

JOSÉ ALEX PICCOLO SANT'ANNA

SUBSÍDIOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS

São Paulo
2007

JOSÉ ALEX PICCOLO SANT'ANNA

SUBSÍDIOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2007

JOSÉ ALEX PICCOLO SANT'ANNA

SUBSÍDIOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Doutor Hélio Wiebeck

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

**Sant Anna, José Alex Piccolo
Subsídios para seleção de materiais termoplásticos / J.A.P.
Sant Anna. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
104 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Seleção de materiais e processos de fabricação 2.Seleção de materiais poliméricos termoplásticos (Aplicações industriais) 3.Metodologia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Às minhas meninas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós Valentim (*in memoriam*) e Lúdia que, mesmo estando longe, estavam muito perto na influência de minha formação.

Aos meus pais Alex e Cléia, que sempre me deram o suporte necessário para chegar aonde cheguei.

Ao Prof. Dr. Márcio Morelli, meu orientador na Iniciação Científica e que muito colaborou na minha formação acadêmica, mesmo que tenha tentado me desviar do caminho dos plásticos.

Ao Prof. Dr. Hélio Wiebeck, meu orientador nesta jornada, por acreditar nesta nova área de estudos que começamos no LMPSOL.

A todos no LMPSOL que, de alguma maneira colaboraram com meu trabalho, mesmo que fosse nas conversas durante o churrasco anual.

A todos na Solvay Química Ltda, que acreditaram no meu potencial e me acolheram tão bem, especialmente a Maria Clara Pipitone, Alexandre Guimarães e Mônica Martins.

A aqueles na Solvay Advanced Polymers, LLC. que, direta ou indiretamente trabalham comigo, e especialmente Edgar Benjamim, Kirit C. Desai, John Perry, “Chuck” Rooney, Matthew Howlett e Mark Saltsman que, muitas vezes discutiram aspectos de seleção de materiais termoplásticos na indústria comigo.

Aos meus amigos e companheiros de tantas horas Murilo, André, Rafael, Alberto, Marreco e Cauê, principalmente aos dois primeiros que enfrentaram junto comigo as dificuldades de fazer um mestrado enquanto se trabalha em uma grande empresa.

Ao Yuri, que me passou o “vírus” da seleção de materiais e me incentivou a seguir este caminho e que por tantas vezes colaborou, em longas conversas, com este trabalho.

Aos funcionários do sistema de bibliotecas da Escola Politécnica, pois sem eles, seria muito mais difícil reunir toda a bibliografia necessária para este trabalho.

Aos funcionários da Secretaria do Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais, especialmente ao Franklin e a Vera, por todo o apoio necessário.

Um beijo e um agradecimento especial a minha esposa Priscilla e minha filha Stella, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram, muitas vezes sem nem mesmo perceber. À Priscilla ainda devo o crédito por muitas das imagens geradas ou adaptadas para este trabalho.

Finalmente, uma frase retirada da Dissertação do Yuri: a você, que procurou pelo seu nome nestas páginas e não encontrou, minhas desculpas e meu muito obrigado!

É melhor acender uma vela
do que praguejar contra a escuridão.
(Adágio)

RESUMO

A constante evolução dos Materiais Poliméricos e seus compostos, a procura por um melhor desempenho e redução de peso em peças técnicas, têm levado a busca de soluções inovadoras em materiais termoplásticos para peças tradicionalmente produzidas em materiais metálicos. Nestes casos, a fase inicial de um projeto deve ser realizada com muito cuidado e é onde as metodologias de Seleção de Materiais e Processos de Fabricação (SMPF) mais podem contribuir para o sucesso de um produto. Existem muitas ferramentas para seleção de materiais, algumas delas até mesmo voltadas especificamente aos polímeros, mas nota-se que uma metodologia adequada – e talvez específica - ainda seja necessária. O objetivo deste trabalho foi analisar os métodos utilizados na academia e na indústria para a seleção de materiais termoplásticos, bem como os bancos de dados e programas de computador disponíveis, na busca de subsídios para auxiliar profissionais de projeto de produtos, sejam eles engenheiros ou não. Assim, tratou-se inicialmente de aspectos de Engenharia de Materiais e de SMPF e especificamente de Materiais Poliméricos termoplásticos, na busca de oferecer uma base comum por meio de definições e premissas utilizadas. Como é de interesse entender a inserção da filosofia de SMPF na indústria de transformação de materiais termoplásticos, investigou-se os processos de SMPF na academia e na indústria. A partir desta investigação, é apresentada uma discussão entre as semelhanças e uma possível intersecção entre estas duas realidades, analisando-se os sistemas existentes de maneira a apontar caminhos para estas duas áreas e culminando com uma proposta de modificações nas metodologias atuais para adequá-las as necessidades dos projetistas que trabalham com materiais poliméricos.

Palavras-chave: SMPF. Metodologia. Ferramentas. Polímeros. Design. Termoplásticos.

ABSTRACT

The constant evolution of polymers and its compounds, the search for better performance and weight reduction in parts have been leading to innovative solutions in thermoplastic replacing metals in parts traditionally made of the later. In such cases, the initial stages of a project needs a special care and are where the Material and Process Selection (MPS) tools can really shine. If the designer chooses wisely and take advantage of the design freedom made possible by the use of plastics, a part can not only be made more economically but also with a better performance. Many tools are available in the marketplace, some even designed to deal specifically with polymers, but it is becoming clear that a more adequate and specific polymer selection methodology is needed. The objective of this work is to analyze the methodologies used in the academy and in the industry in the area of thermoplastic materials selection, together with the databases and software available, in search for subsidies to help product designers in their work. In this way, this work deals initially with materials engineering, materials and process selection (MPS) and thermoplastic materials basic knowledge, in a way to offer a basis for discussion. As it tries to understand the MPS in the industry, these processes are investigated in the academy first, leading to a discussion on the similarities and possible intersection between both worlds, an analysis of the existing tools, and finally pointing towards modifications on the actual methodologies to bring the theory of MPS to the real world of designers.

Keywords: MPS. Methodology. Polymers. Design tools. Thermoplastics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pirâmide ilustrativa dos requisitos de um projeto de produto e a divisão em projeto de engenharia e projeto industrial.....	2
Figura 2: Custo operacional e comprometimento final de custos em função das etapas de um projeto.	3
Figura 3: Custo relativo de uma alteração no projeto em função da etapa de projeto.	4
Figura 4: Esquema ilustrativo de Ciência e Engenharia de Materiais (CEM).	7
Figura 5: Esquema ilustrativo das áreas de Ciência de Materiais, Engenharia de Materiais e da Ciência e Engenharia de Materiais, com suas distinções e intersecções em relação ao escopo de trabalho em torno do conceito, composição, estrutura, propriedades, função e aplicação dos materiais.	8
Figura 6: A evolução dos materiais de engenharia.	9
Figura 7: Relação entre estrutura, propriedades e processamento dos materiais, mostrando a sua interdependência.	10
Figura 8: Da relação entre estrutura-propriedades-processo e aplicação define-se o escopo da Seleção de Materiais (SM).	12
Figura 9: O problema central da Seleção de Materiais, a interação entre função, material, processo e forma.	13
Figura 10: As interações que definem o volume do duplo tetraedro definem também o escopo de atuação da Seleção de Materiais.	13
Figura 11: Representação esquemática de uma estrutura de polímero amorfo.	16
Figura 12: Representação esquemática da estrutura de um polímero semi-cristalino com domínios cristalinos (ordenados) e amorfos (desordenados).	16
Figura 13: Estrutura molecular do polietileno.	17
Figura 14: representação esquemática de um esferulito.	17
Figura 15: Micrografia utilizando luz polarizada mostrando a estrutura esferulítica do polietileno.	18

Figura 16: Classificação dos materiais poliméricos quanto a sua característica mecânica, térmica e de sua estrutura.	18
Figura 17: Comparativo de resistência à tração e módulo para alguns polímeros carregados e metais.	20
Figura 18: Comparativo de resistência a tração resistência a tração específica para alguns polímeros carregados e metais.	21
Figura 19: Pirâmide dos polímeros destacando as diferentes classes de polímeros quando a estrutura e desempenho, número de produtores e volume anual produzido de cada polímero.	21
Figura 20: Modelo de projeto de Pahl & Beitz.	25
Figura 21: Modelo de design e seleção de materiais.	26
Figura 22: Custo operacional e comprometimento final de custos em função das etapas de um projeto.	34
Figura 23: Custo relativo de uma alteração no projeto em função da etapa de projeto.	35
Figura 24: Foto de uma xícara descartável em PS.	42
Figura 25: Crescimento do número de tipos diferentes de termoplásticos.	43
Figura 26: Reprodução da tela de busca sequencial do serviço IDES em 23 de Janeiro de 2007.	47
Figura 27: Reprodução de uma tela de comparação entre produtos do serviço IDES em 23 de Janeiro de 2007.	48
Figura 28: Reprodução da tela inicial de trabalho do serviço CAMPUS para os materiais da empresa Solvay Advanced Polymers em 11 de dezembro de 2006.	49
Figura 29: Reprodução de uma tela do CES Material Selector, onde podem ser observados dois mapas de propriedades dos materiais e linhas referentes a um determinado índice de mérito.	50
Figura 30: Exemplo de tela de busca avançada do serviço Matweb em 13 de Fevereiro de 2007.	52
Figura 31: Reprodução da tela de busca do serviço AZoM em 13 de Fevereiro de 2007.	53
Figura 32: Reprodução da tela de busca do serviço Omnexus em 11 de dezembro de 2006.	54

