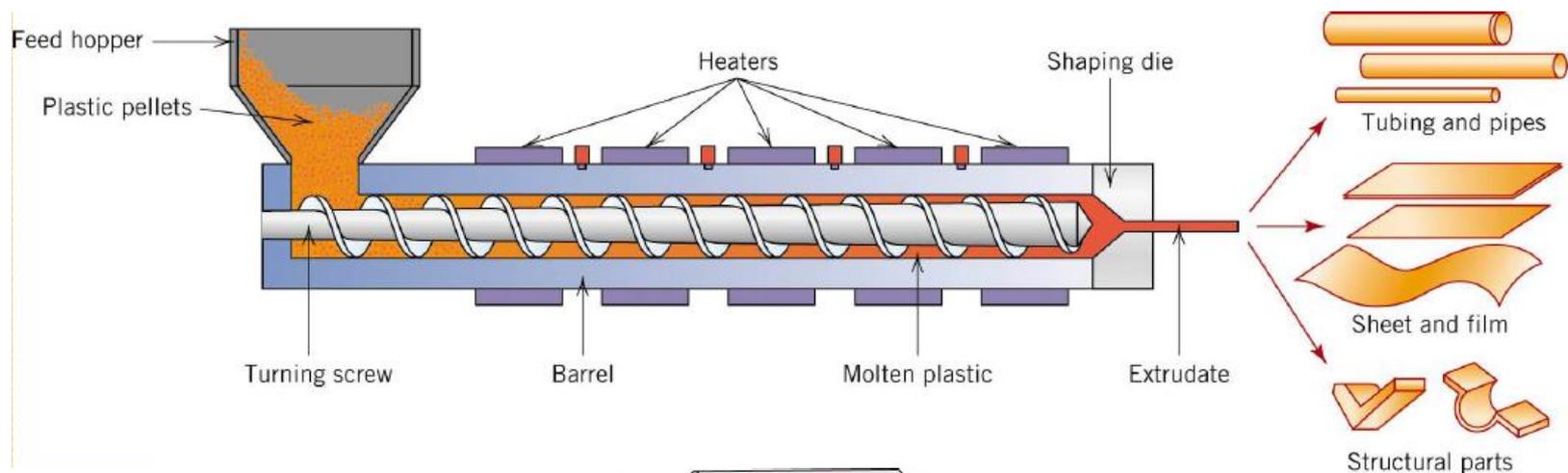
Compressão



Injeção



Conformação de Polímeros



Extrusão

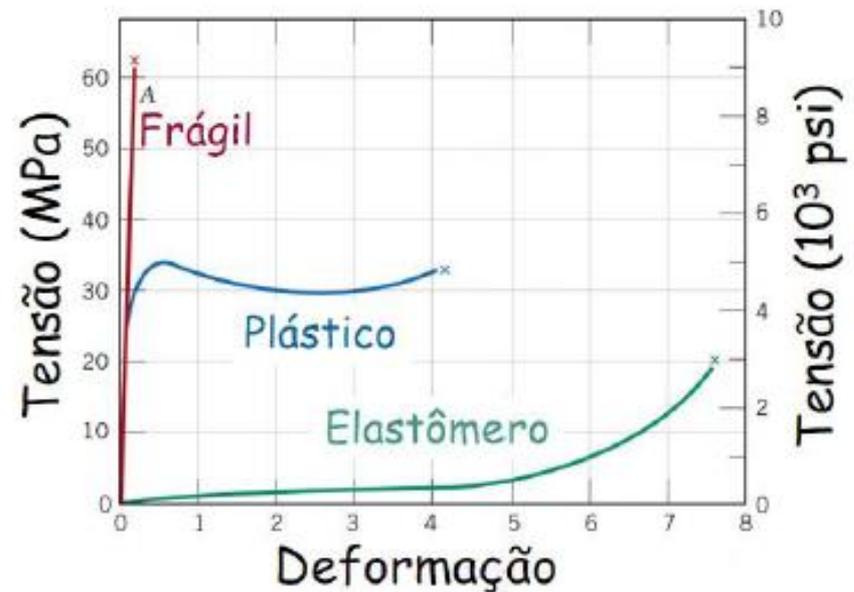
Insuflação



Comportamento tensão-deformação

São encontrados 3 tipos de comportamento tensão x deformação:

- Polímero frágil: sofre fratura enquanto se deforma elasticamente.
- Polímero plástico: a deformação inicial é elástica, seguida de escoamento e por uma região de deformação plástica (semelhante aos metais).
- Polímero elástico: deformação totalmente elástica; essa elasticidade, típica da borracha, grandes deformações recuperáveis são produzidas, mesmo sob pequenos níveis de tensão (apresentada pelos elastômeros)



(aula do Prof. P.E.V. Miranda, UFRJ)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Propriedades Físicas

