Os polímeros

— Novos materiais de engenharia

A.S.D. Pouzada e J.J.C. Cruz Pinto ^a

Resumo

Enumeram-se e descrevem-se as propriedades de maior relevância na definição do campo de aplicação dos materiais poliméricos de engenharia e na otimização do seu desempenho em serviço, relacionando-as com o tipo de estruturas química e morfológica. Finalmente, apresentam-se os principais polímeros de engenharia — tecnoplásticos — na perspectiva do inter-relacionamento das propriedades com as técnicas de processamento e com os campos de aplicação.

1. Introdução

Os polímeros têm vindo, desde há cerca de 20 anos, a substituir progressivamente grande parte dos materiais tradicionais em aplicações de engenharia. Alguns dos campos de aplicação, talvez mais inesperados são a construção civil (estruturas de edifícios), a engenharia sanitária (torneiras misturadoras), a indústria automóvel (peças do compartimento do motor) e a medicina (coração artificial). De entre os polímeros — termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros — é o grupo dos primeiros o que apresenta maior relevância tecnológica e comercial, e a ele nos cingiremos neste trabalho.

A progressiva generalização da aplicação dos polímeros em engenharia é uma consequência lógica de algumas propriedades genéricas destes materiais e da possibilidade que a Química trouxe de se sintetizarem novas estruturas poliméricas com propriedades mais ajustadas às aplicações. Hoje, exceptuando alguns domínios muito específicos, está-se em vias de esgotar a possibilidade de se produzirem novos polímeros com impacto comercial, mas continua aberta a via da modificação das propriedades da plêiade de polímeros já conhecidos, por meio da mistura, da aditivação e do reforçamento apropriados. Além disso, o crescente domínio das condições de processamento e a compreensão do comportamento reológico dos polímeros no estado de fusão, têm permitido melhorar ainda mais as propriedades finais dos produtos obtidos.

1.1. Estrutura Molecular dos Polímeros

Como é sabido, os materiais poliméricos são constituídos por macromoléculas (de grau de polimerização ⁽¹⁾ que pode atingir muitos milhares) obtidas por processos diversos, entre os quais se destacam os de polimerização radicalar (p. ex. LDPE, PVC), passo a passo (p. ex. poliamidas) e por coordenação (p. ex. HDPE, PP).

Ora é esta estrutura macromolecular — caracterizada por cadeias mais ou menos flexíveis de átomos (predominantemente, carbono) unidos por ligações covalentes

— que é responsável pelas propriedades específicas deste tipo de materiais, designadamente a relativa ductilidade (dependente, embora, da temperatura), a considerável resistência química, e a grande diversidade de arranjos estruturais das macromoléculas suas constituintes (graus de orientação e de cristalinidade). Como é óbvio, estas macromoléculas podem ter uma estrutura química muito diversa, como se ilustra neste trabalho com a apresentação de vários exemplos concretos.

Convém nesta introdução, no entanto, dar ainda algum destaque adicional à característica mecânica mais importante destes materiais, que é a da sua viscoelasticidade, i.e., o facto de a sua resposta a uma solitação mecânica ter sempre uma componente instantânea e outra retardada no tempo.

1.2. Viscoelasticidade

Tal como acontece com a generalidade dos compostos químicos orgânicos, as cadeias moleculares dos polímeros podem, mais ou menos livremente, rodar em torno de cada uma das ligações covalentes simples, com uma velocidade (ou frequência) que é função da temperatura e de um certo número de barreiras energéticas (energias de activação), determinadas pela estrutura química da cadeia principal e dos seus grupos substituintes. Como consequência, e desde que a temperatura não seja muito baixa ⁽²⁾, cada cadeia do polímero poderá adquirir uma infinidade de configurações que variarão constantemente ao longo do tempo (Fig. 1).

Fig. 1
Mobilidade de uma Cadeia Polimérica

A frequência destas variações, ν (Fig. 1), aumenta com a temperatura e será também tanto maior quanto menores forem as barreiras de activação, E_a , que se opõem àqueles movimentos de rotação (ou transições conformacionais). No entanto, a temperatura constante

^a Área de Eng. de Polímeros e Centro de Química Pura e Aplicada, Universidade do Minho, Largo do Paço 4719 — Braga Codex.