Figura 33: Reprodução de uma tela do tutorial do serviço MAS 2.0 em 11 de dezembro de 2006.	58
Figura 34: Reprodução de uma ficha de material do serviço Material ConneXion em 12 de dezembro de 2006.	61
Figura 35: Reprodução da tela de busca do serviço Material Connexion em 12 de dezembro de 2006.	61
Figura 36: Reprodução da tela de busca de materiais do serviço Matério em 25 de fevereiro de 2007.	62
Figura 37: Reprodução de uma ficha de material do serviço Matério em 25 de Fevereiro de 2007.	63
Figura 38: Reprodução da tela de busca do serviço Material Explorer em 25 de Fevereiro de 2007.	65
Figura 39: Reprodução de uma ficha de material do serviço Material Explorer em 25 de Fevereiro de 2007.	65
Figura 40: Esquema de um processo de SMPF e projeto tradicional.	69
Figura 41: Digrama esquemático para projeto de peças plásticas.	70
Figura 42: Módulo de Young versus Temperatura para polímeros amorfos e semicristalinos.	83
Figura 43 Comportamento da tensão e deformação de um termoplástico carregado (Amodel AS-1145 HS da Solvay Advanced Polymers, LLC). ..	89
Figura 44: Gráfico de barras mostrando a temperatura de distorção térmica de diversos materiais. Cada barra mostra o quanto a propriedade pode variar para uma mesmo material.	98
Figura 45: Mapa de propriedade dos materiais, Resistência mecânica versus densidade para diversos materiais.	99
Figura 46: Mapa de propriedade dos materiais no espaço Módulo de Elasticidade versus densidade. Aparecem as diversas classes dos materiais assim como as linhas guia para minimização de peso.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise de similares de alguns serviços disponíveis de bancos de dados informatizados para auxílio de seleção de materiais poliméricos.	68
Tabela 2: Efeito da adição de 30% de fibra de vidro na temperatura de deflexão térmica em alguns termoplásticos amorfos.	87
Tabela 3: Alguns índices de mérito utilizados em projeto.	101
Tabela 4: Principais propriedades dos materiais segundo Ashby.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas
- ABS – Polímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
- ASA – Polímero de Acrilonitrila-Estireno-Acrilato
- ASTM – American Society for Testing Materials – Organismo de normatização Estadounidense equivalente à brasileira ABNT, embora específico para materiais
- BS – British Standards – Organismo normatização britânico, equivalente à brasileira ABNT
- CLTE – Coeficiente Linear de Expansão Térmica, do inglês Coefficient of Linear Thermal Expansion
- CEM – Ciência e Engenharia de Materiais
- CM – Ciência dos Materiais
- DIN – Deutsche Institut für Normung – Organismo de normatização alemão, equivalente à brasileira ABNT
- DMA – Análise Dinâmico Mecânica, do inglês Dynamic Mechanical Analysis
- DTUL – deflexão sob carga, do inglês deflexion under load, similar a HDT
- EM – Engenharia de Materiais
- FV – Fibra de Vidro
- HDPE – Polietileno de Alta Densidade, do inglês High Density PolyEthylene
- HDT – Temperatura de deflexão térmica, do inglês Heat deflection temperature, também conhecido como DTUL
- HIPS – Poliestireno de alto impacto do inglês High Impact PolyStyrene
- HTS – Sulfona de alta temperatura, do inglês High Temperature Sulfone
- IEC – Padrão para testes de propriedades elétricas
- IM – Índice de Mérito
- ISO – International Standard Organization – Organismo Internacional de normatização
- JIS – Japanese Industrial Standards – Organismo de normatização Japonês, equivalente à brasileira ABNT
- LCP – Cristal líquido polimérico do inglês Liquid Crystal Polymer
- LDPE – Polietileno de Alta Densidade, do inglês Low Density PolyEthylene

LLDPE – Polietileno Linear de Baixa Densidade, do inglês Linear Low Density polyethylene

MFI – Índice de fluidez, do inglês Melt Flow Index

PA6 – PoliAmida 6

PA6.6 – Poliamida 6.6

PAA – Poliarilamida

PAI – Poliamidaimida

PBT – Poli (tereftalato de butileno)

PC – Policarbonato

PE UHMW – Polietileno de ultra alta massa molar, do inglês Ultra High Molecular Weight PolyEthylene

PEEK – Polieterecetercetona

PEI – Polietirimida

PES – Polietersulfona

PET – Poli (tereftalato de etileno), do inglês PolyEthylene Teraphtalate

PMMA – Poli (metacrilato de metila)

POM – Poli óxido de metileno, também conhecido como Poliacetal

PP – Polipropileno

PPA – Poliftalamida, do Inglês PoliPhtalAmide

PPc – Polipropileno copolímero

PPC – Polifenilcarbonato

PPh – Polipropileno homopolímero

PPO – Poli óxido de fenileno, do inglês PoyPhenyleneOxide

PPr – Polipropileno random

PPS – Polisulfeto de fenileno, do inglês PolyPhenyleneSulfide

PPSU – Polifenil sulfona, do inglês PolyPhenylSulfone

PS – Poliestireno, do inglês PolyStyrene

PSAI – Poliestireno de alto impacto

PSU – Polisulfona

PVC – Poli (cloreto de vinila), do inglês PolyVinylCloride

PVC plast – Poli (cloreto de vinila) plastificado

PVC rig – Poli (cloreto de vinila) rígido

SAN – Polímero de Estireno-Acrilonitrila

SM – Seleção de Materiais

SMPF – Seleção de Materiais e Processos de Fabricação

SP – Seleção de Processos

T_g – Temperatura de transição vítrea, do inglês Glass transition temperature

T_m – Temperatura de fusão cristalina, do inglês Melting temperature

UL – Underight Laboratories

LISTA DE SIMBOLOS

σ – Tensão

ρ – Densidade

E – Módulo elástico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1 – DEFINIÇÕES E PREMISAS.....	6
1.1 Aspectos de engenharia de materiais e SMPF.	6
1.2 Aspectos de materiais poliméricos.	15
CAPÍTULO 2 ASPETOS ACADÊMICOS E INDUSTRIAIS DA SMPF. ..25	
2.1 Seleção de Materiais e Processos de Fabricação na academia.	25
2.2 Seleção de Materiais e Processos de Fabricação na indústria.	33
CAPÍTULO 3 – DISCUSSÃO E PROPOSTA.....	41
3.1 Seleção de polímeros e a necessidade de uma metodologia adequada.	41
3.2 Análise de Similares.....	46
3.2.1 <i>IDES</i>	46
3.2.2 <i>CAMPUS</i>	48
3.2.3 <i>Granta CES Optimal Polymer Selector</i>	50
3.2.4 <i>MatWeb</i>	51
3.2.5 <i>AZoM A to Z of materials</i>	52
3.2.6 <i>Omnexus Polymer Selector 2.0</i>	54
3.2.7 <i>E-Funda</i>	55
3.2.8 <i>Manufacturing Advisory Service 2.0</i>	56
3.2.9 <i>Fabricantes de materiais Poliméricos Termoplásticos</i>	59
3.2.10 <i>Materiotecas</i>	60
3.2.10.1 <u>Material ConneXion</u>	60
3.2.10.2 <u>Matério</u>	62
3.2.10.3 <u>Materioteca®</u>	63
3.2.10.4 <u>Material Explorer</u>	64
3.2.11 <i>Comparação entre os sistemas</i>	66
3.3 Propostas	69
3.4 Sugestões	72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
APÊNDICE A – Propriedades dos materiais poliméricos	
termoplásticos.	80
APÊNDICE B: Métodos de ensaio.	95
APÊNDICE C: Mapas de Propriedades dos Materiais.	98
APÊNCIDCE D: Biografia.	104

INTRODUÇÃO

“Good design works, excellent design also gives pleasure”¹
(ASHBY; JOHNSON, 2003)

Assim começa e termina um dos mais comentados artigos do professor Michael Ashby, da Universidade de Cambridge, nos últimos tempos. O Design ou Desenho Industrial (DI), como é conhecido no Brasil, é a arte de projetar e planejar um produto. Neste sentido, a atividade de desenho industrial no Brasil abrange tanto o que é conhecido no exterior como projeto de engenharia (*Engineering Design*) como o projeto industrial (*Industrial Design*).

O desenho industrial é “uma atividade projetual que consiste em determinar as propriedades formais dos objetos produzidos industrialmente. Por propriedades formais não se deve entender apenas as características exteriores, mas sobretudo as relações funcionais e estruturais que fazem com que um objeto tenha uma unidade coerente, do ponto de vista do produtor e do ponto de vista do usuário” (MALDONADO, 1991 *apud* WALTER, 2006)².

O projeto de engenharia é aquele que visa atender funções técnicas específicas e tem procedimentos sistematizados, amplamente conhecidos e estudados nos diversos cursos de engenharia. Já o projeto industrial não é tão sistemático como o nome pode sugerir e leva em conta aspectos como forma, cor, textura e outras características estéticas do produto, e a literatura que trata deste tema raramente menciona os aspectos básicos do projeto de engenharia, funcionalidade e eficiência.

Para que um produto tenha sucesso, ele deve ao mesmo tempo atender aos requisitos de Funcionalidade e Usabilidade e também dar satisfação ao usuário (ASHBY, 2003). A Figura 1 ilustra estes requisitos.

¹ Em uma tradução livre, Um bom design funciona, um design excelente também dá prazer.

² MALDONADO, T. **Design industrial**. Lisboa: Edições 70, 2006. 128p.

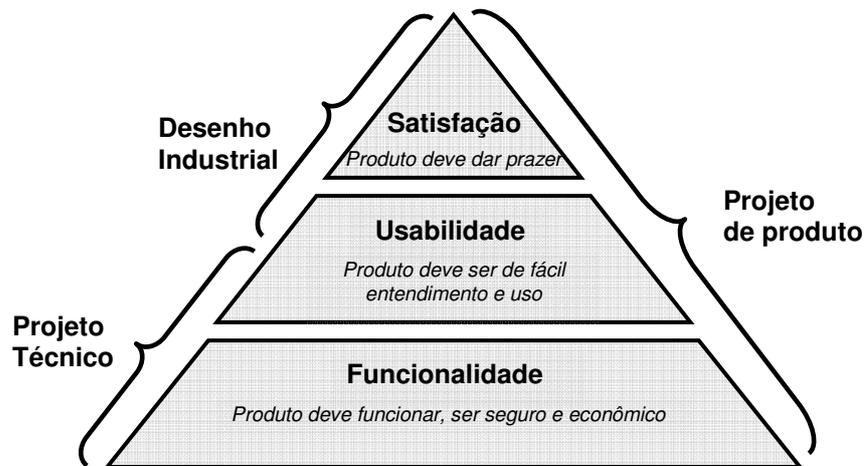


Figura 1: Pirâmide dos requisitos de um projeto de produto e a divisão em projeto de engenharia e projeto industrial. Adaptada de Ashby (2003).

Geralmente, em países desenvolvidos, equipes diferentes cuidam de cada uma destas áreas, mas no caso brasileiro, o Engenheiro, ou o Projetista (também chamado de Desenhista Industrial ou *Designer*) tem a árdua tarefa de trabalhar entre estes dois campos, que podem ser complementares, mas muitas vezes são conflitantes.

“Um produto permanece um conceito, uma idéia, ou talvez um desenho, se nenhum material estiver disponível para convertê-lo numa entidade tangível” (EVBUOMWAN et al., 1995).

A sociedade atual é muito dependente de vários materiais e conforme a compreensão sobre eles foi aumentando ao longo do tempo, novos objetos e artefatos puderam ser manufaturados e construídos. Pode-se dizer que a evolução da espécie humana está intimamente ligada à utilização e ao desenvolvimento dos materiais e dos processos de fabricação e transformação destes em objetos úteis ao homem (COHEN, 1975a). No caso do projeto de um produto, pode-se dizer que mesmo em sua concepção inicial deve-se ter a preocupação da escolha de um material e de um processo de fabricação para que ele se torne realidade.

E é neste ponto em que podem surgir complicações, pois embora no caso do projeto de engenharia as metodologias de Seleção de Materiais e Processo de Fabricação (SMPF) estejam se estabelecendo, no caso do projeto industrial o designer tem que se valer de sua formação, de sua experiência prática e das informações que porventura tenha acesso. Isto ocorre pela falta de acesso dos designers a informações sistematizadas sobre materiais que atendam suas necessidades e que ao mesmo tempo não sacrifique e até estimule a criatividade que deve ser inerente à atividade do projetista (LOVATT; SHERCLIFF, 1998).