Materiais Plásticos – Propriedades Físicas

Materiais	Densidade	Coef. de dilatação (cm/cm/ °C x 10 ⁶)	Limites de resistência (kg/mm ²)			Módulo de elasticidade (kg/cm ² x 10 ⁴)	Alongamento (%)	Temperaturas- limite (°C)			Flamabilidade	
			Tração	Compressão	Flexão			Máxima serviço contínuo	Máxima curto período	Mínima		
TERMOPLÁSTICOS												
Poliétileno I e II	0,93	18	1,1 a 1,8	0,2	1,2 a 2,7	0,12 a 0,13	200 a 500	50	75	-50	Combustível	
Poliétileno	0,96	1,26	2,5 a 3,5		2,7 a 4,6	0,63 a 0,85	100 a 400	65	95	-50	Combustível	
PVC I	1,4	6,6	5,6 a 6,3	7 a 8	10 a 11,5	3,2	3 a 6	65	76	-40	Auto-extinguível	
PVC II	1,35	9,2	3,9 a 4,6	5,7 a 6,7	7,7 a 8,5	2,5		60	70	-40	Auto-extinguível	
Fluoroplásticos	2,2	9,9	1,1 a 2,0	0,4	Não rompe	0,28 a 0,42	150 a 250	255	280	-270	Não-combustível	
Cloreto de Polivinilidina	1,7	14,4	3,5	5,6	4,9	0,7	5 9	65	80	-40	Auto-extinguível	
Policarbonatos	1,2	7,0	6,7	7,7	8,4	2,3	60 a 100	140	160	-70	Auto-extinguível	
Polipropileno (c/fibras de vidro)	1,1	8,5	4,2* a 7,5	55	5 a 8		1 a 3	120	140		Queima lenta	
Poliuretanos (c/fibras de vidro)	1,4	13,0	3,5* a 7,0		3,5 a 5,0		20 a 30	100	120	-15	Queima lenta	
Polistireno (c/fibras de vidro)	1,2	8,0	7,0* a 10,5	9,5 a 13	7 a 14		1 a 1,4	110	130		Queima lenta	
TERMOESTÁVEIS												
Epóxi (c/fibras de vidro)	1,5	4,5	9 a 12	17 a 21	18 a 24	4,2	2 a 4	135	175		Queima lenta	
Fenólicos (c/fibras de vidro)	1,8	1,6	4,5	20	7,2	21	0,7	130	175		Auto-extinguível	
Furanos (c/fibras de amianto)	1,7	5,3	2,8	7,5	5,3	10,5	0,2	120	150		Auto-extinguível	
Poliésteres (c/fibras de vidro)	1,5	4,9	5,5 a 8,5	18 a 21	16 a 21	8,5 a 10	3 a 5	110	135		Queima lenta	
Melaminas (c/fibras de vidro)	1,9	7,5	3,5* a 7,0	14 a 25	11 a 16		0,5	150	200		Auto-extinguível	

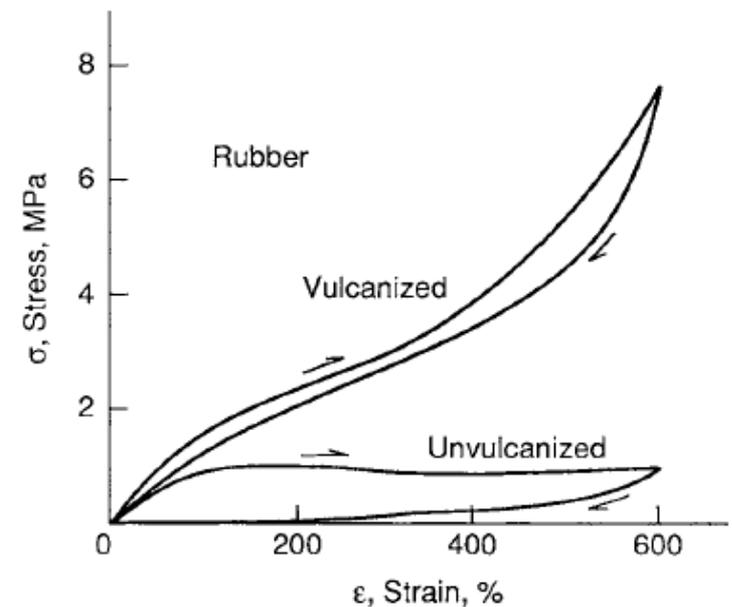
* Limite de elasticidade.



