Michelle Carvalho Seljan

Polímeros como materiais de engenharia - plástico substituindo o metal na produção de componentes mecânicos e estruturais

Polymers as engineering materials - plastic replacing metal in the production of structural and mechanical components

Trabalho de Graduação

Orientador: Prof. Marcos Venicius S. Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Michelle Carvalho Seljan

Polímeros como materiais de engenharia - plástico substituindo o metal na produção de componentes mecânicos e estruturais

Polymers as engineering materials - plastic replacing metal in the production of structural and mechanical components

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius S. Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC - Rio

Prof. Luís Fernando Figueira da Silva
Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica - PUC - Rio

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram e deram todo suporte para essa realização; por todo amor e carinho, por colocar sempre as filhas em primeiro lugar, pela paciência nos meus piores momentos, pelo apoio incondicional e pela melhor orientação que sempre me deram.

Agradeço à toda a minha família e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram nessa longa e difícil caminhada, sempre demonstrando orgulho por mim.

Agradeço aos meus professores que dedicaram seu tempo para me ensinar, conversar, aconselhar e passar todos os seus conhecimentos.

Agradeço ao meu orientador, que além de um excelente professor, me fez ganhar gosto pelo tema escolhido e me ajudou a elaborar esse trabalho da melhor forma, me mostrando um caminho muito mais proveitoso em relação ao tema abordado, todas as orientações, revisões e tempo cedido.

RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo sobre a viabilidade da substituição de componentes de metal por componentes de plástico. O primeiro capítulo é destinado à apresentação do trabalho, neste encontra-se o objetivo, a justificativa e a metodologia aplicada na composição do mesmo. O segundo capítulo descreve o histórico do aparecimento dos polímeros na indústria e a evolução do mesmo, assim como a sua procura pelas empresas.

O terceiro capítulo é dedicado à descrição das propriedades que definem os materiais. Essas propriedades podem ser separadas em propriedades físicas e químicas, com enfoque nas propriedades mecânicas dos materiais. O quarto capítulo é destinado aos tipos de materiais poliméricos sintéticos existentes e como esses estão classificados quanto a sua aplicação. O quinto capítulo apresenta o comportamento mecânico dos polímeros, destacando-se a curva de tensão *versus* deformação, deformação macroscópica e deformação viscoelástica, entre outras propriedades dos materiais poliméricos. O sexto capítulo destina-se aos fatores que influenciam as propriedades mecânicas e aditivos diversos. Neste capítulo serão discutidas ações para modificar a estrutura molecular do polímero e substâncias que são introduzidas intencionalmente para melhorar ou modificar algumas propriedades e tornar o polímero mais útil. O sétimo capítulo destina-se à comparação do grupo de materiais poliméricos com outros materiais utilizados na engenharia, principalmente os metais. Neste capítulo serão abordadas uma série de cartas de desempenho e gráficos que possuem propriedades específicas nas quais são comparados diversos materiais distintos, levando-se em consideração a mesma propriedade mecânica. Finalmente, o oitavo capítulo apresenta as considerações finais obtidas deste estudo.

Palavras chave: Materiais estruturais, propriedades mecânicas, aditivos.

ABSTRACT

This work main goal is to study the viability of replacing metal components by plastic components. The first chapter presents an introduction of the whole work, containing its main objective, reason and the methodology applied. The second chapter shows the history of polymers in industries as well as its changes through time and its constantly growing demand by companies. The third chapter describes the particular properties of each component. These properties can be separated into chemical and physical ones, and within the physical properties we will focus on the description of the mechanical properties of the materials. The fourth chapter presents the study of the different types of synthetic polymers materials and how they are rated for their applicability. The fifth chapter aims to show the mechanical behavior of polymers and its mechanical properties such as tensile strain curve, macroscopic strain, viscoelastic strain, among other properties of the polymeric materials. The chapter ends with the description and a graphic representation of those properties regarding a generic group of polymers. The sixth chapter is intended for factors that influence mechanical properties and several additives. In this chapter, we will consider actions that modify the molecular structure of the polymer and substances that are intentionally introduced to improve or modify some properties, making the polymer more useful. The seventh chapter objective is to compare the group of polymeric materials with other materials used in engineering, especially metals. In this chapter, we will discuss a series of charts and graphs that have specific properties in which different materials are compared, taking into account the same mechanical properties. Finally, the eighth chapter contains the final considerations obtained from this study.

Keywords: Structural materials, mechanical properties, additions.

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABELAS	9
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo.....	10
1.2. Justificativa	10
2. Revisão Bibliográfica	11
2.1. Histórico	11
3. Propriedades que caracterizam os materiais	12
3.1 Propriedades químicas.....	12
3.2 Propriedades físicas	12
3.2.1 Propriedades mecânicas	13
4 Tipos de materiais poliméricos sintéticos	17
4.1 Poliadição.....	17
4.2 Policondensação	18
4.3 Modificação química de outro polímero	19
5 Comportamento mecânico dos polímeros	22
5.2 Deformação macroscópica.....	25
5.3 Deformação viscoelástica	26
5.4 Fratura.....	26
5.5 Resistência ao impacto.....	27
5.6 Fadiga	27
6 Fatores que influenciam as propriedades mecânicas e aditivos diversos	29
6.1 Massa molar	29
6.2 Grau de Cristalinidade	29
6.3 Tratamento térmico.....	30
6.4 Cargas	30
6.5 Plastificantes.....	31
6.6 Estabilizantes.....	31
6.7 Corantes	32
6.8 Retardantes de chamas.....	32

7	Comparação dos materiais poliméricos com outros materiais de engenharia	33
8	Considerações finais	47
	Referências	48
	Referências eletrônicas	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos materiais de engenharia (Fonte: Biasotto Mano, 2011).....	9
Figura 2: Gráfico do comportamento tensão-deformação dos polímeros (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	23
Figura 3: Gráfico da influência da temperatura do poli(metil metacrilato) (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	24
Figura 4: Deformação macroscópica de um polímero (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	25
Figura 5: tensão x número de ciclos até a falha (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	27
Figura 6: Influência do grau de linearidade e da massa molar no polímero (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	29
Figura 7: Redução do espaço de busca de um material (Fonte: Ashby, 2012).....	32
Figura 8: Diagrama esquemático, E-p, mostrando as diretrizes para três índices (Fonte: Ashby, 2012).....	34
Figura 9: Diagrama esquemático E - Custo relativo (Fonte: Ashby, 2012).....	35
Figura 10: Diagrama resistência - Densidade (Fonte: Ashby, 2012).....	36
Figura 11: Diagrama Módulo de Young – Resistência (Fonte: Ashby, 2012).....	37
Figura 12: Diagrama Tenacidade à fratura - Módulo de Young (Fonte: Ashby, 2012).....	38
Figura 13: Diagrama Tenacidade à fratura – Tensão de escoamento (Fonte: Ashby, 2012).....	39

Figura 14: Diagrama Limite de fadiga – Limite de tensão (Fonte: Ashby, 2012).....	40
Figura 15: Ponto de fusão dos materiais (Fonte: Ashby, 2012).....	41
Figura 16: Diagrama Resistência – Temperatura de serviço máxima (Fonte: Ashby, 2012).....	42
Figura 17: Diagrama Condutividade térmica – Resistividade elétrica (Fonte: Ashby, 2012).....	43
Figura 18: Diagrama Resistência – Resistividade elétrica (Fonte: Ashby, 2012).....	44
Figura 19: Consumo dos materiais de engenharia por ano (Fonte: Ashby, 2012).....	45
Figura 20: Estratégia de escolha aplicada aos materiais (Fonte: Ashby, 2012).....	46

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Polímeros industriais resultantes da poliadição (Fonte: Biasotto Mano, 2011).....	17
Tabela 2 - Polímeros industriais resultantes da policondensação (Fonte: Biasotto Mano, 2011).....	19
Tabela 3 - Polímeros industriais resultantes da modificação de outros polímeros (Fonte: Biasotto Mano, 2011).....	20
Tabela 4 – Classificação dos polímeros quanto a sua aplicação (Fonte: Biasotto Mano, 2011).....	21
Tabela 5 – Característica mecânica à temperatura ambiente de alguns polímeros (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013).....	24

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução do tempo o homem vem desenvolvendo cada vez mais a tecnologia e os trabalhos de engenharia. Com o aumento da demanda e da necessidade e inovações tecnológicas o homem se viu obrigado a buscar alternativas na indústria com o objetivo de melhorar os mecanismos de produção e diminuir prazos e custos. Com isso, apresentou-se a busca por materiais cada vez mais eficazes e eficientes (Sant'Anna).