No Brasil, isso fica claro em uma pesquisa que indicou que metodologias de SMPF não são utilizadas por designers e arquitetos, embora os dois grupos se mostrem muito interessados pelo tema. Esta aparente contradição se explica justamente pelo fato de que as metodologias e sistemas disponíveis atualmente são contraproducentes no que tange a sua utilização de maneira efetiva e, acima de tudo, sacrificam a criatividade neste processo (ASSUNÇÃO, 2002).

A não utilização das metodologias de SMPF pode levar a complicações no decorrer do projeto que poderiam ser evitadas pela utilização destes, uma vez que estas complicações muitas vezes levam a um aumento no custo e no tempo para se finalizar um projeto. Os custos decorrentes aumentam consideravelmente a medida que ele avança e cerca de 85% dos custos totais são determinados antes mesmo da fase de detalhamento do projeto (CHARLES et al., 2001). Este fato pode ser visto na Figura 2.

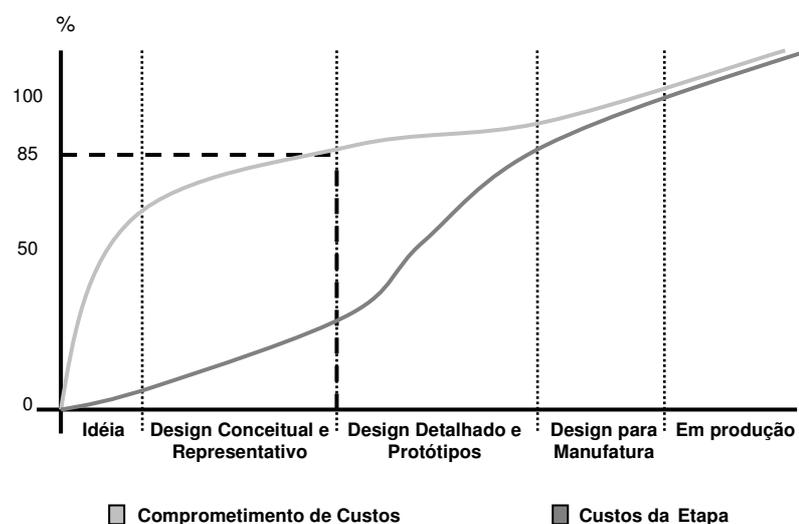


Figura 2: Custo operacional e comprometimento final de custos em função das etapas de um projeto. Adaptado de: Charles, et al., 2001.

Analogamente, pode-se entender que é bastante caro mudar um material escolhido erroneamente para uma aplicação crítica depois de o produto pronto, ao mesmo tempo em que pode ser relativamente mais barato modificar o desenho da peça logo no início de um projeto para que ela não necessite utilizar um material mais custoso, como ilustrado na Figura 3

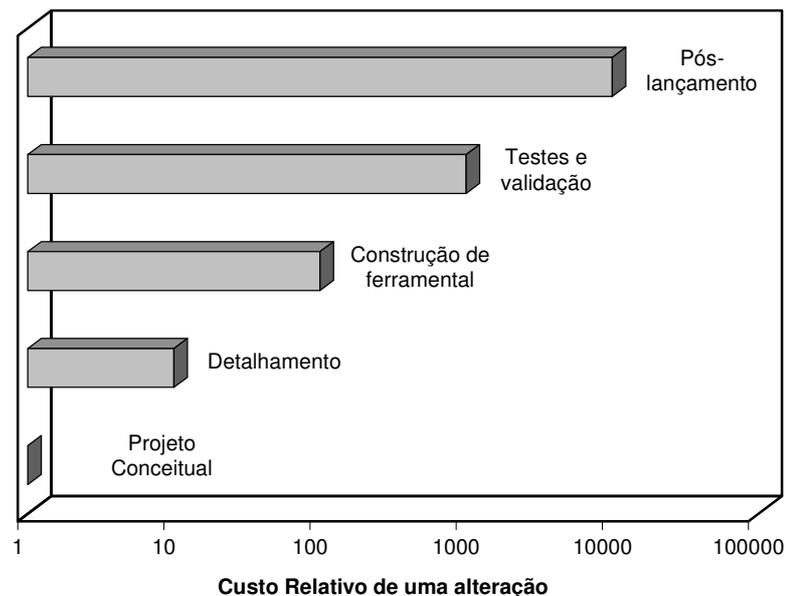


Figura 3: Custo relativo de uma alteração no projeto em função da etapa de projeto. A partir de dados tabelados por Charles et al., 2001.

Os projetistas não têm como conhecer todos os materiais e todos os processos de fabricação, embora muitos deles sejam cobrados exatamente por isso. Por este motivo é que foram desenvolvidas ferramentas para o auxílio de seleção de materiais e processos de fabricação.

Embora bastante discutidos no meio acadêmico nos últimos tempos, a sistematização dos procedimentos de SMPF ainda está longe de ser difundida na indústria. Percebe-se que ela tem um tratamento teórico já bastante aprofundado, mas que muitas vezes não tem relacionamento com a realidade industrial, já que esta nem sempre segue os caminhos traçados nos modelos simplificados da sala de aula ou do laboratório.

Especificamente, tem-se que:

- Existe um distanciamento muito grande entre a Academia e a Indústria;
- Teoria e prática de SMPF são bastante distantes;
- Para SMPF na indústria, formação e experiência valem mais que metodologia e sistematização;
- Poucos recursos humanos na indústria com formação de base em polímeros.

O objetivo deste trabalho foi analisar os métodos utilizados na academia e na indústria para a seleção de materiais termoplásticos, bem como os bancos de dados e softwares disponíveis, na busca de subsídios para auxiliar profissionais de projeto de produtos, sejam eles engenheiros ou não.

Assim sendo, o Capítulo 1 trata de aspectos de Engenharia de Materiais e de SMPF e especificamente de Materiais Poliméricos, na busca de oferecer uma base comum por meio de definições e premissas utilizadas durante este trabalho.

Devido ao interesse em entender a inserção desta filosofia de SMPF na indústria de transformação de materiais termoplásticos, o Capítulo 2 investiga os processos de SMPF na academia e na indústria.

Finalmente, a partir desta investigação, o Capítulo 3 apresenta uma discussão entre as semelhanças e uma possível intersecção entre estas duas realidades, faz uma análise dos sistemas existentes, aponta caminhos para estas duas áreas, culminando com uma proposta de modificações nas metodologias atuais para adequá-las as necessidades dos projetistas que trabalham com materiais poliméricos.

CAPITULO 1 – DEFINIÇÕES E PREMISSAS

1.1 Aspectos de Engenharia de Materiais e Seleção de Materiais e Processos de Fabricação

Os materiais estão intrinsecamente ligados a cultura humana e podem ser apontados como recursos básicos da humanidade, juntamente com energia e informação (COHEN, 1974). Pode-se perceber este fato prestando atenção nos objetos que nos rodeiam, que são feitos de um ou outro material.

Na busca de se determinar a natureza e o escopo da Ciência e Engenharia dos Materiais, assim como apontar subsídios teóricos e práticos para que a pesquisa básica em materiais pudesse ser aplicada industrialmente, a *National Academy of Sciences* dos Estados Unidos criou em fins de 1970 uma comissão para estudar o campo da Ciência e Engenharia dos Materiais denominado *Committee on the Survey of Materials Science and Engineering* (COSMAT), tendo o Prof. Morris Cohen como presidente.

Entre 1970 e 1974, o COSMAT procurou por uma base comum entre diferentes áreas do conhecimento como metalurgia, cerâmica, química e física dos polímeros, física do estado sólido, engenharia mecânica, processos de fabricação entre outras, adotando as seguintes definições:

- Materiais são substâncias com propriedades que as tornam úteis em máquinas, estruturas, dispositivos e produtos.
- Ciência e Engenharia de Materiais (CEM) é a área da atividade humana associada com a geração e aplicação de conhecimento que relacione composição, estrutura e processamento dos materiais às suas propriedades e usos (COHEN, 1974).

Nota-se o foco no interesse humano pelos materiais e posicionamento da CEM como “área meio”, fornecendo subsídios para outras áreas do saber entendidas como “áreas fim”, usuárias deste conhecimento, como por exemplo, a Engenharia mecânica, a Engenharia Civil, a Arquitetura e o Desenho Industrial (WALTER, 2006).

O relatório desse trabalho (COHEN, 1974) também deixa claro a exclusão de substâncias que em outros contextos também são denominados materiais, como alimentos, drogas, água, biomassa, fertilizantes, combustíveis fósseis e o ar, que são melhor estudados e compreendidos por outras áreas de estudo.

Foi ainda indicada a necessidade da criação de cursos de graduação específicos de Engenharia de Materiais³. A Figura 4 apresenta os âmbitos não excludentes de atuação da Ciência de Materiais (CM) e da Engenharia de Materiais (EM). Demonstra-se os conhecimentos manipulados na CEM e faz a distinção entre as áreas de atuação da Ciência de Materiais (CM), de A a D, e da Engenharia de Materiais (EM) de C a G.

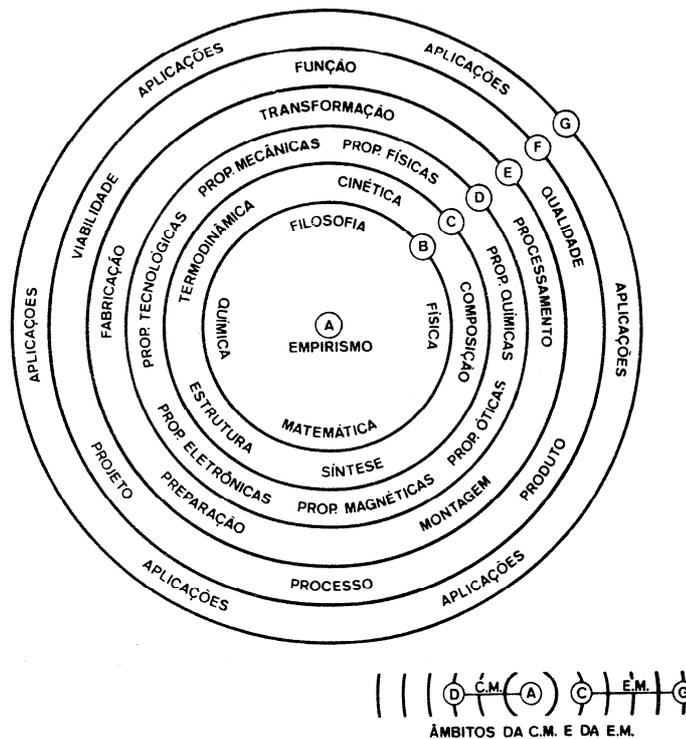


Figura 4: Esquema ilustrativo de Ciência e Engenharia de Materiais (CEM). Fonte: Silva (1986).