Propriedades Físicas

Table 3.9 Typical Values of Glass Transition and Melting Temperatures for Various Thermoplastics and Elastomers

Polymer	Transition $T_g, ^\circ\text{C}$	Melting $T_m, ^\circ\text{C}$
<i>(a) Amorphous thermoplastics</i>		
Polyvinyl chloride (PVC)	87	212
Polystyrene (atactic)	100	≈ 180
Polycarbonate (PC)	150	265
<i>(b) Primarily crystalline thermoplastics</i>		
Low-density polyethylene (LDPE)	-110	115
High-density polyethylene (HDPE)	-90	137
Polyoxymethylene (POM)	-85	175
Polypropylene (PP)	-10	176
Nylon 6	50	215
Polystyrene (isotactic)	100	240
Polyetheretherketone (PEEK)	143	334
Aramid	375	640
<i>(c) Elastomers</i>		
Silicone rubber	-123	-54
Cis-polyisoprene	-73	28
Polychloroprene	-50	80



Características e Aplicações

Termoplásticos		
Nome	Características	Aplicações
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	Excelente resistência mecânica, dureza.	Forro para refrigeradores, equipamentos para jardinagem.
Acrílico	Extremamente transparente; propriedades mecânicas razoáveis.	Lentes, janelas transparentes de aeronaves, material de desenho.
Poliétileno (PE)	Resistência química; isolante elétrico; boa dureza; coeficiente de atrito relativamente baixo.	Brinquedos, garrafas flexíveis, copos, bandejas de gelo, embalagens, baldes, sacos de lixo, sacos de embalagens.
Polipropileno (PP)	Resistência à distorção a quente e à fadiga; quimicamente inerte; relativamente barato; pouca resistência à luz ultravioleta.	Embalagens de filmes, gabinetes de TV, malas, cadeiras, poltronas, para-choques de automóveis.
Poliestireno (PS)	Excelentes propriedades elétricas e ópticas; boa estabilidade térmica e dimensional; relativamente barato.	Caixas de bateria, aplicações domésticas, brinquedos, painéis luminosos, materiais descartáveis.
Poliéster	Um dos filmes plásticos mais resistentes; resistência à fadiga, rasgo, umidade, ácidos, graxas, óleos solventes.	Gravações magnéticas, roupas, automóveis, recipientes para bebidas.



Características e Aplicações

Termofixos		
Nome	Características	Aplicações
Epóxi	Excelentes combinações entre propriedades mecânicas e resistência à corrosão; boa adesão; relativamente barato; boas propriedades elétricas.	Moldes elétricos, tintas protetoras.
Poliéster	Excelentes propriedades elétricas; baixo custo; pode ser usado em altas temperaturas.	Capacetes, ventiladores, barcos de fiberglass, componentes para automóveis, cadeiras.



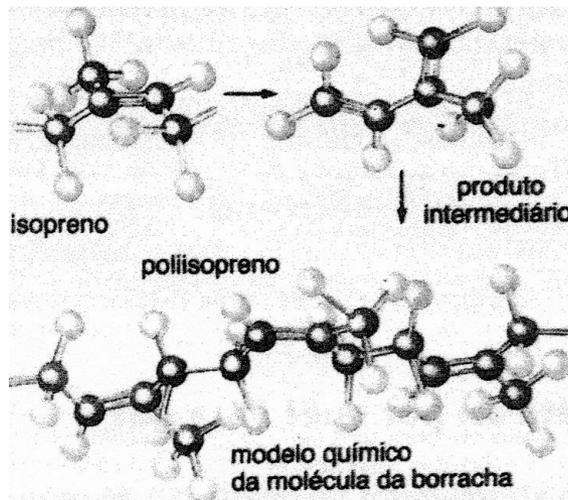
Borracha



A borracha é obtida a partir do látex da seiva de seringueira, árvore nativa da Amazônia. Utilizada pelos índios, foi descoberta pelos europeus em 1736, mas foi somente em 1839 que Charles Goodyear descobriu um modo de torna-la menos rígida e quebradiça, ao deixar cair uma mistura de borracha e enxofre sobre uma chapa quente. O material começou a soltar fumaça e Goodyear atirou-o pela janela. No dia seguinte, verificou que o material se tornara flexível. Estava descoberta a **vulcanização**.

A borracha, um hidrocarboneto com fórmula (C_5H_8), é produto da polimerização do isopreno. É elástica, resistente à abrasão, à eletricidade e à água, mas altera-se em presença de luz e calor, além de não ser resistente a muitos óleos e solventes.

Usada em correias, acoplamentos, tubos, guarnições e para absorver choques.

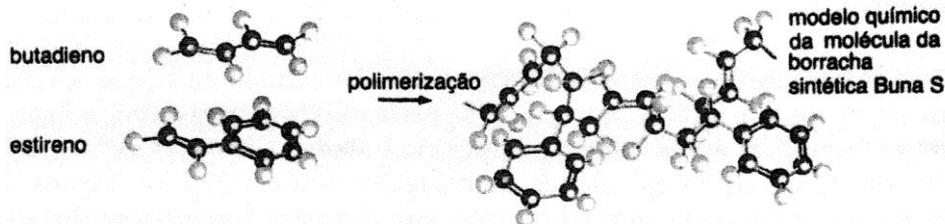


Borracha



Inicialmente, o Brasil teve o monopólio da produção mundial de borracha. Em 1876, um contrabando levou 70.000 sementes para a Inglaterra, onde foram cultivadas em estufas e depois plantadas na Ásia. Após alguns anos, grandes plantações passaram a produzir em escala comercial. O Brasil, por explorar apenas plantas nativas, perdeu o monopólio.