O primeiro material utilizado pelo homem foi a madeira, seguindo-se a pedra, os metais, a cerâmica, o vidro e, finalmente, os polímeros. Essa evolução pode ser acompanhada através das idades da pedra, dos metais, Antiga, medieval, moderna e contemporânea. A idade contemporânea apresenta grandes inovações em realça ao uso de materiais inovadores, ou seja, materiais não convencionais devido ao grande desenvolvimento da tecnologia. (Biasotto Mano, 2011)

Figura 1: Classificação dos materiais de engenharia (Fonte: Biasotto Mano, 2011)

No início do século XX foi descoberto e provado que alguns materiais produzidos pela química consistiam de moléculas gigantescas, resultado do encadeamento de mais de 10.000 átomos de carbono. Esses produtos de síntese de longas cadeias apresentavam repetição de pequenas unidades estruturais, e foram denominados polímeros. Diversos

produtos encontrados na natureza também apresentam imensas moléculas, tais como a borracha, a lã e etc. (Biasotto Mano, 2011)

Estruturas químicas que não apresentam unidades estruturais regularmente repetidas são chamadas de macromoléculas. Nessa época ficou comprovado que a natureza dessas macromoléculas era semelhante à das moléculas pequenas, já conhecidas, e contribuíram de forma considerável para o desenvolvimento dos materiais poliméricos. (Biasotto Mano, 2011)

Atualmente, a indústria química passa por processos de modernização contínuo, apresentando instalações com novas tecnologias, o que inclui novos materiais. Por isso, cresce o número de empresas interessadas em investir em pesquisas e melhorias dos mesmos, principalmente os que são ditos como não convencionais, como os polímeros. (Biasotto Mano, 2011)

1.1. Objetivo

Este trabalho consiste em um estudo sobre a viabilidade da substituição de componentes estruturais e mecânicos de metal por componentes poliméricos.

No desenvolvimento, materiais de engenharia convencionais serão avaliados/comparados com o plástico, levando em consideração as propriedades gerais, em especial as mecânicas que caracterizam o material.

1.2. Justificativa

O tema abordado foi escolhido por se apresentar como uma boa oportunidade de mudança no paradigma do mercado consumidor em relação à utilização dos componentes metálicos, onde se observa a busca incessante pela diminuição de prazos e o corte de custos, assim como características relevantes tais como o peso dos componentes mecânicos. Os materiais poliméricos já vêm sendo utilizados por algumas das grandes empresas do Brasil e com possibilidade de conquistar um espaço muito maior no mercado nos próximos anos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Histórico

A busca pelo melhor desempenho dos componentes estruturais mecânicos tem crescido bastante nas empresas. Com isso percebe-se a constante substituição dos componentes tradicionalmente metálicos por materiais poliméricos, devido a crescente evolução apresentada por esse material e seu alto desempenho. O uso de plásticos oferece muitas vantagens, mas as diferenças inerentes entre os plásticos e os metais devem ser levadas em consideração em relação a cada projeto específico. Por isso, é necessário fazer uma revisão completa para garantir que a substituição seja vantajosa e adequada para a produção (Sant'Anna).

A constante evolução dos polímeros de engenharia de alto desempenho pode, na maioria das vezes, atender aos requisitos com outra importante vantagem: a redução do custo total de um componente estrutural ou mecânico, assim como o peso do mesmo. Todos esses benefícios advêm principalmente das vantagens desses materiais em termos de possibilidades de design e processos de fabricação (Sant'Anna).

Uma possível mudança de material só deverá ser considerada se este trouxer benefícios reais para o projeto. Para isso, é muito importante que se conheça as propriedades dos componentes estruturais e mecânicos, tais como as suas características termoplásticas, as possibilidades que esses materiais proporcionam, entre outras e, principalmente se o componente trabalhar sob altas temperaturas ou ambiente potencialmente agressivos (Sant'Anna).

Sabe-se que uma escolha incorreta de um material pode levar a custos totais muito mais altos do que se poderia esperar. Isso também pode ser visto em projetos nos quais são aplicadas alterações, porém, não é feita uma adaptação do projeto para uma combinação material-processo.

Assim, torna-se essencial conhecer as diferenças que cada material apresenta desde o começo do projeto, visando o melhor desempenho e menor custo. Somente assim as vantagens da utilização dos plásticos poderão ser efetivamente aproveitadas, de forma que a substituição de materiais de engenharia convencionais pelo material polimérico atinja plenamente seus objetivos (Ashby, 2012 e Sant'Anna).

3. Propriedades que caracterizam os materiais

A escolha de um material para o desenvolvimento de um determinado projeto depende de como este material se comporta em um ambiente específico. O seu desempenho vai depender de características específicas e individuais que definem o material. Essas características podem ser divididas em 2 grupos: propriedades químicas e propriedades físicas (Biasotto Mano, 2011).

Saber em quais condições de projeto o material irá trabalhar é fundamental para saber quais características são mais relevantes para a escolha do material correto. Nesta sessão serão descritas brevemente cada um desses subgrupos, com foco nas subdivisões das propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que o interesse de estudo é a diferença do comportamento mecânico dos componentes mecânico e estruturais metálicos e poliméricos.

3.1 Propriedades químicas

Propriedades químicas são aquelas que se referem a mudança molecular, isto é, mudanças estruturais. São exemplos de propriedades químicas: resistência à oxidação, resistência à degradação térmica, resistência à radiação ultravioleta, resistência à água, resistência à ácidos, resistência à bases, resistência à solventes e reagentes e inflamabilidade (Biasotto Mano, 2011).

3.2 Propriedades físicas

São aquelas que não envolvem mudança molecular, ou seja, não apresentam alteração na composição química do material. Essas propriedades são avaliadas por métodos clássicos descritos nas normas de cada país. As normas brasileiras são elaboradas pela *Associação Brasileira de Normas técnicas* (ABNT) (Biasotto Mano, 2011).

Dentre as propriedades físicas se destacam as propriedades térmicas (calor específico, condutividade térmica, expansão térmica, fusão cristalina, transição vítrea, temperatura de distorção ao calor), propriedades elétricas (rigidez dielétrica, resistividade volumétrica, constante dielétrica, fator de potência), propriedades óticas (transparência, índice de refração) e as propriedades mecânicas que serão detalhadas mais profundamente a seguir

(Biasotto Mano, 2011).

3.2.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais definem o comportamento do material, isto é, a resposta do material quando submetidos à esforços externos. Essa propriedade pode ser definida basicamente pela capacidade de desenvolverem deformações, sejam elas reversíveis ou irreversível e pela resistência a ruptura. As principais propriedades mecânicas serão descritas a seguir (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.1 Resistência à tração

Resistência à tração é a máxima tensão que um material pode suportar ao ser tracionado antes de se romper. É uma propriedade intensiva que não depende do tamanho da amostra, porém outros fatores tais como a presença de defeitos na superfície e temperatura do material interferem no resultado do teste (Biasotto Mano, 2011).