⁽²⁾ Cada polímero tem uma temperatura característica — temperatura de transição vítrea, T_g — abaixo da qual praticamente cessam (frequência infinitamente pequena) os movimentos da cadeia principal.

⁽¹⁾ Número de unidades estruturais da cadeia molecular do polímero.

e na ausência de solicitações mecânicas sobre o material, prova-se teoricamente e verifica-se (de forma indirecta) experimentalmente que é constante no tempo o valor médio da distância entre extremidades de cada uma das cadeias do polímero. Se a temperatura aumenta aquela distância diminui e, pelo contrário, aumenta quando a temperatura diminui, o que, embora possa não parecer, é absolutamente compatível com valores positivos do coeficiente volumétrico de dilatação térmica.

Quando se aplica uma solicitação mecânica (p. ex. uma força de tracção) sobre o material, ele deforma-se. Contudo, para além e após a deformação instantânea, resultante da elasticidade própria, Hookeana ⁽³⁾, das ligações químicas e ângulos de valência, o material sofrerá ainda uma deformação progressiva, retardada, não-Hookeana, a um ritmo que é exclusivamente função da(s) frequência(s), ν , de transição conformacional acima referida(s). Analogamente, ao ser anulada a solicitação, o material sofre uma recuperação instantânea, Hookeana, idêntica à deformação inicial instantânea, seguida de uma recuperação progressiva, retardada, não-Hookeana, inferior ou igual à deformação retardada inicial (Fig. 2). É nisto, em termos simples, que consiste a viscoelasticidade dos materiais poliméricos.

Fig. 2

Curvas Típicas de Deformação (Fluência) e Recuperação

Como é óbvio, para um dado material, a manifestação desta viscoelasticidade depende, no caso de polímeros semicristalinos, do seu grau de cristalinidade (as zonas cristalinas são mais rígidas e Hookeanas) e, no caso de polímeros reticulados (p. ex. borrachas), do seu grau de reticulação. Igualmente, o tipo de comportamento depende da velocidade de solicitação — se uma carga for aplicada com velocidade muito superior à das transições conformacionais (p. ex. no caso de um impacto), o material comporta-se de forma mais rígida (e, eventualmente, frágil), não tendo tempo de se deformar apreciavelmente.

2. Propriedades mais importantes na Aplicações dos Polímeros como Materiais de Engenharia

2.1. Rigidez (Módulo de Elasticidade, E ⁽³⁾) (Cf. Anexo I)

Os factores que contribuem para uma maior rigidez de um material são:

a) *Fraca mobilidade (rigidez) da cadeia principal do polímero*: grupos substituintes volumosos — **PS**, **PMMA**; troços rígidos na cadeia (p. ex. anéis benzénicos) — **PET**, **PBT**, **PC**, **PPO**, **PEEK**.

b) *Forças intermoleculares fortes*: ligações dipolo-dipolo na cadeia principal ou em grupos substituintes — **PVC**.

c) *Cristalização substancial*: esta, por sua vez, requer cadeias flexíveis, de geometria simples, ou com fortes forças intermoleculares — **PP**, **POM**, **PA 6.6**.

d) *Reforço*: em regra, com fibras de vidro, conduzindo a módulos de elasticidade (5 a 10 GPa), duas a três vezes superiores ao do polímero não reforçado (p. ex. **PA 6.6**; a **PEEK** com 60% de fibras de carbono tem $E = 120$ GPa ($E_{aço} = 200$ GPa)!).

2.2. Resiliência

Esta propriedade mede a capacidade do material para dissipar energia mecânica, especialmente em situações de impacto. Uma elevada resiliência requer, em geral, uma certa ductilidade combinada com uma elevada tensão de rotura. Os principais factores favoráveis a uma elevada resiliência são:

a) *Mistura (e copolimerização parcial) com polímeros muito menos rígidos (elastómeros)*, como **SBR** (estireno *co* butadieno) ou **BR** (polibutadieno), para formar misturas difásicas — p. ex. **HIPS** (poliestireno antichoque), **ABS** (acrilonitrilo *co* estireno + **NBR**).