As pesquisas em busca de borrachas sintéticas levaram à descoberta do **Neopreno** (1931) nos Estados Unidos e da **Buna** (1936) na Alemanha. Além de tentar obter um material que melhorasse as propriedades que a borracha já tinha, as pesquisas foram motivadas pelas incertezas quanto ao fornecimento de borracha natural. A Alemanha se preparava para a guerra. Os Estados Unidos preocupados com os fornecedores do sudeste da Ásia.



Elastômeros Sintéticos

TIPO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	APLICAÇÕES
Borracha de poli-isopreno	Propriedades iguais ou superiores às da borracha natural.	Facilidades limitadas de fabricação e processamento.	Pneus para automóveis e caminhões.
Butadieno-estireno (SBR)	Propriedades semelhantes às da borracha natural. Amplas facilidades de produção.	Um pouco inferior à borracha natural em resistência à tração e ao desgaste.	Combinações com a borracha natural; pneus; correias; mangueiras; solas; tapetes.
Copolímeros de butadieno-acrilo-nitrila (Nitrila)	Maior resistência a óleos e solventes.	Menor resistência à tração.	Diafragmas para carburador; tanques de combustíveis; mangueiras para gasolina e óleo.
Polímeros de clorobutadieno (Cloropreno e Neopreno)	Alta resistência ao calor, à luz, a óleos e a produtos químicos. Boa resistência elétrica.	Não é processado como a borracha natural.	Mangueiras e guarnições para óleo em temperaturas altas; pneus para serviços pesados.
Copolímeros de isobutileno (Borrachas Butil)	Excepcional impermeabilidade a gases; elevada resistência à abrasão, ao calor, à luz e aos ácidos; durabilidade.	Dura quando fria. Queima com facilidade.	Tubos internos; mangueiras e diafragmas para vapor; máscaras contra gases; isolamento elétrica; câmaras de ar.
Poli-sulfetos (Thiokol)	Excelente resistência a óleos e solventes. Boa resistência química.	Baixa resistência à tração, à abrasão e à chama.	Vedação em equipamentos para refinarias e campos de petróleo; guarnições; diafragmas; discos de sede de válvulas.
Poliacrílicos (Borrachas acrílicas; Hycar)	Excelente resistência a óleos, solventes e ácidos. Suporta temperaturas altas.	Baixa resistência à abrasão e à tração. Alto custo.	Tubos para a passagem de óleo quente; aparelhos para a indústria química; guarnições para automóveis.
Borrachas de silicone (Polysiloxane)	Suporta temperaturas de trabalho entre 150 e 260°C. É elástica até -38°C.	Baixa resistência à tração, rasgamento e abrasão. Não é compatível com a borracha. Custo elevado.	Cobertura de fios e cabos; guarnições e tubos para condições extremas; partes de aviões; mísseis e naves espaciais.

Adaptado de: **Processo de Fabricação e Materiais para Engenheiros**, por Doyle, Lawrence E. e outros. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 1962