O limite de resistência à tração é determinado em um ensaio de tração no qual se produz a curva de tensão x deformação. No ensaio de tração diferentes materiais apresentam diferentes curvas de tensão-deformação. Alguns materiais fraturam sem se deformar plasticamente. Esse tipo de fratura é considerado fratura frágil. Os materiais dúcteis apresentam deformação plástica e um possível estiramento antes da fratura (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.2 Alongamento na ruptura

O alongamento na ruptura representa o aumento percentual do comprimento da amostra no ensaio de tração após o seu rompimento. (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.3 Módulo de elasticidade

Módulo de elasticidade ou módulo de Young, é uma medida da rigidez de um material sólido. É uma propriedade que depende da composição química e da estrutura do material, e pode ser medida pela razão entre a tensão e a deformação dentro do limite elástico (deformação reversível) da curva do ensaio de tração. Enquanto na região onde a Lei de Hooke

é válida (regime elástico linear) o módulo de Young pode ser obtido pelo coeficiente angular do gráfico tensão-deformação; para materiais cuja porção inicial elástica da curva tensão-deformação não é linear não é possível determinar o módulo de Young pelo coeficiente angular. Nestes casos, tanto o módulo tangente quanto o módulo secante são normalmente usados. Módulo tangente é tomado como sendo a inclinação da curva tensão-deformação em um nível de tensão específico, enquanto que o módulo secante representa a inclinação de uma secante traçada a partir da origem até um dado ponto da curva (Castro e Meggiolaro, 2009).

A recuperação durante a deformação elástica é o grau que o material retorna às suas dimensões originais, após a remoção da tensão aplicada ao corpo de prova. Ela será dependente da intensidade da tensão e do seu tempo de aplicação (Biasotto Mano, 2011).

O caráter elástico de um material pode ser descrito pela resiliência do mesmo, isto é, pela quantidade de energia desenvolvida após a deformação. Ela é medida pelo percentual de energia recuperada (Biasotto Mano, 2011).

Já a histerese é um fenômeno observado em alguns materiais e pode ser descrita como a memória do material para certas propriedades que dependem de estados anteriores. No caso das propriedades mecânicas, a histerese pode ser medida pela perda de energia durante um ciclo de deformação e recuperação de um corpo de prova (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.4 Resistência à compressão

Semelhante à resistência à tração, a resistência à compressão é determinada pelo valor da tensão máxima que um material sólido suporta ao sofrer compressão longitudinal, antes que o mesmo apresente colapso (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.5 Resistência à flexão

Resistência à flexão é o valor de tensão máximo que um material rígido pode suportar quando sujeito a flexão, antes de se romper (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.6 Resistência à fadiga

Resistência à fadiga é a capacidade de um material de suportar carregamentos cíclicos, isto é, a tensão máxima, desenvolvida alternadamente como tração e compressão que um material pode resistir quando a peça é submetida a dobramentos e desdobramento consecutivos antes de apresentar falha mecânica (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.7 Resistência ao impacto

O impacto é caracterizado por um esforço de natureza dinâmica. A resistência ao impacto é a capacidade de um determinado material de absorver a energia do impacto. Representa a tenacidade de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta. Os materiais que apresentam pouca resistência ao impacto são chamados de materiais frágeis. Já os que apresentam resistência relativamente alta durante o impacto são chamados de materiais tenazes (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.8 Dureza

A dureza de um material é caracterizada pela resistência à penetração, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, ou ao risco de da formação de uma marca permanente devido à penetração de outro material (Biasotto Mano, 2011).

A dureza depende diretamente da força de ligação entre os átomos, íons ou moléculas e do estado do material (processo de fabricação, tratamento térmico, etc.). A maioria dos ensaios de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma penetração durante um intervalo de tempo. A medida de dureza do material é dada em função das características da marca de impressão e da carga aplicada (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.9 Resistência à fricção

A resistência à fricção depende diretamente do grau de acabamento da superfície de um material por ser representado pela força que se opõe à força de deslizamento, ou seja, a resistência à fricção é caracterizada pelo coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito é a razão entre a força de fricção e a carga aplicada a superfície de 2 placas sobrepostas, por exemplo, entre as quais se desenvolve o atrito (Biasotto Mano, 2011).

3.2.1.10 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é a capacidade do material de resistir ao desgaste produzido pela fricção com outro material. Essa medida é feita tomando como base a comparação com materiais considerados padrão, utilizados para fins semelhantes. Essa propriedade pode ser determinada pela perda percentual do volume de um corpo (Biasotto Mano, 2011).

4 Tipos de materiais poliméricos sintéticos

Os materiais poliméricos sintéticos são materiais obtidos por via sintética e que apresentam longas cadeias em suas estruturas. As suas propriedades são diversas e vão depender diretamente da técnica de preparação, do tipo de reação realizada e do material de partida para a sua produção. Essas variáveis devem ser determinadas levando em consideração as características que se deseja obter no produto final, ou seja, no polímero sintético a ser produzido (Biasotto Mano, 2011).

Um polímero sintético pode ser produzido a partir de três reações gerais: a poliadição, policondensação e modificação química de outro polímero. As técnicas de preparação também são variadas, dependendo do que se espera do resultado final. As técnicas podem ser: em massa, em solução, em emulsão, em suspensão ou interfacial (Biasotto Mano, 2011).

4.1 Poliadição

Na poliadição os materiais primários para a formação do polímero, isto é, os materiais monômeros de partida, apresentam na maioria das vezes duplas ligações entre átomos de carbono. Nessa reação química não há formação de subprodutos e os pesos moleculares podem apresentar valores muito altos (Biasotto Mano, 2011).

Tabela 1 - Polímeros industriais resultantes da poliadição (Fonte: Biasotto Mano, 2011)

Polímero	Sigla
Poliétileno	PE
Polipropileno	PP
Poli-isobutileno	PIB
Poliestireno	PS
Polibutadieno	BR
Poli-isopreno	IR
Copoli(etileno-propileno-dieno)	EPDM
Copoli(isobutileno-isopreno)	IIR
Copoli(butadieno-estireno)	SBR
Poli(cloreto de vinila)	PVC
Poli(cloreto de vinilideno)	PVDC
Policloropreno	CR
Poli(fluoreto de vinilideno)	PVDF
Poli(tetraflúor-etileno)	PTFE
Poli(acetato de vinila)	PVAC
Poli(metacrilato de metila)	PMMA
Poliacrilonitrila	PAN
Copoli(butadieno-acrilonitrila)	NBR
Copoli(estireno-acrilonitrila)	SAN
Copoli(estireno-butadieno-acrilonitrila)	ABS
Copoli(etileno-acetato de vinila)	EVA

Observação: Nomenclatura aceita pela IUPAC.

4.2 Policondensação

Diferente da poliadição, a policondensação apresenta formação de subprodutos. Esses subprodutos serão posteriormente retirados do meio reacional. (Biasotto Mano, 2011).