b) *Introdução de troços flexíveis (p. ex. de butadieno) nas cadeias*, por copolimerização — p. ex. **ABS** (acrilonitrilo *co* butadieno *co* estireno). A resiliência do **ABS** é cerca de 20 vezes superior à do **PS**.

c) *Grupos substituintes não inteiramente rígidos*, nem excessivamente móveis, capazes de dissipar alguma energia mecânica à temperatura de serviço — p. ex. grupo $-COOCH_3$ no **PMMA**. A resiliência do **PMMA** é semelhante à do **HIPS**.

d) *Cadeias principais móveis, mas com dificuldade, i.e. requerendo a acção de esforços elevados* — p. ex. rotação dos anéis aromáticos, acompanhando o movimento em bloco de cada unidade estrutural, no polycarbonato (**PC**). A resiliência do **PC** é cerca de 30 vezes a do **PS**.

2.3. Resistência Química

Contribuem para uma elevada resistência química os seguintes dois factores:

a) *interacções moleculares fortes*: cadeias e/ou grupos substituintes polares — p. ex. **PMMA** (resistente a hidrocarbonetos), **SAN** (a polaridade do grupo $-CN$ confere-lhe melhor resistência química que o **PS**), **PES** (Cf. Anexo 1).

b) *Cristalinidade*: conduz à existência de agregados moleculares muito coesos, difíceis de destruir — p. ex. **HDPE** (quimicamente inerte, a não ser próximo do seu ponto de fusão, i.e., acima de 100 °C), **POM** (copolimerizado com etilenoglicol, para maior resistência à hidrólise a temperaturas elevadas).

2.4. Resistência ao Calor

Contribuem para uma elevada resistência ao calor os seguintes dois factores:

a), b) *Elevados pontos de fusão T_f (em polímeros semicristalinos) e/ou elevados valores T_g (cadeias de fraca mobilidade, Cf. Nota 2).*

⁽³⁾ Deformações relativas directamente proporcionais às tensões aplicadas (coeficiente de proporcionalidade = $1/\text{módulo de elasticidade}$).

	$T_g/^{\circ}\text{C}$	$T_f/^{\circ}\text{C}$	$T_{m\max}/^{\circ}\text{C}$
POM		181	90
PA 6.6		265	100 a 150
PC	145	—	120
PES	225	—	150 a 175
PPO	209	298	180
PTFE	145	334	250
PEEK	127	327	290

c) Reforço com fibras.

2.5. Massas Moleculares

O valor médio da massa molecular de um polímero, bem como a largura da sua distribuição, são características com reflexos importantes nas propriedades do material polimérico, em condições de utilização.

Sem entrar em excessivo detalhe, destaca-se apenas que há aqui necessidade de um compromisso entre a optimização das propriedades mecânicas (valores elevados do módulo de elasticidade, da tensão de rotura e da resiliência) e a rapidez e economia do processamento do material (só possíveis evitando valores excessivos da viscosidade do polímero no estado fundido). Na realidade, se as propriedades mecânicas finais são tanto melhores quanto mais elevada for a massa molecular média e mais estreita a distribuição de massas moleculares, o facto é que também a viscosidade do fundido aumenta no mesmo sentido, dificultando, assim, o processamento (extrusão, moldação por injeção, etc.).

3. Importância e Efeitos das condições de Processamento dos Polímeros

O desempenho dos produtos em materiais poliméricos, além de depender, como é natural, do tipo de polímero utilizado, é influenciado de modo importante pela maneira como a matéria-prima é transformada no produto final, i.e. pelas condições de processamento.

A maioria dos produtos são obtidos por processos em que o polímero é levado ao estado fundido, depois obrigado a fluir e, finalmente, arrefece. A característica macromolecular destes materiais, a tendência de as macromoléculas solidificarem em estruturas mais ou menos organizadas e a sua má condutividade térmica, determinam a grande dependência das propriedades finais em relação às condições de processamento.

Os aspectos mais relevantes desta interdependência são descritos sumariamente a seguir.

3.1. Orientação Molecular

Quando um polímero fundido, com elevada viscosidade, flui ao longo de um canal, o material a distâncias diferentes das paredes desse canal escoa-se a velocidades diferentes. Este facto faz com que as macromoléculas tendam a desenrolar-se e a alinhar-se na direcção do fluxo por acção das tensões tangenciais a que se encontram sujeitas.