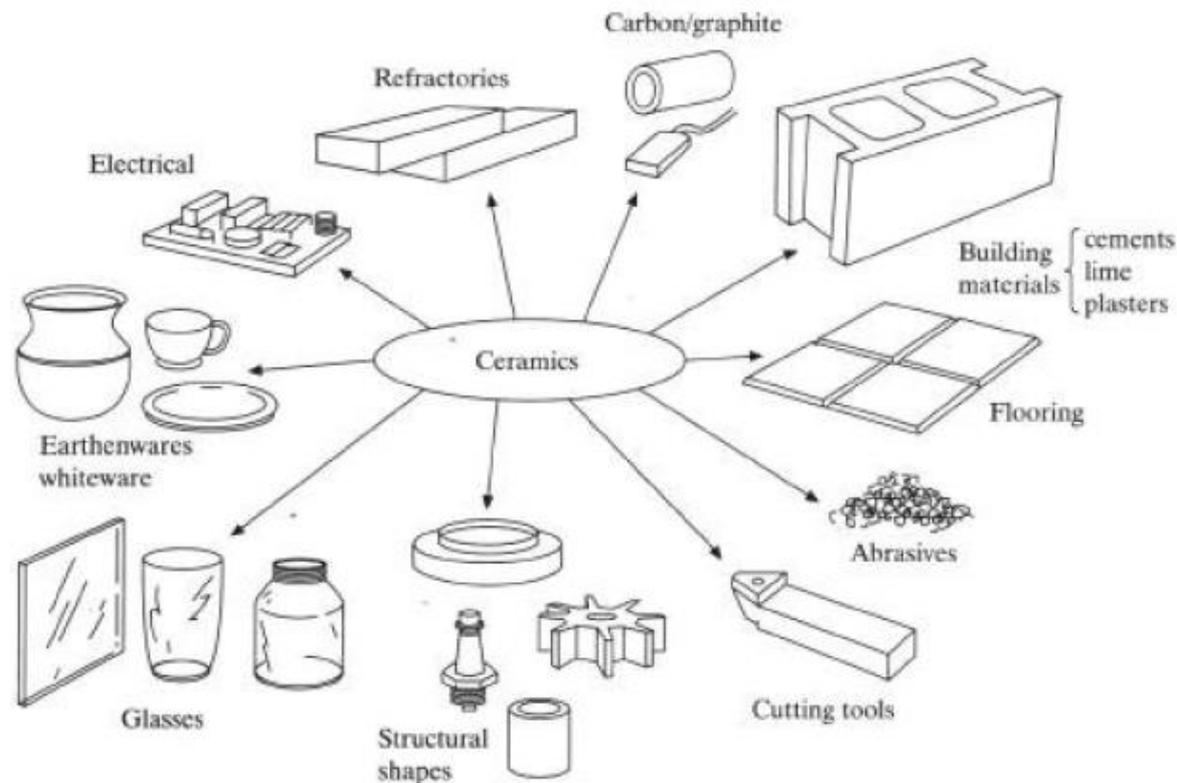


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Cerâmicas

São materiais inorgânicos, compostos por elementos metálicos e não metálicos que se unem por ligações químicas. Conforme essa composição, eles podem ser cristalinos, não cristalinos ou uma mistura de ambos. Tijolos, vidros (sílica – SiO_2), louças, isolantes, abrasivos, titanato de bário (transdutores), entre outros, são exemplos de materiais cerâmicos.

Esses materiais se caracterizam por sua grande resistência a altas temperaturas, boa resistência à corrosão, baixa condutividade (elétrica e térmica), pouca plasticidade, dureza elevada e extrema fragilidade. Com frequência, os materiais cerâmicos são subdivididos em: cerâmica vermelha, cerâmica branca, vidros e cerâmicas especiais.



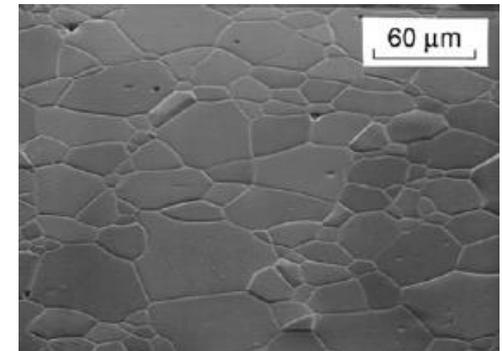
Cerâmicas

O primeiro material estrutural inorgânico a adquirir propriedades completamente novas como resultado de ação humana intencional foi a argila. Essa ação humana – a “queima” da argila (sinterização) – tornou possível a fabricação de potes, panelas e outros utensílios cerâmicos.