Tabela 2 - Polímeros industriais resultantes da policondensação (Fonte: Biasotto Mano, 2011)

Polímero	Sigla
Poli(glicol etilénico)	PEG
Poli(óxido de fenileno)	PPO
Poli(éter-éter-cetona)	PEEK
Resina epoxídica	ER
Poli(dimetil-siloxano)	PDMS
Poli(tereftalato de etileno)	PET
Poli(tereftalato de butileno)	PBT
Policarbonato	PC
Poli(ftalato-maleato de etileno)*	PEPM
Poliamida-6	PA-6
Poliamida-11	PA-11
Poliamida-66	PA-66
Poliamida-610	PA-610
Poli(fenileno-tereftalamida)**	PPTA
Polibenzimidazol	PBI
Poli(amida-imida)	PAI
Poli(éter-imida)	PEI
Poli-imida	PI
Poli(sulfeto de fenileno)	PPS
Poli(aril-sulfona)	PAS
Poli(éter-sulfona)	PES
Resina de fenol-formaldeído	PR
Resina de uréia-formaldeído	UR
Resina de melamina-formaldeído	MR
Poli(óxido de metileno)***	POM
Poliuretano	PU

* Poliéster insaturado

** Poliamida aromática

*** Poliacetal

Observação: Nomenclatura aceita pela IUPAC.

4.3 Modificação química de outro polímero

Já a modificação de polímeros consiste nas reações químicas utilizando polímeros já existentes, sejam eles naturais ou sintéticos. Através dessa técnica pode-se variar o peso molecular, as propriedades mecânicas e elétricas de polímeros já existentes, dependendo do objetivo do produto final. A fabricação de polímeros industriais permite uma ampla aplicação desses materiais na engenharia (Biasotto Mano, 2011).

Tabela 3 - Polímeros industriais resultantes da modificação de outros polímeros (Fonte: Biasotto Mano, 2011)

Polímero	Sigla
Nitrato de celulose	CN
Acetato de celulose	CAC
Metil-celulose	MC
Hidroxi-etil-celulose	HEC
Carboxi-metil-celulose	CMC
Poli(álcool vinílico)	PVAL
Copoli(isobutileno-isopreno) clorado	CIIR
Polietileno clorado	CPE
Polietileno cloro-sulfonado	CSPE
Poli(cloreto de vinila) clorado	CPVC

Observação: Nomenclatura aceita pela IUPAC.

Nessa técnica os polímeros podem ser aditivados com uma pequena quantidade de ingredientes específicos que são capazes de alterar a sua cor, flexibilidade, resistência mecânica, entre outras. Além disso, os polímeros podem ser misturados de duas formas: aqueles que apresentam misturas miscíveis de diferentes polímeros chamadas de ligas poliméricas, e aqueles que apresentam misturas imiscíveis chamadas de misturas poliméricas (Biasotto Mano, 2011).

De uma forma geral os polímeros podem ser classificados em 2 subgrupos: plásticos de uso geral e plásticos de engenharia. Os de uso geral podem ser divididos em termoplástico e termorrígidos. Os de engenharia, por sua vez, podem ser separados pelos de uso geral e os de uso específico. A Tabela 4 mostra a classificação dos plásticos quanto a sua aplicação (Biasotto Mano, 2011).

Tabela 4 – Classificação dos polímeros quanto a sua aplicação (Fonte: Biasotto Mano, 2011)

Aplicação	Grupo	Principais plásticos	Sigla
Geral	Termoplástico	Polietileno Polipropileno Poliestireno Poliestireno de alto impacto Copoli(estireno-acrilonitrila) Copoli(acrilonitrila-butadieno-estireno) Copoli(etileno-acetato de vinila) Poli(cloreto de vinila) Poli(acetato de vinila) Poli(acrilonitrila) Poli(cloreto de vinilideno) Poli(metacrilato de metila)	PE PP PS HIPS SAN ABS EVA PVC PVAC PAN PVDC PMMA
	Termorrígido	Resina epoxídica Resina de fenol-formaldeído Resina de uréia-formaldeído Resina de melamina-formaldeído Poliuretanos*	ER PR UR MR PU
Engenharia	Uso geral	Polietileno de altíssimo peso molecular Poli(óxido de metileno) Poli(tereftalato de etileno) Poli(tereftalato de butileno) Policarbonato Poliamidas alifáticas Poli(óxido de fenileno) Poli(fluoreto de viilideno)	UHMWPE POM PET PBT PC PA PPO PVDF
	Uso especial	Poli(tetraflúor-etileno) Poliarilatos Poliésteres líquido-cristalinos Poliamidas aromáticas Poli-imidas Poli(amida-imida) Poli(éter-imida) Poli(éter-cetona) Poli(éter-éter-cetona) Poli(éter-sulfona) Poli(aril-sulfona) Poli(sulfeto de fenileno)	PTFE PAR LCP PA PI PAI PEI PEK PEEK PES PAS PPS

A análise do comportamento mecânicos da classe dos polímeros será apresentada e discutida no próximo capítulo.

5 Comportamento mecânico dos polímeros

As razões pelas quais deve-se conhecer as características, as aplicações e o processamento dos materiais poliméricos são inúmeras. Devido a sua ampla aplicação, tais como materiais de construção, é bastante razoável dizer que é grande a probabilidade de um engenheiro precisar trabalhar com um material polimérico em algum ponto da sua vida profissional. Dessa forma, conhecer o comportamento mecânico desses materiais é essencial para uma possível alteração e controle do seu módulo de elasticidade e resistências. Além disso, a adição de aditivos aos materiais poliméricos permite a modificação de várias de suas propriedades, tais como: sua resistência à abrasão, a sua tenacidade, rigidez, estabilidade térmica, cor, entre outras (Callister e Rethwisch, 2013).

O conhecimento do processamento/estrutura/propriedades/desempenho para as fibras poliméricas é importante para poder definir a característica que cada polímero deve ter. Por exemplo: os materiais poliméricos usados como fibras nos produtos têxteis devem ser relativamente resistentes. Portanto, para que esse material possua a característica desejada, que neste caso é ter uma boa resistência, deve-se conhecer os mecanismos pelo qual os polímeros se deformam plasticamente e finalmente as técnicas que estão disponíveis para aumentar a resistência desses materiais (Callister e Rethwisch, 2013).

5.1 Tensão-deformação

As características mecânicas dos materiais poliméricos são altamente sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e a natureza química do ambiente (presença de água, oxigênio, solventes orgânicos e etc.) (Callister e Rethwisch, 2013).

Em um ensaio de tração se pode encontrar três diferentes tipos de comportamento para os materiais poliméricos. A Figura 2 mostra as curvas dos diferentes comportamentos.

Figura 2: Gráfico do comportamento tensão-deformação dos polímeros (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

A curva A ilustra um comportamento típico de um material polimérico frágil. Se percebe que o material fratura enquanto se deforma elasticamente, ou seja, o material não apresenta escoamento plástico (Callister e Rethwisch, 2013).

A curva B ilustra o comportamento de um material polimérico considerado plástico. A deformação inicial é elástica, seguida da deformação plástica do material, e finalmente a fratura. O comportamento dessa curva muito se assemelha a comportamento dos materiais metálicos (Callister e Rethwisch, 2013).

Já a curva C ilustra um comportamento totalmente elástico, típico de materiais poliméricos chamados de elastômeros, tais como a borracha. Esses materiais apresentam grandes tensões recuperáveis e produzidas sob baixos níveis de tensões (Callister e Rethwisch, 2013).

A Tabela 5 apresenta propriedades mecânicas para diferentes materiais poliméricos. Se percebe que essas propriedades variam de polímero para polímero e a escolha do material para um determinado projeto vai depender de características específicas que se deseja no material.