Nestas condições, durante o enchimento de um molde ou durante a extrusão de um tubo por uma fiação, as macromoléculas apresentam-se predominantemente alinhadas na direcção do fluxo. Quando este pára e enquanto o material tiver uma viscosidade suficientemente reduzida, as macromoléculas tenderão a organizar-se nas estruturas enoveladas características.

No entanto, se o arrefecimento for rápido, o referido alinhamento das macromoléculas vai ficar "congelado" no produto sólido. Como as forças de ligação

entre macromoléculas são muito menores que as das ligações covalentes das cadeias, resulta que o material apresenta, na direcção perpendicular ao fluxo, um resistência mecânica inferior à que se verifica na direcção do fluxo.

Isto significa que a peça apresenta anisotropia de propriedades, como se pode observar em certos baldes de plástico que partem quase sempre na direcção da altura. O efeito de orientação e consequente anisotropia pode ser reduzido se, antes da solidificação do polímero, as macromoléculas tiverem tempo de desfazer o alinhamento resultante do fluxo.

3.2. Rechupos, Chochos e Tensões Residuais

As paredes metálicas dos moldes ou dos calibradores que garantem as dimensões dos extrudidos estão a temperaturas muito mais baixas que a dos fundidos (na ordem de 100 °C, ou mais).

Assim, quando um polímero fundido entra em contacto com estas paredes, dá-se uma solidificação rápida do material adjacente. O polímero que se encontra mais afastado da parede fria fica afastado desta por uma camada de material já solidificado e de pequena condutividade térmica, e leva por isso mais tempo a arrefecer. Neste processo, a maior ou menor rigidez do polímero à temperatura a que está a ocorrer o arrefecimento vai provocar efeitos relevantes nas peças, especialmente se estas tiverem espessuras grandes (3 mm ou mais) que tendem a realçar a influência da reduzida condutividade térmica.

Seja o caso de um polímero pouco rígido, flexível, como é o do LDPE. A "casca" solidificada é naturalmente flexível, mas pouco flexível; quando o núcleo contrair devido à cristalização e ao abaixamento de temperatura, a "casca" só poderá acompanhar essa contracção se se deformar acentuadamente, formando o que se designa por chupado (Fig. 3).

Fig. 3
Efeitos da Contracção em peças de Materiais Plásticos

No caso dos materiais rígidos, como o PS e a generalidade dos tecnoplásticos, a "casca" sólida é praticamente indeformável. Assim, a contracção do núcleo irá provocar, consoante a sua intensidade, o aparecimento de tensões residuais de tracção no interior da peça ou, mesmo, vazios resultantes da rotura do material — chochos. Tanto as tensões residuais como os chochos, na presença das tensões de serviço da peça, induzem uma diminuição apreciável da sua resistência mecânica. A incidência destes efeitos é minimizada optando, tanto quanto possível, por espessuras reduzidas e uniformes ao longo da peça, e temperaturas elevadas dos moldes.

3.3. Superfícies de Soldadura

No enchimento dos moldes e/ou no fluxo ao longo de fiação, o polímero pode ser obrigado a separar-se em

duas frentes que se voltam a unir mais adiante. As duas frentes de fundido, quando se encontram, como por exemplo no caso da moldação por injeção (Fig. 4), vão formar uma superfície em que não existe um entrosamento perfeito das macromoléculas das duas frentes. Assim, as forças de ligação ao longo dessa superfície são muito menores que na restante peça, aumentando aí a probabilidade de rotura.

Nem sempre é possível evitarem-se as superfícies de soldadura, mas pode atenuar-se o seu efeito desfavorável, por exemplo, fazendo com que os percursos das frentes de fundido sejam tão curtos quanto possível e reduzindo a velocidade de arrefecimento no local de formação da soldadura.