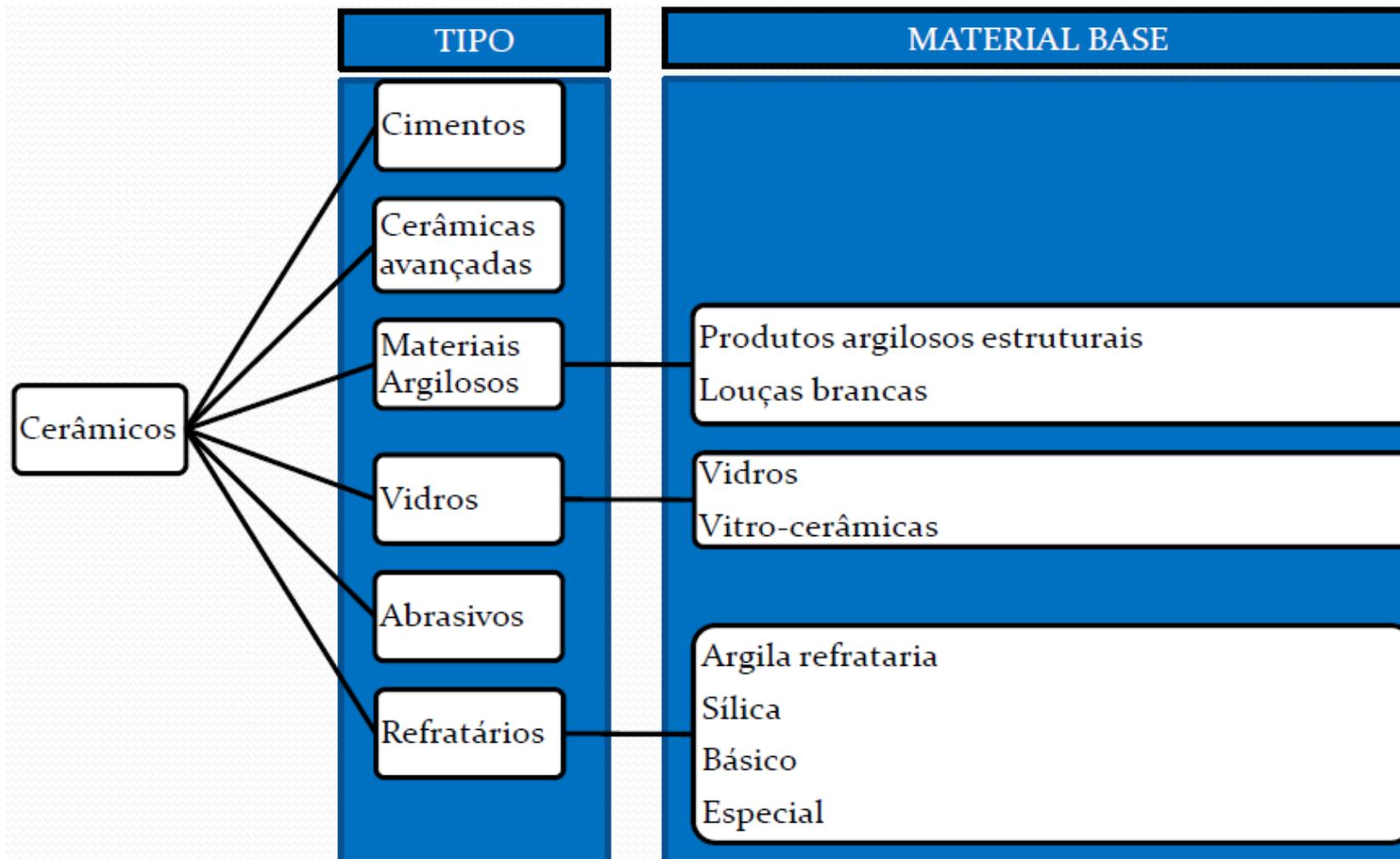
Na composição das cerâmicas vermelha (telhas, tijolos e manilhas) e branca (azulejos, sanitários e porcelanas) entram, principalmente, silicatos hidratados de alumínio, como caulinita, haloisita, pirofilita e montmorilonita. A cor da cerâmica vermelha é resultado da adição de óxido de ferro ao processo de fabricação.

Muitos novos materiais cerâmicos estão sendo desenvolvidos para aplicações diversas, como para peças de motores de combustão interna. Nesse caso, o material apresenta a vantagem de ser leve, ter resistência e dureza elevadas, alta resistência ao calor e propriedades isolantes. Os materiais cerâmicos também desempenham papel importante na construção de fornos metalúrgicos, por serem bons isolantes térmicos e apresentarem alta resistência ao calor.

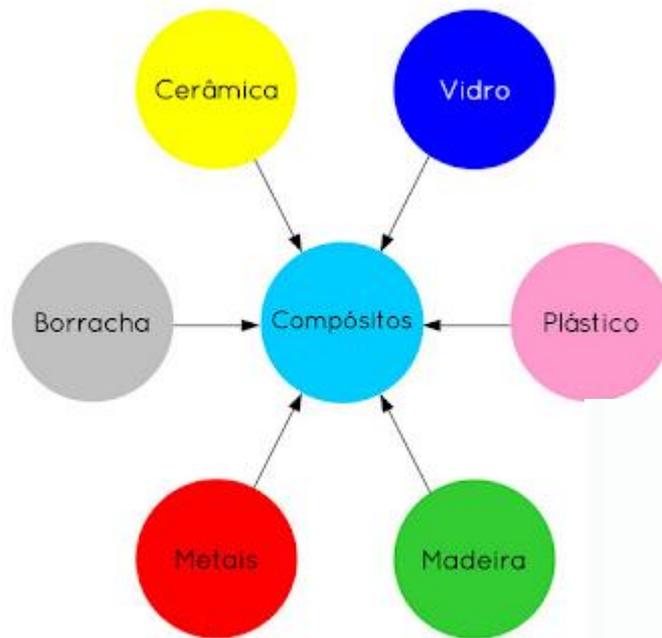
Componentes eletrônicos e circuitos integrados complexos têm sido fabricados em material cerâmico. Cerâmicas monocristais têm importantes aplicações mecânicas, elétricas e ópticas.