Tabela 5 – Característica mecânica à temperatura ambiente de alguns polímeros (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

<i>Material</i>	<i>Gravidade Específica</i>	<i>Módulo em Tração [GPa (ksi)]</i>	<i>Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]</i>	<i>Limite de Escoamento [MPa (ksi)]</i>	<i>Alongamento na Ruptura (%)</i>
Polietileno (baixa massa específica)	0,917–0,932	0,17–0,28 (25–41)	8,3–31,4 (1,2–4,55)	9,0–14,5 (1,3–2,1)	100–650
Polietileno (alta massa específica)	0,952–0,965	1,06–1,09 (155–158)	22,1–31,0 (3,2–4,5)	26,2–33,1 (3,8–4,8)	10–1200
Cloreto de polivinila	1,30–1,58	2,4–4,1 (350–600)	40,7–51,7 (5,9–7,5)	40,7–44,8 (5,9–6,5)	40–80
Politetrafluoroetileno	2,14–2,20	0,40–0,55 (58–80)	20,7–34,5 (3,0–5,0)	13,8–15,2 (2,0–2,2)	200–400
Polipropileno	0,90–0,91	1,14–1,55 (162–225)	31–41,4 (4,5–6,0)	31,0–37,2 (4,5–5,4)	100–600
Poliestireno	1,04–1,05	2,28–3,28 (330–475)	35,9–51,7 (5,2–7,5)	25,0–69,0 (3,63–10,0)	1,2–2,5
Poli(metil metacrilato)	1,17–1,20	2,24–3,24 (325–470)	48,3–72,4 (7,0–10,5)	53,8–73,1 (7,8–10,6)	2,0–5,5
Fenol-formaldeído	1,24–1,32	2,76–4,83 (400–700)	34,5–62,1 (5,0–9,0)	–	1,5–2,0
Náilon 6,6	1,13–1,15	1,58–3,80 (230–550)	75,9–94,5 (11,0–13,7)	44,8–82,8 (6,5–12)	15–30
Poliéster (PET)	1,29–1,40	2,8–4,1 (400–600)	48,3–72,4 (7,0–10,5)	59,3 (8,6)	30–300
Polycarbonato	1,20	2,38 (345)	62,8–72,4 (9,1–10,5)	62,1 (9,0)	110–150

Além disso, sabe-se que as características mecânicas dos materiais poliméricos são muito sensíveis à alteração de temperatura. Essa característica pode ser observada em todos os materiais poliméricos, como revela a análise do gráfico da tensão-deformação do polímero *polimetil metacrilato* em diferentes temperaturas apresentado na Figura 3, na qual existem mudanças no comportamento das curvas em função da temperatura de ensaio (Callister e Rethwisch, 2013).

Figura 3: Gráfico da influência da temperatura do poli(metil metacrilato) (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

Na Figura 3 percebe-se que quanto maior a temperatura menor é o módulo de elasticidade do material, assim como o limite de resistência à tração. Porém, o aumento de temperatura prova um aumento da ductilidade do material. A 40 °C o material pode ser considerado totalmente frágil e a 50/60 °C o material apresenta uma deformação plástica considerável (Callister e Rethwisch, 2013).

5.2 Deformação macroscópica

Na Figura 4 se observa o comportamento macroscópico em tração de um material polimérico semicristalino.

Figura 4: Deformação macroscópica de um polímero (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

Nesse gráfico pode-se ver as representações esquemáticas dos perfis do corpo de prova ao longo do ensaio. O limite superior da curva de deformação um pequeno pescoço se forma na seção do corpo de prova. Com o início da formação do pescoço a tensão cai. O alongamento do corpo de prova prossegue pela propagação do pescoço ao longo do comprimento útil, ou seja, toda deformação subsequente fica confinada nessa região do pescoço até que o material frature (Callister e Rethwisch, 2013).

5.3 Deformação viscoelástica

Sabe-se que o comportamento dos polímeros depende da temperatura em que se encontra o material. Um polímero pode se comportar como um vidro em temperaturas muito baixas, como uma borracha em temperaturas intermediárias (acima da temperatura vítrea) e como um líquido viscoso em temperaturas muito altas. Em temperaturas baixas o comportamento mecânico do polímero se comporta conforme a lei de Hooke, $\sigma = E\varepsilon$. Nas temperaturas altas o material polimérico se comporta de forma semelhante a um líquido viscoso. Nas temperaturas intermediárias o polímero é um material sólido com características de uma borracha. Nessa condição as propriedades mecânicas dos polímeros são combinações dos dois extremos. Essa condição é chamada de viscoelasticidade (Callister e Rethwisch, 2013).

Nesta condição a deformação elástica é independente do tempo. Isso significa que quando a tensão externa aplicada sob o material é liberada a deformação é totalmente recuperada. Já para um comportamento viscoelástico intermediário a imposição de uma tensão resulta em uma deformação elástica instantânea seguida de uma deformação viscosa dependente do tempo, constituindo uma forma de inelasticidade. O comportamento viscoelástico dos polímeros depende tanto do tempo quanto da temperatura (Callister e Rethwisch, 2013).

5.4 Fratura

A fratura nos materiais acontece quando as trincas, que se formam em regiões que apresentam concentração de tensões, se propagam até o material se romper.

Nos polímeros a fratura pode acontecer de variadas formas, dependendo do tipo

de polímero. Os polímeros termofixos apresentam fratura frágil por possuírem redes com muitas ligações cruzadas. Já os polímeros termoplásticos podem apresentar tanto fratura dúctil como fratura frágil. Muitos materiais também são capazes de apresentar uma transição dúctil frágil. A temperatura contribuirá bastante para a característica da fratura dos polímeros. Uma fatura frágil, por exemplo, é favorecida quando há redução de temperatura. Outros fatores que contribuem para a fratura frágil são, por exemplo, presença de entalhe e modificações no material que aumentem a temperatura de transição vítrea. (Callister e Rethwisch, 2013).

Com o aumento da temperatura os termoplásticos vítreos se tornam dúcteis quando a temperatura está próxima a sua temperatura de transição. Antes da fratura o polímero apresenta escoamento plástico (Callister e Rethwisch, 2013).

5.5 Resistência ao impacto

As características observadas em um ensaio de Charpy em metais também podem ser observados em um ensaio feito em polímeros. O tipo de fratura apresentada no ensaio vai depender da temperatura, do tamanho da amostra, da taxa de deformação, do modo de aplicação da carga durante o ensaio, entre outros (Callister e Rethwisch, 2013).

Além de serem frágeis em baixas temperaturas, os polímeros amorfos possuem baixa resistência ao impacto. A maioria deles apresenta transição dúctil-frágil em uma faixa de temperatura muito estreita e quanto mais mole for o material menor será a resistência ao impacto. O que se deseja normalmente é que o material possua uma alta resistência ao impacto e que a temperatura de transição dúctil-frágil seja inferior à temperatura ambiente (Callister e Rethwisch, 2013).

5.6 Fadiga

Assim como nos outros materiais, o polímero pode apresentar falhas por fadiga quando submetido a carregamentos cíclicos. Em geral o limite resistência à fadiga nos materiais poliméricos são muito inferiores do que os apresentados nos metais. Isso acontece porque os polímeros são muito mais sensíveis à frequência de aplicação da carga do que os materiais metálicos. Esses carregamentos cíclicos resultam em um aquecimento do material e a falha pode ser causada devido ao amolecimento do material, processo típico da fadiga

(Callister e Rethwisch, 2013).

A Figura 5 mostra a curva de alguns materiais poliméricos na forma de tensão em função do número de ciclos até a falha.

Figura 5: Tensão x Número de ciclos até a falha (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

6 Fatores que influenciam as propriedades mecânicas e aditivos diversos

Não só a temperatura influencia no comportamento mecânico dos materiais poliméricos. Existem diversos fatores que contribuem para a alteração de como os polímeros se comportam, sejam eles elementos estruturais ou de processamento. Estes serão abordados a seguir (Callister e Rethwisch, 2013).