³ Já neste mesmo ano era criado na Universidade Federal de São Carlos o curso de Engenharia de Materiais, pioneiro no Brasil. O relatório completo do COSMAT, particularmente o Volume 1 (COHEN, 1975a) é uma boa referência sobre a história, o escopo e a natureza da CEM e que mereceria ser abordado em qualquer curso de história da engenharia, ou mesmo em um curso introdutório a Engenharia dos Materiais. Já os volumes restantes, particularmente o Volume 2 (COHEN, 1975b), foi muito importante para traçar o desenvolvimento da CEM como área de pesquisa nos Estados Unidos, e influenciando o rumo das pesquisas em materiais ao redor do mundo. No Brasil, nunca houve um esforço semelhante, embora a CPMI presidida por Mario Covas (CONGRESSO NACIONAL, 1992) tenha tratado do assunto em meio a seus trabalhos.

A distinção entre essas duas sub-áreas, bem como a intersecção entre elas pode ser visualizada na Figura 5.

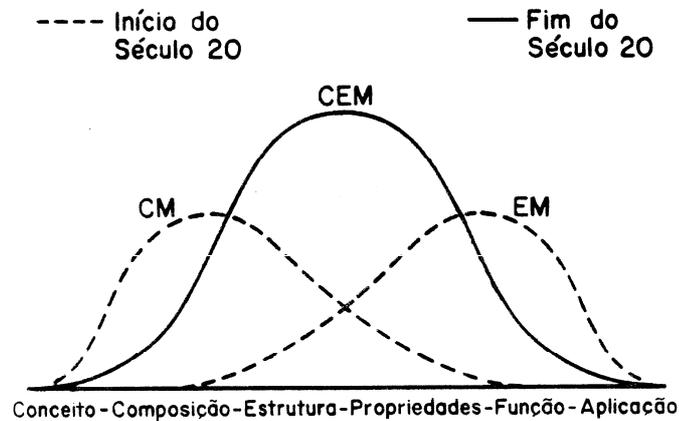


Figura 5: Esquema ilustrativo das áreas de Ciência de Materiais, Engenharia de Materiais e da Ciência e Engenharia de Materiais, com suas distinções e intersecções em relação ao escopo de trabalho em torno do Conceito, Composição, Estrutura, Propriedades, Função e Aplicação dos materiais. Fonte: COHEN (1985).

Embora as definições formais e o campo de trabalho tenham sido determinados a relativamente pouco tempo, deve-se lembrar que os materiais são estudados empiricamente há centenas de gerações. Na antiga Grécia, por exemplo, havia até uma palavra própria: *Hilologia*, a doutrina ou ciência da matéria (COHEN, 1975a).

Historicamente, o desenvolvimento e os avanços da humanidade sempre estiveram intimamente ligados à capacidade do homem em explorar, produzir e manipular materiais para suprir suas necessidades. Pode-se perceber este fato pela maneira como se denomina as eras ao longo da história:

“Nós denominamos as Civilizações pelos principais materiais que elas utilizam: a Era da Pedra, Era do Bronze, Era do Ferro. Uma civilização é tanto desenvolvida quanto limitada pelos materiais de que dispõe. Hoje, o Homem vive na fronteira entre a Era do Ferro e a Era dos Novos Materiais.”

Sir George Paget Thompson,
Premio Nobel de Física de 1937, citado por SILVA (1994).

Os primeiros seres humanos tinham à sua disposição um número de materiais bastante limitado, apenas os de ocorrência natural como pedra, madeira, barro, peles de animais, por exemplo. Nesta época remota, alguns aspectos da moderna seleção de materiais já se faziam presentes, quando, por exemplo, havia a busca dentre esses materiais aquele que mais se adequava a uma determinada utilização. O homem experimentou ossos e chifres, mas o material mais duro e denso que estava disponível para ser atirado em um animal era a pedra. Pode-se dizer que quando ele aprendeu a dar forma aos materiais e a selecioná-los e também a comunicar o que sabia sobre eles, aí nasceu a civilização (COHEN, 1985).

Com o domínio do fogo e com o passar do tempo, o homem descobriu técnicas para modificar esses materiais, criando as cerâmicas (como recipientes e jarros, por exemplo.) e alguns metais, o que possibilitou um grande avanço para a humanidade. A evolução dos materiais ao longo da história pode ser observada na Figura 6.

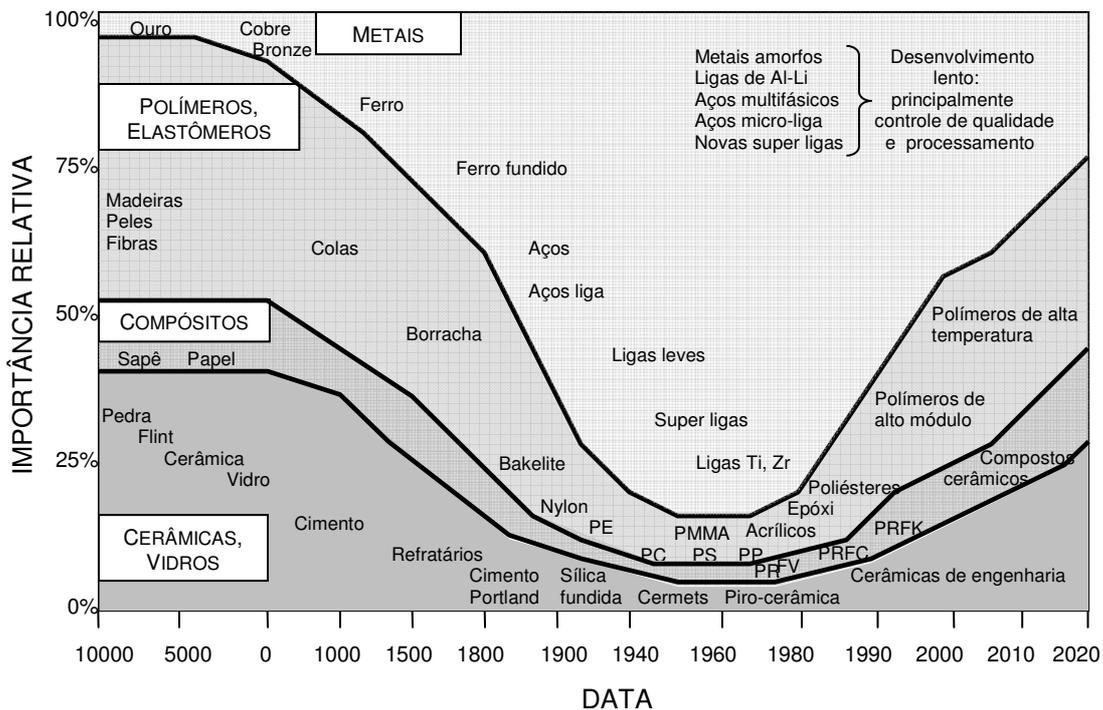


Figura 6: A evolução dos materiais de engenharia. Adaptado de Ashby (1992).

Recentemente, principalmente após a segunda metade do século XX os cientistas começaram a entender as relações entre a estrutura e as propriedades dos materiais e como os processos de fabricação alteram estes dois itens. Pode-se dizer que estes três fatores estão mutuamente relacionados, como pode ser visualizado na Figura 7.

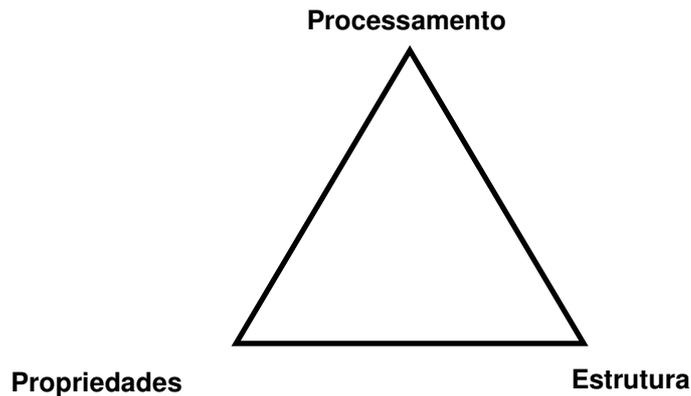


Figura 7: Relação entre Estrutura, Propriedades e Processamento dos materiais, mostrando a sua interdependência. Adaptado de Tomasi e Botta, 1991.

A estrutura de um material está relacionada com o arranjo interno de seus componentes e envolve não apenas átomos, mas também a maneira pelo qual eles se associam por meio de ligações químicas ou interações eletromagnéticas e a disposição tridimensional destas combinações. Compreende, portanto, muito mais que a simples composição química do material, embora seja influenciada por ela, e é responsável pela formação do conjunto de propriedades que define um material.

A propriedade de um material é o modo – tipo e magnitude – com que ele responde a um dado estímulo, sendo geralmente independente da forma ou dimensões do corpo estimulado. Para fins didáticos estas propriedades são geralmente agrupadas em 6 diferentes categorias: mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas, óticas e deteriorativas (CALLISTER, 1994).

Propriedades mecânicas são aquelas que relacionam a resposta de um material (em geral uma deformação) com uma carga aplicada. Propriedades elétricas são as respostas a um campo elétrico. Nas magnéticas o estímulo é um campo magnético; nas térmicas, o calor; e nas óticas, as radiações eletromagnéticas (luz). Para as propriedades deteriorativas, em geral mede-se a resposta do material à sua interação com o meio ou outros materiais, como água, ácidos, bases, oxigênio e chama, entre outros.

Mais recentemente tem-se estudado dois outros conjuntos de propriedades, as sensoriais e as de percepção. Aquelas são advindas da mensuração direta das propriedades dos materiais pelo tato, visão audição, paladar e olfato e incluem as sensações de macio ou duro, quente ou frio, aspectos de som e de odores, por exemplo. Já as de percepção, advém da associação que uma pessoa faz com experiências adquiridas ao longo de sua vida. Como exemplo, pode-se citar os atributos de valioso ou barato, velho ou novo, divertido ou sério (WALTER, 2006)⁴.

Os materiais precisam ser processados para que se possa dar a eles as formas desejadas e compor um objeto. Normalmente, o processamento altera as propriedades dos materiais, pelo simples fato de que este altera de alguma forma a sua estrutura. Como exemplo, pode-se citar que uma poliamida pode ter propriedades completamente distintas se resfriada a partir da fusão de modo lento ou abrupto, pelo fato de que esta velocidade de resfriamento altera o percentual e o tamanho dos cristais em sua estrutura.

Entender estas relações faz parte do escopo de atuação do engenheiro de materiais, assim como a área de SMPF. A SMPF forma um só campo de atividades – e não dois, Seleção de Materiais (SM) e Seleção de Processos de Fabricação (SPF), como se poderia esperar – pelo já citado fato de que os processos de fabricação influem nas propriedades do material e, portanto, nas propriedades de uma peça produzida com ele.

⁴ A definição destas propriedades ainda é bastante vaga, apesar dos inúmeros estudos surgidos recentemente. Destaca-se o trabalho de Ashby e Jonhson (2003), Van Benzooyen (2002) e, no Brasil, o de Walter (2006).