Fig. 4
Formação de uma Linha de Soldadura

3.4. Heterogeneidade Estrutural

A conjugação do efeito das tensões tangenciais associadas ao fluxo e do gradiente térmico que se desenvolve durante o arrefecimento faz com que os polímeros tendam a apresentar uma variação apreciável de estrutura ao longo da espessura. Este efeito é particularmente importante no caso dos materiais cristalinos em que, *grosso modo*, perto da superfície é menor a cristalinidade e a orientação molecular maior, e no núcleo é reduzida a orientação e maior a cristalinidade, com estruturas cristalinas (esferulites) mais desenvolvidas.

Em condições mais severas de processamento (enchimentos rápidos, temperaturas baixas, arrefecimentos bruscos), podem mesmo formar-se camadas paralelas à superfície com tendência a separarem-se. É o que se pode observar em recipientes domésticos de plástico que começam a “descascar”. Além deste efeito, que é um caso limite, a heterogeneidade estrutural pode provocar a fragilização da peça.

4. Principais Polímeros de Engenharia e suas Aplicações

A aplicação de polímeros em peças técnicas está associada a propriedades específicas que são relevantes no desempenho do produto, como por exemplo a transparência, a resistência mecânica a cargas estáticas ou a choques, e a capacidade de poder trabalhar a temperaturas elevadas.

Estes polímeros, designados por tecnoplásticos, podem ser usados simples ou, mais frequentemente, compostos com substâncias que modifiquem as suas propriedades mecânicas ou, ainda, misturados com outros polímeros.

4.1. Polímeros Transparentes

PMMA — poli(metacrilato de metilo) — é um polímero muito rígido e duro, com alguma resistência ao impacto e, acima de tudo, transparência muito elevada. Estas propriedades, associadas a uma certa resistência à degradação ambiental, determinam a sua aplicação em anúncios luminosos, janelas de aeronaves, lentes, luzes traseiras de veículos e fibras ópticas.

PC — policarbonato — este tecnoplástico apareceu na década de 60, associado ao surto de vandalismo. Embora possuindo propriedades ópticas um pouco inferior-

res às do PMMA, possui uma resistência muito elevada ao choque e à degradação por raios UV, e pode funcionar a temperaturas mais elevadas que o PMMA. De entre as suas múltiplas aplicações, destacam-se os candeeiros públicos, biberões, capacetes para motociclistas, óculos de protecção, faróis para automóveis, garrafas de água de mesa, caixas de correio para zonas rurais.

4.2. Polímeros para Aplicações Mecânicas

ABS — copolímero de acrilonitrilo, butadieno e estireno (Cf. também 2.2.a) — é amorfo, rígido, resistente aos raios UV e de boa estabilidade dimensional. É o material usado em carcaças de electrodomésticos, telefones, computadores Spectrum, peças LEGO, painéis de instrumentos de automóveis.

PA — poliamidas ou “nylons” — existem várias poliamidas com estruturas moleculares muito diferenciadas e diferentes propriedades finais. As primeiras que apareceram foram utilizadas em fibras têxteis substituintes da seda. Em engenharia, usam-se principalmente as **PA 6** e **6.6**. Apesar de possuírem excelentes propriedades de isolamento eléctrico e térmico e reduzido coeficiente de atrito, a sua resistência mecânica e estabilidade dimensional são afectadas pela humidade, por o material ser higroscópico. Este inconveniente é geralmente minimizado pela utilização generalizada de composições com percentagens de fibra de vidro até 40%. São os materiais dos fechos *éclair*, rodas dentadas, cames, carcaças de ferramentas eléctricas, ventoinhas e radiadores de automóveis.

POM — poli(óxido de metileno) ou poliacetal — é um material alternativo às **PA**, apresentando a vantagem de não ser higroscópico. Existem dois tipos de **POM** — um homopolímero (Delrin) e vários copolímeros. O primeiro tem propriedades mecânicas ligeiramente superiores mas é menos resistente à hidrólise. O homopolímero aplica-se, por exemplo, em rodas dentadas, enquanto que o copolímero é utilizado em acessórios de tubagem, cassetes vídeo e cafeteiras eléctricas.

PET — poli(tereftalato de etileno) — é um poliéster de elevada rigidez e resistência mecânica. É muito usado em filmes (p. ex. para fitas magnéticas de suporte áudio e vídeo), fibras “Terylene” e, actualmente em rápida expansão, garrafas para bebidas gaseificadas e bebidas servidas em aviões.