6.1 Massa molar

Estudos mostram que quanto maior a massa molar de um polímero, principalmente nos polímeros semicristalinos, maior é o limite de resistência à tração. Essa dependência se comporta segundo a equação abaixo:

$$LRT = LRT_{\infty} - \frac{A}{M_n}$$

Onde LRT_{∞} é o limite de resistência à tração correspondente para uma massa molar infinita e A é uma constante. O comportamento segundo essa equação pode ser explicado pelo aumento no número de entrelaçamentos na cadeia com o aumento de M_n (Callister e Rethwisch, 2013).

6.2 Grau de Cristalinidade

Como o grau de cristalinidade é um fator que afeta a extensão das ligações secundárias intermoleculares ele influencia de forma significativa na alteração das diversas propriedades mecânicas (Callister e Rethwisch, 2013).

Percebe-se que o módulo de tração aumenta nos materiais poliméricos cristalinos com o grau de cristalinidade. Isso acontece porque nas regiões cristalinas há grande quantidade de ligações secundárias entre os segmentos (Callister e Rethwisch, 2013).

Além disso, o grau de cristalinidade pode aumentar a resistência do polímero e pode tornar o material mais frágil (Callister e Rethwisch, 2013).

A Figura 6 mostra a influência do grau de cristalinidade e da massa molar nas características físicas do polietileno (Callister e Rethwisch, 2013).

Figura 6: Influência do grau de linearidade e da massa molar no polímero (Fonte: Callister e Rethwisch, 2013)

6.3 Tratamento térmico

Pode-se aumentar a porcentagem de cristalinidade, tamanho e perfeição dos cristalinos com o recozimento de polímeros semicristalinos. O aumento da temperatura de recozimento em materiais não estirados pode levar ao aumento do limite de escoamento, redução da ductilidade, aumento no módulo de tração (Callister e Rethwisch, 2013).

É possível ressaltar que esses fenômenos observados no recozimento são opostos aos observados nos materiais metálicos. Esses, por sua vez, apresentam diminuição de resistência, amolecimento e melhora na ductilidade (Callister e Rethwisch, 2013).

Para as fibras poliméricas estiradas os efeitos do recozimento sobre o módulo de tração é totalmente oposto ao dos materiais não estirados: o seu módulo de tração diminui com o aumento da temperatura de recozimento, em razão da perda de orientação da cadeia cristalina induzida pela formação (Callister e Rethwisch, 2013).

6.4 Cargas

Quando se deseja melhorar propriedades dos polímeros tais como os limites de resistência à tração e compressão, resistência à abrasão, tenacidade e as estabilidades dimensionais, entre outras propriedades, é comum que se adicione ao mesmo. Os materiais utilizados como carga podem ser pó de madeira, pó e areia de sílica, vidro, argila, calcário, e até mesmo polímeros sintéticos. Usar esses materiais como carga é uma boa estratégia uma vez que as cargas substituem parte do volume do polímero, que é bem mais caro que o

material utilizado como cargas, obtendo-se uma redução no custo final do produto (Callister e Rethwisch, 2013).

6.5 Plastificantes

Outro aditivo que pode ser aplicado ao polímero é o plastificante. Este, quando aplicado ao material, aumenta a flexibilidade, a ductilidade e a tenacidade do polímero, além de provocar redução na dureza e na rigidez dos mesmos (Callister e Rethwisch, 2013).

A estrutura dos plastificantes é, em sua maioria, líquida, com baixa pressão de vapor e baixas massas molares (Callister e Rethwisch, 2013).

O aumento da flexibilidade e da ductilidade acontece porque as pequenas moléculas dos plastificantes se acomodam entre as grandes cadeias poliméricas, aumentando a distâncias entre as cadeias e consequentemente reduzindo as ligações secundárias intermoleculares (Callister e Rethwisch, 2013).

Os plastificantes têm um papel bastante importante para os polímeros devido ao fato de os materiais poliméricos serem intrinsecamente frágeis à temperatura ambiente. Os plastificantes reduzem a temperatura vítrea do polímero, fazendo com que estes possam ser empregados em temperaturas ambientes apresentando melhor flexibilidade e ductilidade. Exemplos de polímeros com o emprego de plastificantes são: tubos, capas de chuva e cortinas (Callister e Rethwisch, 2013).

6.6 Estabilizantes

Outro aditivo de extrema importância para os polímeros são os estabilizantes. Estes, por sua vez, atuam contra o processo de deterioração dos materiais poliméricos.

A deterioração em polímeros pode acontecer de diversas formas. Uma delas é através da exposição a luz, em particular à radiação ultravioleta (UV). A radiação ultravioleta atua nas cadeias moleculares dos polímeros causando o rompimento de algumas ligações covalente, o que pode resultar na formação de ligações cruzadas (Callister e Rethwisch, 2013).

A estabilização da radiação UV pode ser feita de duas formas distintas. A

primeira consiste em adicionar uma fina camada feita de um material que absorve UV sobre a superfície do polímero. Este atua como bloqueador da radiação solar, não permitindo que os raios penetrem no polímero. O segundo consiste na adição de matérias que impedem que as ligações quebradas pela radiação UV participe de outras reações que danifiquem o polímero. Isso é possível porque esse material reage com essas ligações que foram quebradas (Callister e Rethwisch, 2013).

Outro tipo de dano para o polímero seria a oxidação. Nesse caso, os estabilizantes atuam no consumo do oxigênio antes que este chegue a atingir o polímero (Callister e Rethwisch, 2013).

6.7 Corantes

Os corantes são aditivos que conferem uma cor específica ao polímero. Eles podem ser utilizados na forma de matizes ou pigmentos. Os matizes se dissolvem no polímero. Já os pigmentos permanecem como uma fase distinta. Possuem tamanho pequeno e índice de refração próximo ao dos polímeros (Callister e Rethwisch, 2013).

Além da tonalidade da cor, os pigmentos podem atribuir opacidade ao polímero (Callister e Rethwisch, 2013).

6.8 Retardantes de chamas

A maioria dos polímeros, quando na sua forma pura, são altamente inflamáveis. Esta é uma grave preocupação principalmente nos brinquedos de crianças. Os aditivos retardantes de chamas atuam melhorando a resistência dos polímeros ao fogo. Eles atuam interferindo com o processo de combustão através da fase gasosa, ou pela iniciação de uma reação de combustão diferente, que gera menos calor e reduz a temperatura, causando a desaceleração ou interrupção do fogo (Callister e Rethwisch, 2013).

7 Comparação dos materiais poliméricos com outros materiais de engenharia

A escolha de um material específico para um projeto requer uma estratégia para poder selecionar os melhores materiais e processos para o projeto. Isso significa que não existe o melhor material para todos os projetos, cada projeto específico ira demandar estudo para a escolha do material mais adequado (Ashby, 2012).

Uma boa estratégia de projeto inclui o cumprimento dos requisitos do projeto, desenvolvimento (corporificar), refinamento (detalhar) e especificar o produto. A escolha do material caminha em paralelo com esse processo (Ashby, 2012).

Figura 7: Redução do espaço de busca de um material (Fonte: Ashby, 2012)

Ao longo do processo de seleção de material, o projeto determinará quais são as propriedades exigidas do material. Entretanto, para que a seleção aconteça de maneira efetiva é extremamente importante que se conheça, não só as propriedades de diferentes materiais, mas também que se estabeleça uma comparação entre diferentes materiais com as mesmas propriedades, além de se saber o comportamento destes materiais sob condições específicas de utilização.

A seguir serão exibidas cartas de desempenho de materiais para diversas propriedades. Essas cartas são de extrema usabilidade e facilidade, já que é possível fazer uma rápida consulta da propriedade desejada, comparando as diversas classes de materiais disponíveis para o uso na engenharia.