As atividades de SMPF passam pelo estabelecimento das condições de contorno de um projeto e sua otimização, além de adequar o material a estes requisitos, bem como aos meios de produção disponíveis, de forma economicamente viável. Desta maneira, a natureza destas atividades é altamente interativa. Já o projeto de um objeto, assim como sua fabricação e desempenho – o que pode ser entendido como a aplicação dos materiais – depende da tríade Estrutura-Propriedade-Processamento, o que levou a Tomasi e Botta (1991) a estabelecer a Figura 8, onde indicam o campo de ação da seleção de materiais.



Figura 8: Da relação entre Estrutura-Propriedades-Processamento e Aplicação define-se o campo da seleção de materiais. Adaptado de Tomasi e Botta (1991).

Já Ashby (1992) estabelece que o processo de SM está centrado na interação entre material, função, forma e processamento, já que a função dita a escolha do material, assim como a forma é escolhida para que um material realize uma função. Por sua vez, o processamento depende do material e influencia na escolha da forma para que se realize uma função. Essas interações se realizam em dois sentidos, uma vez que a especificação da forma restringe a escolha dos materiais e dos processos disponíveis para fabricar um objeto com aquela forma. Isto pode ser explicitado na Figura 9.

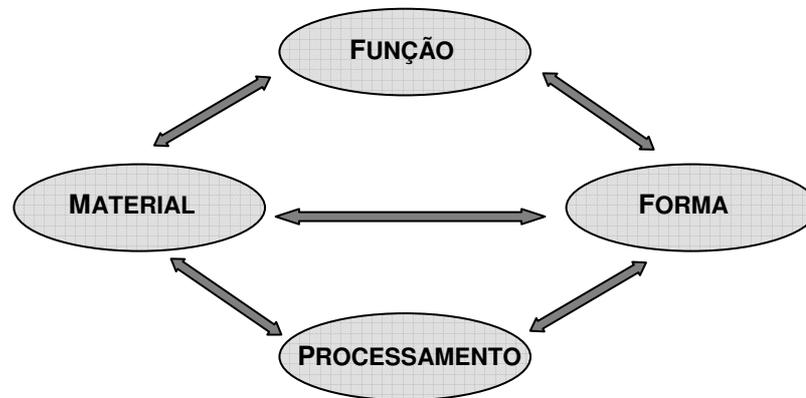


Figura 9: O problema central da Seleção de Materiais, a interação entre Função, Material, Processamento e Forma. Adaptado de Asbhy (1992).

Para o propósito deste trabalho entende-se que a união destas duas definições é o que poderia definir de forma mais completa e abrangente o campo da área de SMPF. Utilizando a tríade Estrutura-Propriedades-Processamento como base, somam-se a eles a Forma e a Função como pontos de interação, de maneira que todos os cinco estejam ligados entre si, como pode ser visto na Figura 10.

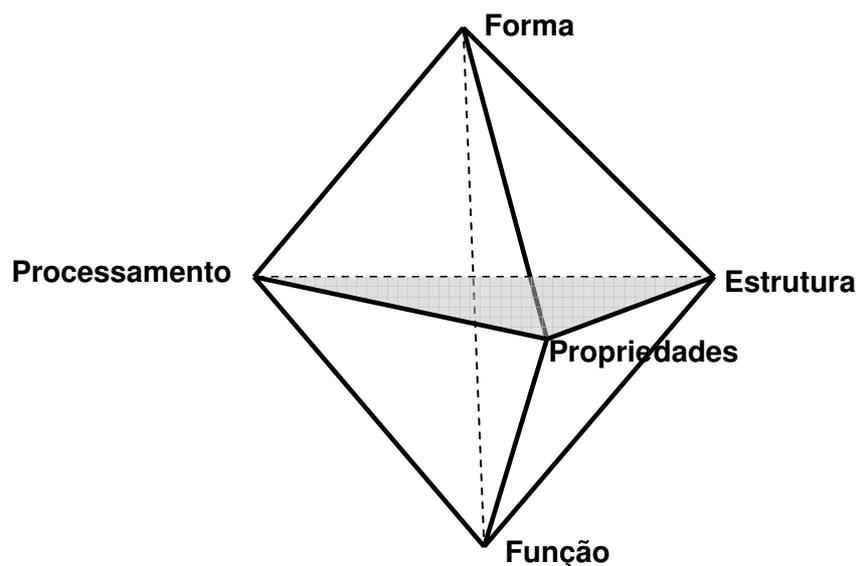


Figura 10: As interações que definem o volume do duplo tetraedro definem também o campo de atuação da Seleção de Materiais.

Nota-se que as interações formam uma figura fechada com um eixo interno. Pode-se estabelecer que a SMPF, apoiada sobre a tríade Estrutura-Propriedades-Processamento, deve ser levada em consideração quando da escolha da forma e da função de um objeto, fazendo com que seja necessária desde o início de um projeto.

A SM também tem uma forte ligação com a arte, embora de maneira menos estruturada. Os artistas, artesãos, escultores, designers e arquitetos, entre outros, sempre precisaram lidar com materiais em seu campo de trabalho. No princípio da Era Industrial não havia a divisão clara entre arte e ciência e, nesta cisão, os artistas ficaram com as propriedades estéticas e culturais, enquanto aos cientistas e engenheiros couberam as propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas, óticas e deteriorativas.

Este distanciamento ocorreu pelo fato de que os métodos científicos não são os mais apropriados para se deduzir as propriedades culturais dos materiais. Tipicamente, as escolas de arte e design desenvolveram um conhecimento sobre as primeiras propriedades, mas não sobre as outras, e os profissionais destas áreas têm que lidar com isso pela experiência, prática e muitas vezes por tentativa e erro.

Nota-se que a propalada interdisciplinaridade não cobre áreas do conhecimento distintas, e a fronteira entre ciência e arte nem sempre é transposta. Falta comunicação entre as pessoas do meio acadêmico que fazem ciência e aquelas que fazem arte. Embora isto aconteça no meio industrial, notadamente em empresas especializadas em design⁵ e no passado fossem parte de uma única disciplina, ainda são escassas as pesquisas que unam as áreas, como por exemplo, pesquisas sobre os aspectos culturais dos materiais, o que pode ser atribuído a falta de recursos para tal fim, uma vez que é muito difícil justificar uma pesquisa onde opiniões podem valer tanto quanto fatos (MIODOWNNIK, 2005).

Um exemplo digno de nota é o esforço do grupo dirigido pelo Prof. Ashby em Cambridge, que tenta levar adiante esta linha de pesquisa (ASHBY, 2003); (LJUNBERG; EDWARDS, 2003), com ramificações em escolas de design (VAN BENZOYEN, 2002) e, no Brasil, um grupo coordenado por Walter⁶, que começa a estabelecer as bases de um trabalho neste sentido.

⁵ Como exemplo podemos citar a Seymour Powell (www.seymourpowell.com) e a IDEO (www.ideo.com), esta última cujos métodos de trabalho, especialmente com os materiais, podem ser melhor compreendidos por meio do trabalho de Kelley e Littman (2001).

⁶ MARAR, J. F. **Design & Materiais**: elaboração e execução de um sistema de informações para Projeto de Produto. Projeto de Pesquisa, UNESP, Bauru: 2004.

1.2 Aspectos de Materiais Poliméricos

Os polímeros naturais ou sintéticos são constituídos de macromoléculas formadas por unidades que se repetem milhares de vezes, ao longo de uma cadeia sequencial. Em grego, muitas unidades repetitivas podem ser escritas como *poli* (muitas) *merés* (partes) e daí a denominação desta classe de materiais. Se estas partes são sempre iguais, os materiais são ditos homopolímeros e quando se apresentam dois ou mais tipos diferentes de unidades repetitivas (monômeros) eles são chamados de copolímeros.

De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros podem ser divididos em elastômeros, ou borrachas, e plásticos. Elastômeros são materiais macromoleculares exibindo alta elasticidade a temperatura ambiente (23°C), enquanto que plásticos são materiais que contém, como componente principal, um polímero orgânico sintético e que, embora sólidos a temperatura ambiente (23°C), tornam-se fluidos e possíveis de serem moldados pela ação de calor e pressão. O termo “plástico” vem do grego *plastikós* e significa “adequado a moldagem” (MANO, 1985).

Uma outra maneira de classificar estes materiais é de acordo com a sua resposta ao aumento da temperatura. Assim, eles podem ser classificados em termoplásticos e termorrígidos. Termoplásticos são materiais poliméricos que amolecem sob a ação do calor e enrijecem quando resfriados, de modo reversível. Termorrígidos são materiais poliméricos que se tornam permanentemente rígidos quando submetidos ao calor uma primeira vez e não amolecem se este for aplicado novamente. Isto se deve a formação de ligações químicas entre as cadeias moleculares. Se um calor excessivo for aplicado, essas ligações podem ser quebradas, mas o polímero estará degradado.

Também se podem classificar os materiais poliméricos pela sua estrutura, como sendo amorfos ou cristalinos.

Os polímeros amorfos apresentam uma baixa ou nenhuma ordenação de curto alcance das cadeias poliméricas, como pode ser observado na Figura 11. Eles não apresentam cristalinidade e, portanto, não apresentam ponto de fusão cristalino, mas podem se tornar um fluido suficientemente menos viscoso para que possa fluir e ser moldado. A temperatura em que isso começa a ocorrer é denominada temperatura de transição vítrea, T_g .

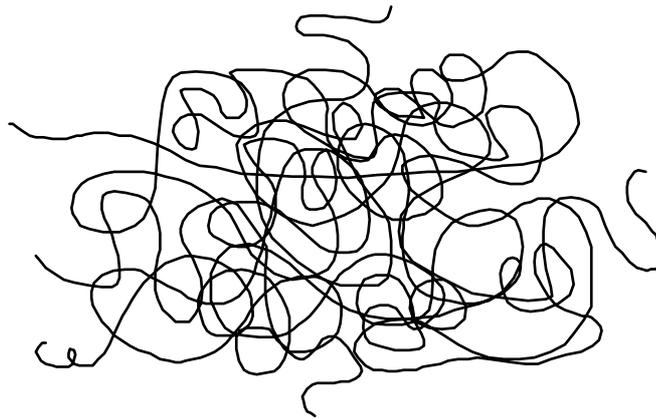


Figura 11: Representação esquemática da estrutura de um polímero amorfo.

Cada polímero possui uma temperatura de transição vítrea característica e quanto mais alta ela for, maior será a máxima temperatura de uso deste material. Acima da T_g , as moléculas começam a se mover e as propriedades do material são bastante modificadas. Já os polímeros cristalinos apresentam áreas onde há uma ordenação das cadeias poliméricas de maneira que elas formem estruturas regulares denominadas cristais, como pode ser observado na Figura 12.