PPO — poli(óxido de p-fenileno) — Cf. 4.4.

4.3. Polímeros para Serviço a Temperaturas Elevadas

PBT — poli(tereftalato de butileno) — é outro poliéster facilmente moldável por injeção que, geralmente, se usa reforçado com fibras de vidro. É utilizado em peças do sistema eléctrico de automóveis, como a tampa do distribuidor, em teclas de terminais de computadores, pegas de fogões e tostadeiras, ferros de engomar, e suportes de resistência de secadores de cabelo.

PSO e PES — polisulfona e polietersulfona — estes tecnoplásticos são especialmente úteis pela sua inércia química e excepcional resistência térmica. Aplicam-se em componentes para televisores, contadores de água quente, berbequins cirúrgicos, gaiolas para rolamentos. **PEEK** — polieteretercetona — é um dos mais recentes polímeros resistentes ao calor. Utiliza-se em isolamento de cabos eléctricos para material militar e aeroespacial, estruturas de montagem de circuitos integrados, e apli-

cações estruturais em que aparece reforçada com fibras de carbono.

PTFE — politetrafluoroetileno — é, como o **PEEK**, o polímero de maior resistência ao calor. É notável pela sua inércia química, muito baixo coeficiente de atrito (autolubrificante) e excepcionais propriedades de isolamento eléctrico. A sua maior desvantagem é a dificuldade de processamento que, em regra, é feito por sinterização. Usa-se muito em bombas resistentes a ácidos, juntas de vedação, casquilhos de chumaceiras autolubrificantes, e revestimentos não aderentes de frigideiras e caçarolas.

4.4. Misturas (Ligas) de Polímeros

Este é um domínio ainda muito recente. Muito poucos polímeros são miscíveis, verificando-se mesmo que, de uma forma geral, os polímeros tendem a não ser miscíveis consigo próprios quando é excessiva a heterogeneidade das suas massas moleculares. É costume usar-se como critério de miscibilidade a existência de uma única temperatura de transição vítrea.

a) Mistura de polímeros miscíveis

PVC/NBR e **PVC/EVA** — estas misturas possuem grande resistência aos UV, ozono, solventes, fissuração

e rasgamento. São utilizados no isolamento de cabos, em vedantes, e em revestimentos.

PS/PPO — a função do **PS** nesta mistura é, fundamentalmente, tornar o **PPO** processável. Consoante o teor em **PPO**, esta mistura pode apresentar uma grande variedade de temperaturas máximas de utilização (75 a 180 °C), e tem elevada resistência mecânica e resiliência, particularmente se na mistura se utilizar **HIPS (Noryl)**. Tem também elevada resistência à chama. As utilizações principais são como alternativa ao **ABS**.

b) *Misturas de polímeros imiscíveis (mais que uma T_g)*
São deste tipo a maioria das misturas com interesse comercial.

HIPS e ABS (Cf. 2.2.a)

PVC/SAN ou **PVC/PMMA/BR** ou **PMMA/BR** — aplicações em que se pretenda uma boa resistência ao impacto.

ABS/PVC — combina a excelente resiliência do **ABS** (melhorando-a mesmo) com o bom comportamento à chama do **PVC**.

PC/ABS — combina a excelente resiliência de ambos com a maior resistência química e ambiental do **ABS**.

PP/EPDM — a mistura do **PP** com o elastómero que é o terpolímero de etileno, propileno e um dieno permite obter materiais de boa rigidez e resistência ao impacto, sendo utilizados por exemplo em parachoques de automóveis.

PET ou **PBT/PC** — estas misturas têm sido usadas em aplicações para resistir ao impacto como, por exemplo, parachoques de automóveis e capacetes de protecção.