O objetivo dos diagramas mostrados a seguir é procurar, dentro do subconjunto de

materiais que cumprem os limites das propriedades e que maximizam o desempenho do componente mecânico estrutural (Ashby, 2012).

A Figura 8 apresenta a relação entre o módulo de Young (E) *versus* a densidade (ρ) para três índices de materiais de baixo peso (estruturas rígidas)).

Figura 8: Diagrama esquemático, E *versus* ρ , mostrando as diretrizes para três índices (Fonte: Ashby, 2012)

As retas representadas no gráfico são consideradas diretrizes de seleção, isto é, elas mostram a inclinação da família de retas que pertencem àquele índice. Dessa forma, é possível saber o subconjunto de materiais que maximiza o desempenho para cada geometria de carregamento. Por exemplo, pode-se ter um caso em que todos os materiais que estão sobre uma mesma reta têm o mesmo desempenho como um leve painel rígido. Os materiais que estão acima da reta apresentam um desempenho melhor, e os que estão abaixo um desempenho pior. Os índices exibidos no diagrama podem ser variados, podendo ser do tipo E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, $E^{1/3}/\rho$, entre outros. A reta diretriz que deverá ser utilizada dependerá da especificação do projeto visado (Ashby, 2012).

Nesse diagrama podemos ver que tanto o metal quanto o polímero apresentam

módulo de Young e densidade relativamente altos. Apesar de estarem próximos no diagrama, o metal ainda apresenta melhor desempenho em relação aos polímeros por possuir valores mais altos do módulo de Young e densidade. Dependendo da especificação do projeto, os metais e os polímeros podem estar na mesma linha de diretriz de seleção. Isso significa que os metais poderão ser facilmente substituídos pelos polímeros em um determinado projeto que exija certa especificação. Porém, essa substituição só deverá ser efetivamente efetuada caso o polímero cumpra as outras exigências de projeto e apresente um custo relativamente inferior ou metal, e isso dependerá de vários outros fatores, incluindo a disponibilidade do material no mercado.

Outro diagrama interessante de analisar é o de custo relativo por unidade de volume, em relação ao módulo de Young do material (Figura 9).

Figura 9: Diagrama esquemático E - Custo relativo (Fonte: Ashby, 2012)

Com esse diagrama é possível ter uma ideia geral do custo que o material implicará no projeto. Comparando o metal com o polímero é possível observar que ambos os materiais estão praticamente na mesma faixa de custo por unidade de volume. Dependendo do metal escolhido este pode apresentar um custo mais alto que o polímero, porém com um módulo de Young superior ao polímero. Isso implica que se o projeto exigir um material que possua módulo de elasticidade superior a 10 GPa não será possível substituir o metal pelo material polimérico. Porém, se o observarmos que o polímero está localizado na mesma linha de diretriz de seleção que o metal no diagrama anterior, a substituição do metal pelo polímero no projeto

se apresentará bastante favorável devido ao custo reduzido do polímero em relação ao metal.

A próxima carta de desempenho (Figura 10) mostra a relação entre materiais com os mais diferentes níveis de resistência ao escoamento (σ_y) e suas respectivas densidades.

Figura 10: Diagrama Resistência - Densidade (Fonte: Ashby, 2012)

É possível perceber que a faixa de resistência ao escoamento para os materiais de engenharia é muito abrangente, variando entre 0,01 e 10⁴ MPa. Além disso, quando se compara os diagramas apresentados nas Figuras 8 e 10, se percebe que o módulo de elasticidade dos materiais apresenta uma faixa de valores bastante estreita, o que não acontece com a resistência ao escoamento, que dependendo da classe do material pode ser bastante extensa. (Ashby, 2012).

Por um lado, pode-se considerar este fato um ponto positivo, uma vez que os projetistas têm a possibilidade de manipular e estipular a resistência variando a composição e a escolha do material pertencente a uma mesma classe (Ashby, 2012).

É possível observar que a classe dos polímeros apresenta uma resistência ao escoamento que varia entre 10 e 100 MPa. Já os metais apresentam uma faixa mais abrangente, variando de 10 e 1000 MPa. Como ambos possuem faixas em comum de σ_y , o metal poderia

ser facilmente substituído pelo material polimérico, dependendo as demais especificações do projeto. Além disso, reparar-se que os metais e os polímeros de encontram na mesma linha de diretrizes de seleção para vários índices diferentes.

A Figura 11 apresenta o diagrama do módulo de Young *versus* a resistência ao escoamento.

Figura 11: Diagrama Módulo de Young – Resistência ao escoamento (Fonte: Ashby, 2012)

Nesse diagrama é possível observar a abrangência da deformação no escoamento (σ_y/E) dos materiais, característica que representa a deformação à qual o material cessa de ser linearmente elástico. Observa-se que a faixa de deformação dos polímeros de engenharia varia de 0,01 a 0,1. Para os metais esses valores são 10 vezes maiores, no mínimo. Os elastômeros estão na faixa de 1 a 10, muito superior a qualquer outra classe de materiais, devido ao seu baixo módulo de elasticidade (Ashby, 2012).

Esse diagrama pode influenciar bastante na escolha do material em um projeto devido ao fato de os materiais apresentarem valores bastante discrepantes e da deformação no escoamento poder ser uma característica bastante útil para o projeto.

prejuízos de tenacidade para o projeto.

O diagrama da Figura 13 relaciona a tenacidade com outra propriedade importante: tensão limite de escoamento (S_y).

Figura 13: Diagrama Tenacidade à fratura – Tensão de escoamento (Fonte: Ashby, 2012)

O diagrama de tenacidade versus tensão limite de escoamento permite analisar uma característica bastante importante do material: o escoamento anterior a fratura.

Os metais são materiais bastante resistentes e tenazes, por isso são bastante utilizados na engenharia mecânica estrutural (Ashby, 2012).

A tensão que ocorrerá a fratura dependerá da tenacidade à fratura, assim como o comprimento da trinca. A equação abaixo descreve o comprimento de transição da trinca ao qual o comportamento frágil substitui o comportamento dúctil (Ashby, 2012).

$$c_{crit} = \frac{k_{1c}^2}{\pi \sigma_y^2} \quad (2)$$

As linhas tracejadas do gráfico representam o comprimento de transição da trinca e abrange uma grande faixa de valores, podendo ir de dimensões nano até dimensões macrométricas. Na análise do gráfico percebe-se que os materiais que se encontram na parte inferior direita apresentam alta resistência e baixa tenacidade. Isso implica que a fratura nesses materiais acontece antes de sofrerem escoamento. Já os materiais que se encontram na parte superior esquerda escoam antes de sofrerem fratura (Ashby, 2012).

Esse diagrama é ideal para a seleção de materiais que atuarão em um projeto que apresenta estruturas que necessitam suportar cargas. Nesse caso, os metais apresentam-se mais tenazes que os polímeros, mostrando uma combinação de resistência-tenacidade maior que o polímero. Ainda assim, seria possível a substituição do metal pelo polímero para projetos em que ambos os materiais se encontrem na mesma linha da transição de trinca.

A Figura 14 relaciona o limite de fadiga com a resistência à tração.

Figura 14: Diagrama Limite de fadiga – Resistência à tração (Fonte: Ashby, 2012)

O limite à fadiga está totalmente relacionado com a resistência, principalmente a resistência à tração. No diagrama mostrado metais e os polímeros aglomeram-se nas proximidades da linha:

$$\sigma_e \approx 0,33 \sigma_{ts} \quad (3)$$

Vale ressaltar que quase todos os materiais falham por fadiga a tensões bem mais baixas do que o limite de resistência à tração (Ashby, 2012).