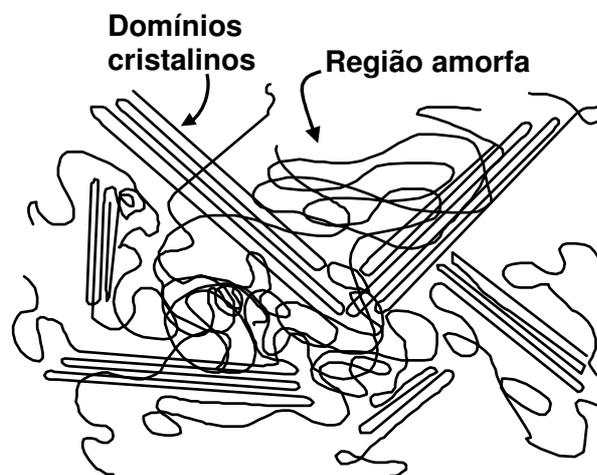


Figura 12: Representação esquemática da estrutura de um polímero semi-cristalino com domínios cristalinos (ordenados) e amorfos (desordenados).

Esta ordenação pode ocorrer de várias maneiras, sendo a mais comum a de lamelas onde as cadeias se dobram sobre si mesmas, como pode ser observado na Figura 13.

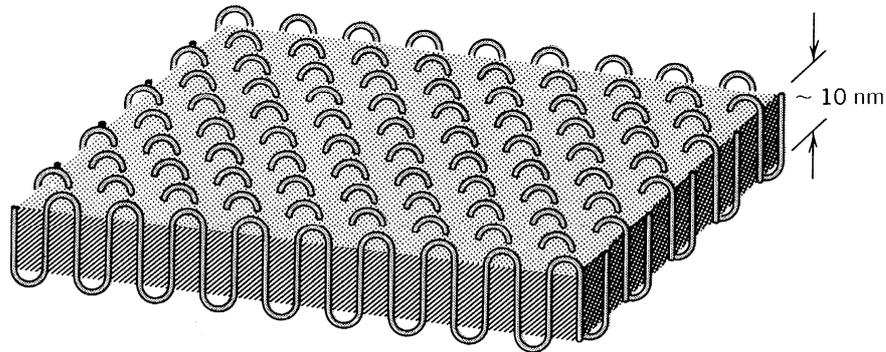


Figura 13: Estrutura molecular do polietileno. Fonte: Hayden, Moffatt e Wulff (1965).

Em alguns casos, essas lamelas se arranjam em uma estrutura tridimensional altamente ordenada a partir de um núcleo, e são chamadas de esferulitos. Entre as diversas lamelas há também certa quantidade de material amorfo e isto pode ser visualizado na Figura 14.

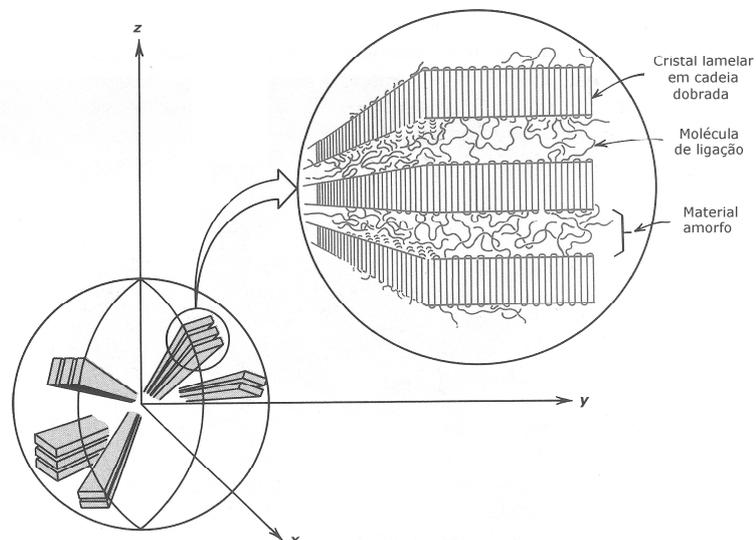


Figura 14: Representação esquemática de um esferulito. Fonte: Callister (1994).

Durante a cristalização de um polímero, vários destes esferulitos são formados e, eventualmente se encontram, sendo deformados, o que pode ser visto na Figura 15. Eles podem ser considerados os análogos poliméricos dos grãos dos materiais metálicos e cerâmicos poli-cristalinos, embora cada esferulito seja na verdade formado por vários cristais menores e um pouco de material amorfo.

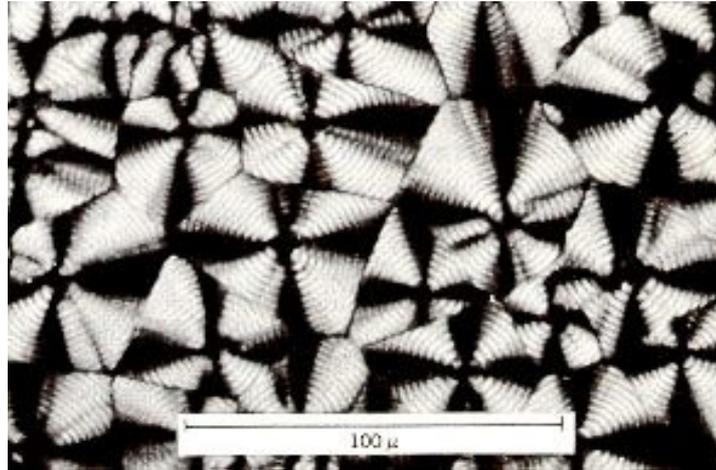


Figura 15: Micrografia utilizando luz polarizada mostrando a estrutura esferulítica do polietileno. Fonte: Callister (1994).

Os polímeros semi-cristalinos apresentam duas temperaturas características. Uma devido a modificações na porção amorfa, a T_g , e outra devida a porção cristalina, a temperatura de fusão cristalina, T_m , que é aquela em que os cristais são destruídos. Na Figura 16 é mostrada a classificação dos materiais poliméricos quanto as suas características mecânica e térmica e a sua estrutura.

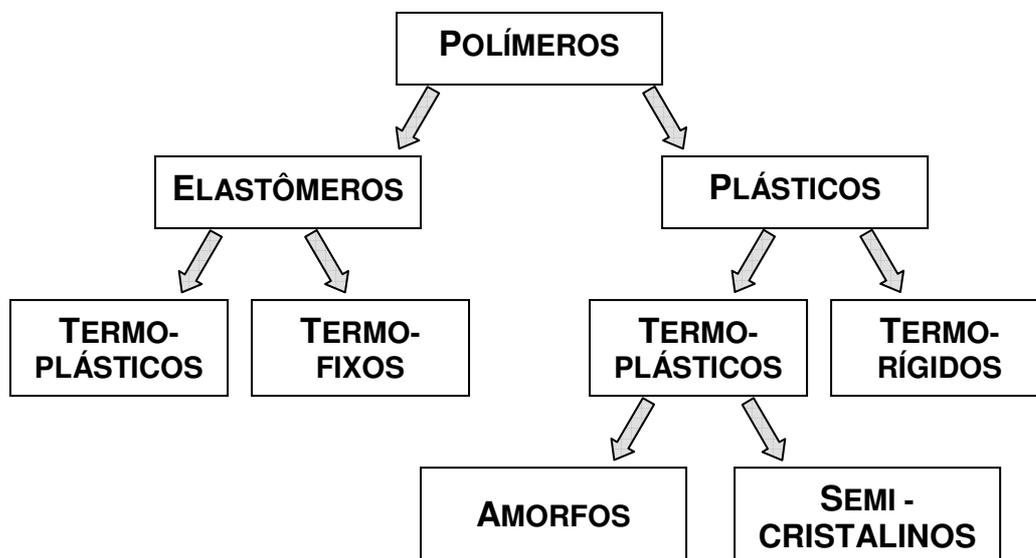


Figura 16: Classificação dos materiais poliméricos quanto a sua característica mecânica, térmica e de sua estrutura.

As características dos materiais poliméricos advêm principalmente de suas longas cadeias moleculares, embora elas possam variar bastante, em função da composição química das unidades repetitivas e de sua estrutura cristalina, além é claro da variação de tamanho das moléculas.

Por melhores que sejam estas propriedades, os polímeros quase nunca são utilizados em seu estado puro. Eles são formulados com aditivos especiais ou na forma de blendas poliméricas (misturas de dois ou mais polímeros) com o intuito de melhorar ou modificar as propriedades intrínsecas dos polímeros de maneira a que um mesmo polímero possa vir a ser transparente ou opaco, isolante ou condutor elétrico, e que tenha alta ou baixa resistência ao impacto.

Este fato permite que um mesmo polímero base dê origem a uma ampla gama de tipos com diferentes propriedades e conseqüentemente possam ser utilizados em aplicações diversas. O exemplo mais comum é o do Poli (Cloro de Vinila) ou PVC, que é tanto utilizado em tubos e conexões (rígido, resistente à pressão hidráulica), como em embalagens transparentes para acondicionamento de sangue e plasma (flexível, transparente) ou ainda na confecção de solados para calçados (expandido).

Em muitas aplicações, os polímeros e plásticos reforçados vêm sendo crescentemente utilizados na substituição de outros materiais tradicionais ou são escolhidos exclusivamente por causa de suas propriedades, muitas vezes singulares:

- Baixo peso específico, o que leva a peças inerentemente mais leves;
- Maior liberdade de desenho, o que muitas vezes permite desenhos que seriam impossíveis em metal, por exemplo;
- Possibilidade de redução do número total de peças, o que permite ganhos produtivos na fase de montagem das peças;
- Melhor acabamento, uma vez que a peça pode sair pronta do molde, eliminando a necessidade de operações secundárias;
- Melhor resistência química e à corrosão, quando o material é escolhido corretamente;
- Possibilidade de produção diretamente em cores, novamente eliminando a necessidade de operações secundárias;
- Possibilidade de redução de custo da peça final, fator muitas vezes determinante para a conversão de uma peça de metal para plástico.

Mas nem tudo são vantagens. Os plásticos são tipicamente isolantes térmicos e elétricos e, embora possam ser aditivados para serem eletricamente condutores, estes tipos ainda estão longe de ter o mesmo desempenho dos metais. A baixa condução de calor ainda é um problema onde a dissipação deste é necessária, embora os fabricantes de polímeros de alto desempenho (*High Performace Engineering Plastics*) e compostos a partir destes estejam se empenhando para acabar com essas dificuldades.

Alguns polímeros reforçados, como a Poliarilamida (PAA, como o IXEF[®], da *Solvay Advanced Polymers, LLC.*), já têm algumas de suas propriedades semelhantes à de metais, como resistência à tração e acabamento superficial. Na Figura 17 é mostrado que a resistência à tração já é comparável à do alumínio e, embora o módulo elástico (E) seja menor, a resistência específica (resistência à tração dividida pela densidade – σ/ρ) é maior (SANNER; NUYTTENS, 1998), como mostrado na Figura 18.