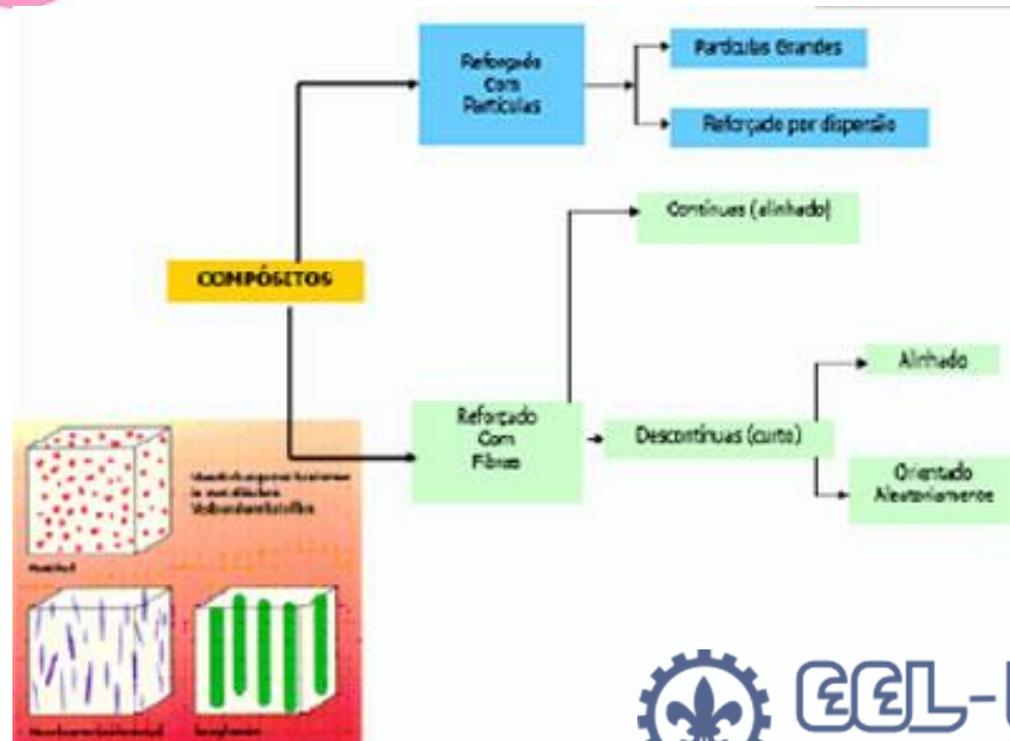
Cerâmicas



Compósitos



Produzidos pela combinação de dois ou mais materiais mutuamente insolúveis, misturando-os ou ligando-os de modo que cada um mantenha sua integridade.



Compósitos

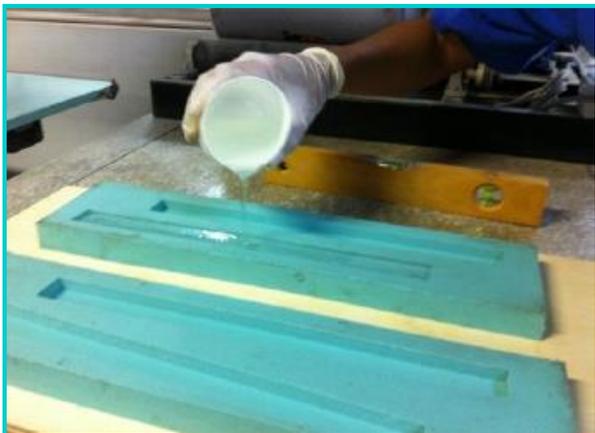
Table 3.12 Representative Types and Examples of Composite Materials

Reinforcing Type	Matrix Type	Example	Typical Use
<i>(a) Particulate composites</i>			
Ductile polymer or elastomer	Brittle polymer	Rubber in polystyrene	Toys, cameras
Ceramic	Ductile metal	WC with Co metal binder	Cutting tools
Ceramic	Ceramic	Granite, stone, and silica sand in Portland cement	Bridges, buildings
<i>(b) Short-fiber, whisker composites</i>			
Strong fiber	Thermosetting plastic	Chopped glass in polyester resin	Auto body panels
Ceramic	Ductile metal	SiC whiskers in Al alloy	Aircraft structural panels
<i>(c) Continuous-fiber composites</i>			
Ceramic	Thermosetting plastic	Graphite in epoxy	Aircraft wing flaps
Ceramic	Ductile metal	Boron in Al alloy	Aircraft structure
Ceramic	Ceramic	SiC in Si ₃ N ₄	Engine parts
<i>(d) Laminated composites</i>			
Stiff sheet	Foamed polymer	PVC and ABS sheets over ABS foam core	Canoes
Composite	Metal	Kevlar in epoxy between Al alloy layers (ARALL)	Aircraft structure