Anexo 1

Estrutura química e Propriedades dos Principais Polímeros

Símbolo	Estrutura	Propriedades
LDPE	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CHCH}_2\text{CH}_2\sim\sim\sim$	$E = 0,1 \text{ GPa}$
PVC	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}\begin{smallmatrix} \text{Cl} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 87^\circ\text{C}$, $E = 2,4 \text{ a } 4,1 \text{ GPa}$
HDPE	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}_2\sim\sim\sim$	$T_f = 145^\circ\text{C}$, $E = 1 \text{ GPa}$
PP	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}\begin{smallmatrix} \text{CH}_3 \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$ (cadeia isotática)	$T_f = 170^\circ\text{C}$, $E = 1,1 \text{ a } 1,6 \text{ GPa}$
PS	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}\begin{smallmatrix} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 100^\circ\text{C}$, $E = 2,4 \text{ a } 3,3 \text{ GPa}$
PMMA	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{C}\begin{smallmatrix} \text{CH}_3 \\ \\ \text{COOCH}_3 \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 105^\circ\text{C}$, $E = 2,6 \text{ GPa}$
PET	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OC}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 80^\circ\text{C}$, $E = 2 \text{ GPa}$
PBT	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OC}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 60^\circ\text{C}$, $E = 2,3 \text{ GPa}$
PC	$\sim\sim\sim\text{O}\begin{smallmatrix} \text{C}_6\text{H}_4 \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{smallmatrix}\text{OC}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 145^\circ\text{C}$, $E = 2,4 \text{ GPa}$
PPO	$\sim\sim\sim\text{O}\begin{smallmatrix} \text{C}_6\text{H}_4 \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{smallmatrix}\text{OC}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 209^\circ\text{C}$, $T_f = 298^\circ\text{C}$, $E = 2,4 \text{ GPa}$
PEEK	$\sim\sim\sim\text{O}\begin{smallmatrix} \text{C}_6\text{H}_4 \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 145^\circ\text{C}$, $T_f = 334^\circ\text{C}$, $E = 3,4 \text{ GPa}$
POM	$\sim\sim\sim\text{OCH}_2\sim\sim\sim$	$T_g = -82^\circ\text{C}$, $T_f = 181^\circ\text{C}$, $E = 3,6 \text{ GPa}$
PA 6.6	$\sim\sim\sim\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}(\text{CH}_2)_4\text{NH}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 50^\circ\text{C}$, $T_f = 265^\circ\text{C}$, $E = 2,6 \text{ GPa}$
SAN	$\sim\sim\sim\text{CH}_2\text{CHCH}_2\text{CH}\begin{smallmatrix} \text{CN} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	
PES	$\sim\sim\sim\text{O}\begin{smallmatrix} \text{C}_6\text{H}_4 \\ \end{smallmatrix}\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}\sim\sim\sim$	$T_g = 225^\circ\text{C}$, $E = 2,0 \text{ GPa}$
PTFE	$\sim\sim\sim\text{CF}_2\text{CF}_2\sim\sim\sim$	$T_g = 127^\circ\text{C}$, $T_f = 327^\circ\text{C}$, $E = 0,8 \text{ GPa}$
PA 6	$\sim\sim\sim\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \end{smallmatrix}(\text{CH}_2)_5\text{NH}\sim\sim\sim$	$T_g = 47^\circ\text{C}$, $T_f = 215^\circ\text{C}$, $E = 2 \text{ a } 3 \text{ GPa}$

5. Nota Final

São, como se vê, cada vez mais especializadas e numerosas as utilizações de materiais poliméricos em engenharia. No âmbito desta síntese, não foram referidos outros tipos de materiais poliméricos com potencial campo de aplicação industrial, como sejam os polímeros condutores, por constituírem um domínio de aplicação que ainda se encontra num estágio de investigação laboratorial.

Anexo 2

Nomenclatura dos Principais Polímeros de Engenharia

Símbolo	Nome
LDPE	Poli(etileno de baixa densidade)
PVC	Poli(cloreto de vinilo)
HDPE	Poli(etileno de alta densidade)
PP	Polipropileno (isotático)
PS	Poli(estireno)
PMMA	Poli(metacrilato de metilo)
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PBT	Poli(tereftalato de butileno)
PC	Poli(carbonato)
PPO	Poli(óxido de p-fenileno)
PEEK	Poli(eteretercetona)
POM	Poli(óxido de metileno), poliacetal
PA 6.6	Poli(hexametileno-adipamida), Poliamida 6.6
SAN	Poli(estireno co acrilonitrilo)
PES	Poli(etersulfona)
PTFE	Poli(tetrafluoroetileno)
PA 6	Poli(ε-caprolactama), poliamida 6