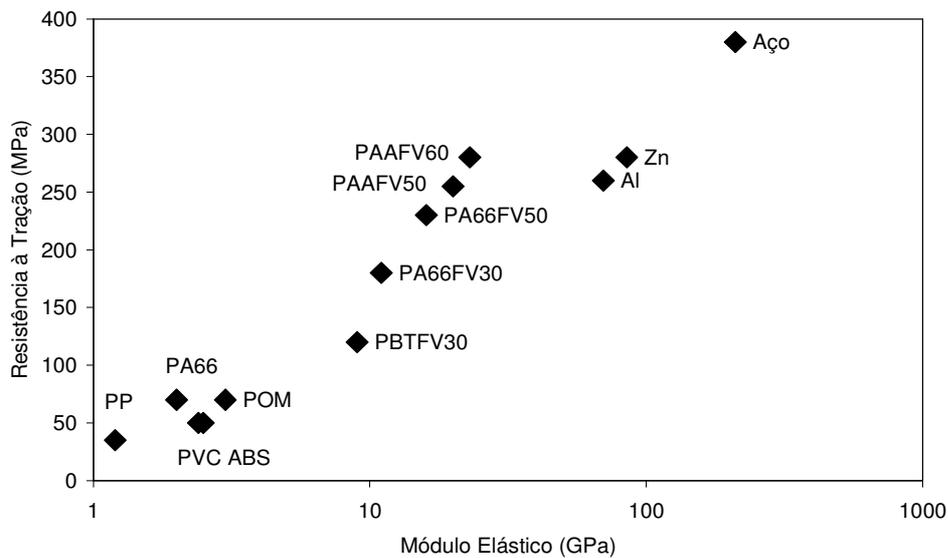


Figura 17: Comparativo de resistência à tração e módulo para alguns polímeros carregados e metais. Adaptado de Sanner e Nuyttens (1998).

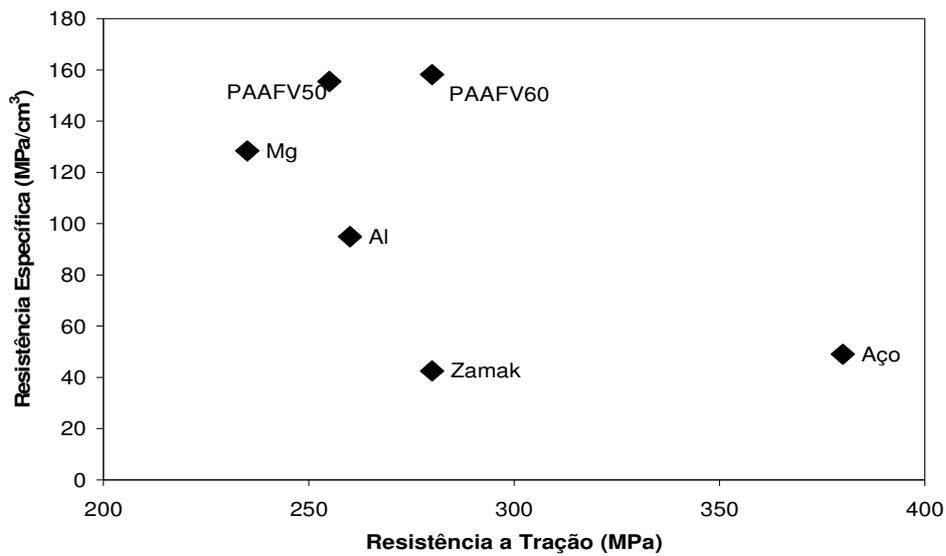


Figura 18: Comparativo de resistência à tração versus resistência à tração específica para alguns polímeros carregados e metais. Adaptado de Sanner e Nuyttens (1998).

Embora já seja bastante conhecida e utilizada, a representação em forma de pirâmide mostrada na Figura 19 continua a ser um bom descritivo do mundo dos plásticos. Por outro lado, ela pode ser falha quando se traça uma linha horizontal para dividir esses polímeros em *commodities*, de engenharia e finalmente de alto desempenho (também chamados de polímeros de engenharia de uso especial ou ainda polímeros de engenharia de alto desempenho).



Figura 19: Pirâmide dos polímeros destacando as diferentes classes de polímeros quando a estrutura e desempenho, número de produtores e volume anual produzido de cada polímero. Adaptado de Solvay Advanced Polymers, LLC.

Os materiais na parte mais baixa desta pirâmide são aqueles conhecidos como de uso geral ou *commodities*, sendo consumidos em grande escala, normalmente com fornecimento regional e caracterizados pelo seu baixo custo, facilidade de processamento e utilizados geralmente onde não se necessita de desempenho mecânico.

Os materiais na parte central da pirâmide são os conhecidos como termoplásticos de engenharia, que apresentam um custo moderado, e propriedades bastante melhores com relação aos de uso geral, despertando o interesse para aplicações de engenharia. O fornecimento regional ainda é uma forte vantagem em termos de custos.

No entanto, para muitas aplicações, propriedades mecânicas extremas, boa estabilidade dimensional, bom desempenho a altas temperaturas são muito importantes. Nestes casos, quando plásticos convencionais (*commodities* ou mesmo de engenharia) não atendem os requisitos ou estão muito perto do limite, entram em cena os Polímeros de Engenharia de Alto Desempenho e os de Ultra Desempenho.

Estes produtos ocupam a parte superior da pirâmide dos plásticos e tipicamente oferecem elevada resistência química e mecânica, mesmo a altas temperaturas. Normalmente, estes materiais não são substitutos para outros polímeros, mas para metais, vidro e até mesmo cerâmica em casos específicos (SANT'ANNA; WIEBECK, 2006a)⁷. São fabricados por poucas empresas e em escala global, já que os volumes empregados fazem com que as fábricas tenham tamanho reduzido e, aliado ao enorme esforço em pesquisa e desenvolvimento destes materiais, leva a que estes produtos tenham um custo por quilo mais elevado.

Para fins didáticos essa divisão é adequada, mas o que se vê é uma zona de transição entre essas categorias, principalmente no que se refere à parte mais baixa da pirâmide. Em termos de propriedades, estes materiais têm às vezes desempenho semelhante, embora os seus custos possam ser bastante diferentes, o que faz com que sejam posicionados mais para baixo ou mais para cima nesta escala. A divisão entre amorfos e semicristalinos é bastante interessante, já que é uma divisão que leva em conta as diferenças estruturais e de propriedades entre os polímeros e faz com que a visualização seja facilitada.

⁷ Boas descrições dos materiais de engenharia e de uso especial podem ser encontradas em Brydson (1995), Mano (1991), Margolis (1995) e Wiebeck e Harada (2005).

Os materiais semicristalinos em geral apresentam melhor resistência química e à fadiga, além de aumentarem consideravelmente sua temperatura de uso com a adição de cargas minerais ou fibra de vidro. Já os materiais amorfos apresentam quase sempre melhores propriedades óticas (como transparência, por exemplo) e melhor estabilidade dimensional após a moldagem, mas têm suas propriedades muito pouco afetadas por cargas de reforço.

Para que todos estes materiais sejam transformados em objetos, eles precisam ser processados. A indústria dos plásticos desenvolveu poucos processos específicos para estes materiais, sendo a maioria deles uma adaptação de processos já existentes como, por exemplo, a termoformagem (derivada da prensagem de chapas), o processo de sopro (derivado do sopro de vidro), a sinterização do PTFE (da sinterização cerâmica e da metalurgia do pó), a rotomoldagem, adaptada da colagem de barbotinas, e a extrusão (derivada da extrusão de argila e outras matérias-primas cerâmicas). Um dos poucos processos desenvolvidos especificamente para o processamento de polímeros é o da injeção (embora apresente certa analogia com a fundição de metais).

Pode-se dizer que a quase totalidade dos produtos produzidos em materiais termoplásticos nos dias de hoje passou em algum momento por uma injetora ou uma extrusora. Da extrusora obtém-se um produto contínuo e uniforme com seção constante e é utilizada na produção de tubos, perfis, chapas, placas, fibras, tarugos e recobrimentos em fios, cabos, chapas, filme ou papel. Muitas vezes estes produtos semi-acabados passam por um outro processo, como usinagem ou termoformagem, por exemplo. Na moldagem por injeção, um polímero fundido é forçado em um molde e se solidifica enquanto esfria, quando então o molde é aberto e o processo se reinicia. É o método mais comum para se produzir peças plásticas, pois embora o molde tenha um custo elevado, ele permite uma alta produtividade e um baixo custo por peça, se os volumes forem elevados.

Como citado anteriormente, deve-se levar em consideração que as propriedades do objeto não são ditadas somente pelas propriedades dos materiais em si, mas também pelo seu processamento⁸.

⁸ Em português, boas referências sobre o processamento de polímeros são os trabalhos de Blass (1988) e de Manrich (2005)

As taxas de resfriamento empregadas tipicamente nos processos de materiais poliméricos são relativamente altas e apresentam sensível variação com a posição do material na peça. Assim, camadas mais superficiais das peças sempre estão expostas a taxas de resfriamento maiores. Para polímeros capazes de se cristalizar, essas taxas diferenciais podem ter conseqüências importantes, já que vão levar diferentes tempos de permanência do material na faixa de temperaturas de cristalização e, portanto, a variações no grau de cristalinidade e conseqüentemente densidade da peça (FERRANTE, 1996).

O gradiente de temperatura resultante leva a que em algum momento a camada mais externa já estará solidificada, mas o centro ainda estará resfriando (e contraindo). Quando finalmente esta peça estiver totalmente resfriada, irão existir tensões residuais de compressão na superfície e de tração na sua linha central. Essas tensões podem levar a empenamentos ou a formação de poros internos, enfraquecendo substancialmente a peça e afetando sua resistência química e aos agentes externos.

Durante o processamento, as moléculas dos polímeros tendem a adotar um alinhamento preferencial, seja por uma tensão axial aplicada, seja por uma tensão de cisalhamento unidirecional como, por exemplo, nas camadas superficiais de material junto a parede do molde, criando um gradiente de alinhamento da superfície para o centro. Como a contração é menor na direção transversal à cadeia polimérica, haverá contração diferencial na peça.

Quando do encontro de duas frentes de fluxo, forma-se a chamada linha de solda, e ela implica em queda nas propriedades mecânicas na sua direção, uma vez que a interação das cadeias poliméricas ao longo deste plano é deficiente. Essa queda de propriedades é ainda maior no caso de polímeros reforçados, já que as interações neste caso são ainda menores e naquela região o efeito do reforço é praticamente nulo (FERRANTE, 1996), uma vez que o reforço não ocorre ao longo desta linha.

O desenvolvimento dos polímeros e seus compostos é um campo em franca evolução e deve-se estar muito atento para não fechar as portas para uma possibilidade de inovação por absoluta falta de conhecimento das possibilidades de materiais e processos disponíveis atualmente.

CAPÍTULO 2 – ASPECTOS ACADÊMICOS E INDUSTRIAIS DA SMPF

2.1 Seleção de Materiais e Processos de Fabricação na academia: a teoria e suas implicações em materiais poliméricos

O objetivo principal de um projeto mecânico é definir a forma de um componente e os materiais de que ele será feito para satisfazer sua função (EDWARDS, 2004). Assim, a melhor solução para um projeto somente pode ser determinada se a partir de uma função necessária, as decisões de escolha de material, forma e processo forem considerados simultaneamente. No entanto, a maioria dos projetos ainda leva em consideração o modelo de design proposto por Pahl e Beitz (1996), que é considerado um dos trabalhos fundamentais em projetos de engenharia e que pode ser observado na Figura 20.