Propriedades Mecânicas de Compósitos

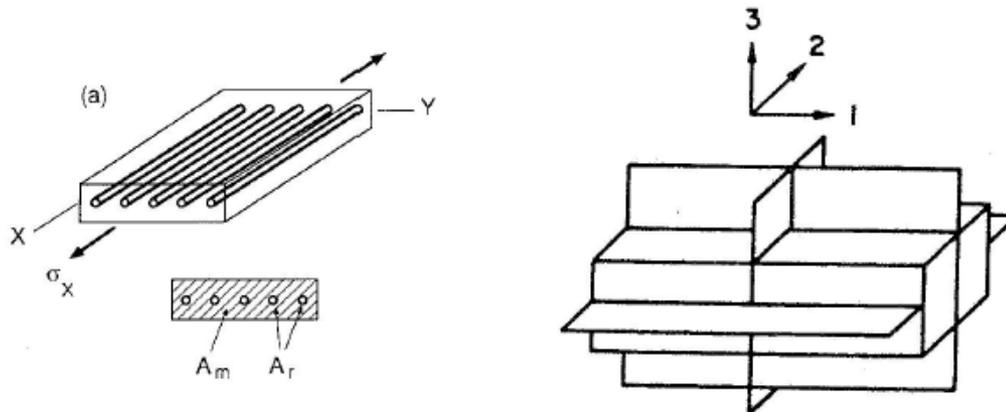
Os compósitos estruturais laminados possuem uma resina polimérica como matriz e fibras longas como reforços empilhados em camadas. Cada camada ou lâmina possui um conjunto de fibras numa dada direção. Esses materiais são referenciados com a sigla CPR. A inerente anisotropia associada aos CPR permite que se projete as propriedades do material juntamente com as características geométricas e funcionais da estrutura, de maneira a se obter o desempenho desejado. No entanto, essa anisotropia pode ser vista como um fator positivo ou negativo. Se por um lado possibilita projetar o material visando uma alta eficiência, por outro lado faz com que haja uma grande dificuldade em se prever com precisão os modos de falha intra e interlaminares do material, o que reflete diretamente na confiabilidade dos componentes fabricados e obriga ao emprego de elevados coeficientes de segurança, levando a um alto custo.



Propriedades Mecânicas de Compósitos

O comportamento mecânico dos CPR pode ser considerado de duas formas: i) a abordagem micromecânica, que busca analisar a lâmina em função de seus constituintes (fibra, matriz e interface fibra-matriz); e ii) a abordagem macromecânica, que busca analisar a estrutura, ou seja, o comportamento do laminado. A estimativa das constantes elásticas de materiais compósitos pode se tornar um problema de grande complexidade. Apresenta-se o caso simples de fibras unidirecionais em uma matriz.

Ao considerar uma chapa fina de CPR com reforço unidirecional, observa-se que esta única lâmina possui 3 planos de simetria ortogonais, ou seja, é um material ortotrópico, onde a direção 1 corresponde ao eixo X. Neste caso, a lei de Hooke tem uma complexidade intermediária. Em chapas finas, as tensões que se aplicam perpendicularmente ao plano da chapa são usualmente pequenas e pode-se considerar $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$. Embora ocorra deformação ε_z , ela não apresenta interesse particular, de modo que a lei de Hooke pode ser empregada na forma reduzida. Visto que a matriz dos coeficientes é simétrica, tem-se quatro constantes elásticas independentes.



Propriedades Mecânicas de Compósitos

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_X} & -\frac{\nu_{YX}}{E_Y} & 0 \\ -\frac{\nu_{XY}}{E_X} & \frac{1}{E_Y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{XY}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Considere uma tensão σ_X paralela às fibras. Admita-se que fibras e matriz são materiais isotrópicos, com suas constantes elásticas dadas por E_f , ν_f , G_f e E_m , ν_m , G_m . Considere ainda que as fibras são perfeitamente ligadas à matriz, de modo que ambas deformam igualmente (ε_X é a mesma para ambas). Por fim, seja a área transversal total A igual à soma das áreas ocupadas pelas fibras e pela matriz, conforme equação (2). Do equilíbrio de forças, obtemos a relação dada pela equação (3), onde σ_f e σ_m são as tensões nas fibras e na matriz. Essas tensões estão relacionadas com as respectivas deformações na forma das equações (4).

$$A = A_f + A_m \quad (2); \quad \sigma_X A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3); \quad \sigma_X = E_X \varepsilon_X \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (4);$$

Na direção longitudinal, a deformação do compósito é igual para as fibras e para a matriz, equação (5). Substituindo (4) em (3) e aplicando (5), obtém-se o módulo do compósito na direção longitudinal, ver equação (6). As razões entre as áreas transversais são iguais às frações volumétricas de fibra e matriz, denotadas por V_f e V_m , de modo que a equação (6) pode ser reescrita na forma da “regra das misturas”, conforme mostra a equação (7).

$$\varepsilon_X = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (5); \quad E_X = \frac{E_f A_f + E_m A_m}{A} \quad (6); \quad E_X = V_f E_f + V_m E_m \quad (7).$$