A Figura 15 está relacionada com o comportamento em fluência dos materiais e apresenta o ponto de fusão para diferentes classes de materiais.

Figura 15: Ponto de fusão dos materiais (Fonte: Ashby, 2012)

É possível perceber que tanto os polímeros apresentam ponto de fusão relativamente inferior aos metais. Os metais, por apresentarem altos pontos de fusão, só começam a apresentar fluência quando submetidos a temperaturas bem acima da temperatura ambiente. Os polímeros apresentam pontos de fusão na faixa de 150-200 °C, e os vítreos, temperaturas entre 50-150 °C. Ambos, quando carregados à temperatura ambiente, sofrem fluência lentamente (Ashby, 2012).

Pode-se dizer que quanto maior o ponto de fusão de um material melhor, pois este não sofrerá fluência quando submetido à temperatura ambiente. Neste sentido, o metal se apresenta uma melhor alternativa quando comparado aos polímeros.

A Figura 16 relaciona a temperatura de serviço máxima com a resistência ao escoamento.

Figura 16: Diagrama Resistência ao escoamento – Temperatura de serviço máxima (Fonte: Ashby, 2012)

É possível perceber que tanto os metais quanto os polímeros de baixo ponto de fusão apresentam resistência trabalhável à temperatura ambiente, porém quando a temperatura se aproxima de 300 °C eles deixam de ser úteis. A maioria dos polímeros apresentam temperatura resistência útil abaixo de 150 °C (Ashby, 2012).

Se o projeto exigir que o material trabalhe à altas temperatura a melhor escolha para o material a ser utilizado no projeto seria metais refratários, tais como o tungstênio, alumina, entre outros. Os polímeros certamente não são a melhor escolha de material quando este deve ser submetido a altas temperaturas, porém, se a temperatura de trabalho for abaixo de 100 °C este pode vir a ser uma escolha na substituição do metal para componentes mecânico estruturais.

O próximo diagrama (Figura 17) relaciona a condutividade térmica com a resistividade elétrica.

Figura 17: Diagrama Condutividade térmica – Resistividade elétrica (Fonte:

Ashby, 2012)

Este diagrama se apresenta bastante útil para a seleção de materiais para aplicações nas quais essas duas propriedades se apresentem importantes. No caso dos metais a condução térmica e a condução elétrica estão relacionadas devido a dependência dos elétrons livres, o que resulta na sua posição correlacionada na parte superior esquerda do diagrama (Ashby, 2012).

Esta é a propriedade que apresenta uma faixa mais ampla de valores. Neste caso os polímeros apresentam uma resistividade elétrica bastante superior aos metais, variando de 10^{16} a $10^{28} \mu\Omega.cm$, enquanto os metais apresentam valores que variam de 1 a $10^4 \mu\Omega.cm$.

O próximo diagrama (Figura 18) relaciona a resistência com a resistividade elétrica.

Figura 18: Diagrama Resistência – Resistividade elétrica (Fonte: Ashby, 2012)

Neste diagrama os metais se encontram na extrema esquerda. Eles são bastante resistentes se comparados com os demais materiais, mas a sua resistividade elétrica é relativamente baixa comparada aos demais. Os polímeros, por sua vez, apresentam alta resistividade elétrica e, além de serem materiais resistentes, eles são flexíveis e fáceis de moldar, além de serem excelentes isolantes. Eles podem ser utilizados para blindagem de cabos, isolamento de mecanismos de distribuição elétrica, entre outros, apresentando-se como uma melhor escolha em relação ao metal em um projeto que vise essas características (Ashby, 2012).

O gráfico de barras da Figura 19 apresenta uma perspectiva do consumo dos materiais utilizados na engenharia por ano. Em média consome-se certa de 10 bilhões de toneladas de materiais de engenharia por ano.

Figura 19: Consumo dos materiais de engenharia por ano (Fonte: Ashby, 2012)

O interessante desse gráfico é observar o consumo de materiais poliméricos em comparação ao consumo dos metais. Há 50 anos o consumo dos polímeros era extremamente pequeno. Hoje em dia o consumo dos materiais poliméricos comerciais tais como o polietileno, o polipropileno, o PVC, entre outros, muito se aproxima do consumo dos materiais metálicos, em especial do aço (Ashby, 2012).

Este aumento no consumo dos polímeros provavelmente está ligado às propriedades desses materiais se assemelharem aos metálicos. Quando analisados um gráfico do consumo de materiais por ano podemos relacionar esse consumo com o impacto ambiental, visto que este aumenta com o consumo (Ashby, 2012).

O impacto ambiental pode ser um fator de importante contribuição para a escolha dos polímeros em substituição do metal. Primeiro porque este material pode ser totalmente fabricável, fato que não é aplicável ao metal. Depois porque os polímeros são materiais que podem ter a sua estrutura facilmente modificada para um novo projeto, por exemplo, sem precisar utilizar novas matérias, sem falar que os polímeros são materiais recicláveis.

De uma forma geral, a escolha de um material pode seguir o seguinte cronograma:

Figura 20: Estratégia de escolha aplicada aos materiais (Fonte: Ashby, 2012)

8 Considerações finais

Há uma grande variedade de materiais disponíveis no mercado para a fabricação de componentes mecânicos.

Não obstante, cresce o número de pesquisas para o desenvolvimento de determinado material com o intuito de utilizá-lo sob as mais variadas aplicações possíveis. Dentre as principais razões para este fato pode-se citar a preocupação no que diz respeito ao impacto ambiental, seja da extração da matéria prima até o seu descarte, além da otimização do tempo de execução de um projeto, entre outros.

Pode-se concluir que a escolha de um material depende de diversos fatores. Não existe o melhor material global, na verdade, o melhor material dependerá da especificação do projeto. Cada tipo de projeto exigirá uma propriedade específica do material. Por isso é importante conhecer as principais propriedades dos materiais que se deseja adotar, e mais, possuir ferramentas que permitam comparação entre os diversos materiais existentes no mercado.

Atualmente o metal é o principal material utilizado na fabricação de componentes mecânico e estruturais por apresentar ótimas propriedades mecânicas, as quais a maioria dos projetos exige. Porém, é possível observar o crescimento da implementação dos polímeros na indústria. Isso se apresenta devido a essa classe de materiais apresentar um comportamento mecânico que se assemelha aos metais, em determinadas aplicações. Além disso, por serem materiais que podem ser totalmente fabricáveis, os polímeros podem se adequar as exigências que o projeto impõe.

As comparações das cartas de desempenho dos materiais mostram que em algumas propriedades o polímero se diferencia bastante do metal. Portanto, a escolha do uso do mesmo dependerá da propriedade essencial que o projeto apresente.

Além das vantagens de fabricação, os polímeros se apresentam como uma boa alternativa ao uso do metal por possuírem um peso estrutural inferior ao metal. Ainda assim, o custo total do projeto deverá ser avaliado para que a substituição seja vantajosa.

Referências

- [1] Biasotto Mano, E., – “Polímeros como materiais de engenharia”, Ed. Edgar Blucher Ltda., 2011.
- [2] Callister, W.D.Jr., Rethwisch, D.G., – “Ciência e engenharia de materiais – Uma introdução”, Ed. LTC, 2013.
- [3] Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D. – “ Engenharia, Ciência, Processamento e Projeto”, Ed. Elsevier, 2012
- [4] Castro. J.T.P e Meggiolaro.M.A.,” Iniciação de trincas- Vol I. “, 2009.

Referências eletrônicas

- [5] Sant’Anna, J.A.Sant’Anna – “Plástico substituindo o metal na produção de peças: Como fazer a seleção de materiais nesta troca, tendências e exemplos”. Disponível em: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/plastico_metal.asp>. Acesso em: 10 Nov. 2016.