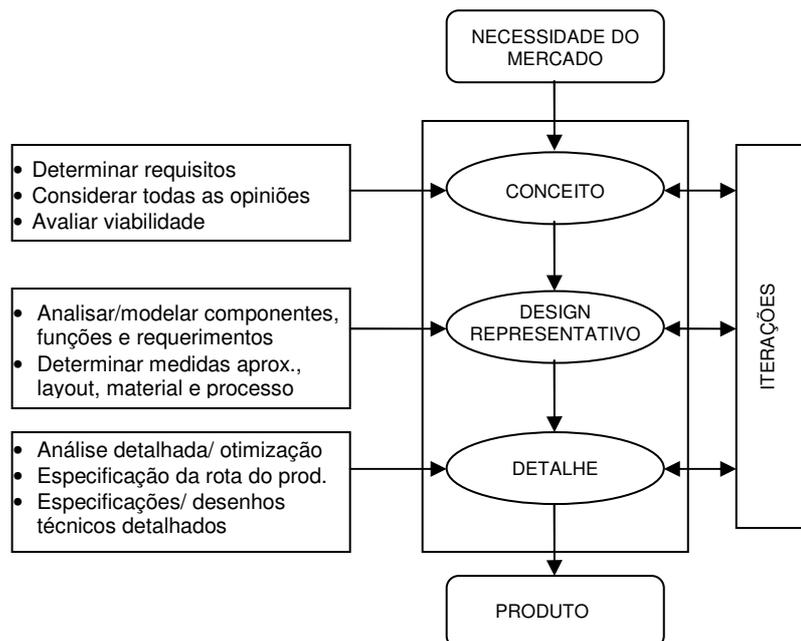


Figura 20: Modelo de projeto de Pahl e Beitz. Adaptado de Pahl e Beitz (1996).

O princípio básico por trás da filosofia de projeto destes autores é o de dividir o problema em partes menores e resolvê-las separadamente, trabalhando com três tipos possíveis de projetos (original, adaptativo e variante) e com três níveis de detalhamento durante o projeto (conceitual, representativo, e detalhado).

Para melhor controlar o processo de projeção, esse modelo leva a uma sequência de ações estanques, onde cada uma delas necessita de informações em níveis diferentes de detalhamento e este processo pode ser visualizado em termos de SMPF na Figura 21 (SAPUAN 2001).

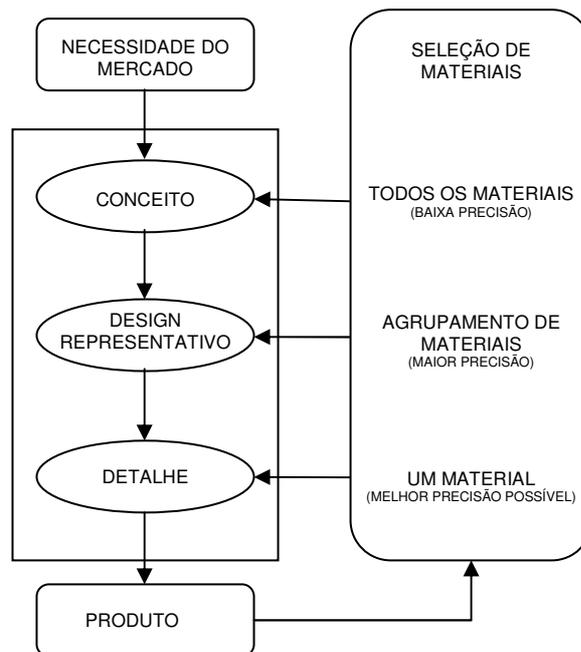


Figura 21: Modelo de design e seleção de materiais. Adaptado de Sapuan (2001).

Uma solução alternativa que tem sido muito utilizada é a de considerar as implicações do processo de manufatura desde o começo do projeto, o que certamente facilita a fabricação do componente projetado, mas implica em uma complexidade maior durante seu projeto. Ainda que estas soluções de Desenho para Manufatura (*Design For Manufacturing – DFM*) estejam em uso por algum tempo, estima-se que muitos produtos ainda tenham entre 50 e 150% mais partes montadas que o realmente necessário

Uma possível saída para este dilema é a utilização de um modelo de projeto de produto em termos modulares, com adição ou remoção de componentes a medida que o projeto avança, o que pode ser facilitado pelos métodos de engenharia simultânea atuais, sempre levando em consideração que, acima de tudo, os procedimentos de SMPF devem estimular, e não suprimir, a criatividade do projetista (LOVATT; SHERCLIFF, 1998).

Um comentário corrente sobre os processos de SMPF é que eles são muito bons na teoria, mas que a complexidade dos problemas encontrados nas indústrias não podem ser resolvidos por meio deles (BRECHET et al., 2001). No modelo de Pahl e Beitz (1996) e em suas variantes, SM e SPF são realizados separadamente e Brechet et al. (2001) sugere que SPF realizada desta maneira é pouco efetiva, especialmente quando envolve processos secundários.

Já o método de Ashby pode ser melhor entendido como um procedimento de seleção pelo método de questionário aberto, que não restringe o formato dos requisitos de projeto e permite uma evolução destes requisitos ao longo do processo, desde que estes requisitos possam ser traduzidos para buscar informação no banco de dados. Estudos indicaram algumas possíveis melhorias do método de Ashby, sendo que há necessidades latentes de desenvolvimento para lidar com situações onde uma seleção simultânea de forma e material é necessária, e também quando o objeto a ser produzido é muito complexo (BRECHET et al. op. cit.).

Para o caso de seleção de processos, este é em geral tratado da mesma maneira, mas de forma separada e seqüencial, embora Brechet et al. (op. cit.) aponte que quando já se tenha uma definição de qual classe de material se vai utilizar, seja mais viável partir para uma estratégia de questionário fechado, que aponta rapidamente para uma solução e não dá margem a erros de interpretação. Esses aspectos também podem ser adaptados para o uso em projetos, onde uma estratégia de questionário aberto, menos restritiva é utilizada nos estágios iniciais de um projeto e a estratégia de questionário fechado é utilizada em suas etapas finais.

Neste estágio, o processo de SM está quase sempre focado em comparar diversos materiais quanto a requisitos específicos de propriedades e escolher dentre eles o que melhor se adequa ao projeto. Por isso mesmo, este tipo de SM é o mais estudado nos meios acadêmicos. Já a introdução dos processos de SMPF nos estágios iniciais de um projeto tem recebido bem menos atenção do mundo acadêmico (DENG; EDWARDS, 2007), talvez pelo fato de que nesta etapa as propriedades dos materiais não sejam tão críticas, mas sim a funcionalidade do objeto em projeto.

Para a comparação entre diversos materiais, informações muito completas estão disponíveis sobre materiais e processos de fabricação, muito embora a grande maioria delas não esteja sistematizada de forma que um projetista consiga recuperar informações de acordo com sua necessidade. A grande maioria das informações se encontra no formato de folhas de dados (*datasheets*), muito úteis quando se deseja informações específicas de um dado material, mas de muito pouca utilidade quando se faz a busca a partir das condições de uso do material⁹.

Considerando que os procedimentos de SMPF devem estimular, ao invés de suprimir a criatividade durante o processo de projeção¹⁰ (LOVATT; SHERCLIFF, 1998), e que exercer esta criatividade implica na necessidade de uma percepção real do material, principalmente pelo contato do projetista com os materiais, algumas pesquisas nesta área tiveram início.

Destaca-se o trabalho em andamento sobre bibliotecas físicas de amostras de materiais, mais conhecidas por “materiotecas”, coordenado por Walter (2006) e também aquele da empresa Material ConneXion, uma vez que mesmo que um banco de dados virtual seja muito rico em informações, ele é incapaz de substituir a experiência de contato entre o projetista e uma amostra do material acabado (WALTER, 2005).

Segundo Walter (op. cit.), uma materioteca que sirva de fonte de informação e inspiração para projetistas deve permitir acesso a amostras, informações sobre elas e também sobre o relacionamento entre os diversos materiais, desta forma permitindo que quando um usuário analise uma amostra, ou uma folha de dados, ele seja instigado a buscar informação sobre outros materiais, por similaridade ou contraposição.

Com a máxima de que “um bom design funciona, um excelente design também dá prazer”, Ashby e Johnson (2003) buscaram enfatizar o papel dos materiais e a importância da SMPF para o desenho industrial, destacando a importância do design como criador de personalidade dos produtos, personalidade esta que é grandemente influenciada pelos materiais escolhidos para sua fabricação e o acabamento dado a eles em um processo de fabricação.

⁹ Deve-se ter cuidado ao interpretar os dados de uma folha de dados de um material. Algumas informações úteis sobre propriedades dos materiais e sobre métodos de ensaio podem ser encontradas nos apêndices A e B respectivamente.

¹⁰ Sobre a relação entre materiais, processos de fabricação e o processo criativo, duas boas referências são os trabalhos de Manzini (1989) e Reis (2003).

Diferentes personalidades são atribuídas às diferentes classes e materiais¹¹. Por exemplo, a madeira é um material com um toque quente e considerado macio, associado a certos sons e cheiros e tradição. Já os metais são frios, precisos, podendo ser brilhantes e com um distinto som. Sua natureza e usos correntes remetem a idéia de que os objetos produzidos com eles são “fortes”. As cerâmicas e vidros têm uma tradição bastante longa e suas resistências ao risco, abrasão, descoloração e corrosão dão certa imortalidade a objetos produzidos com esses materiais, o que só é ameaçado pela sua inerente fragilidade. Além dessas associações tradicionais, as cerâmicas hoje em dia remetem a associações com a alta tecnologia, como fogões avançados, válvulas de alta temperatura e pressão, bocais de foguete.

Finalmente há os polímeros, uma classe de material que pode ter muitos aspectos e, deste ponto de vista, nenhuma outra classe de material pode apresentar tantas diferentes personalidades. Inicialmente com uma má reputação – os primeiros projetos de objetos em plástico deixavam muito a desejar – ainda hoje esta classe carrega algum preconceito, apesar de existir uma infinidade de plásticos, que podem cumprir as mais diversas funções, em alguns casos funções que não seriam possíveis a nenhuma outra classe de materiais.

Dependendo de sua cor e textura, eles podem ser parecidos com cerâmicas ou madeira, e quando metalizados, podem ter o mesmo brilho do metal. Dependendo de sua aditivação, podem ser transparentes como o vidro ou opacos como o chumbo, muito flexíveis ou tão rígidos quanto o alumínio, mantendo sua personalidade própria, sendo considerados materiais quentes e adaptáveis as mais diversas situações.

¹¹ Vários autores vêm trabalhando na definição destas propriedades para sua utilização nos processos de SMPF, destacando-se os trabalhos de Ashby e Jonhson (2003), Ljunberg e Edwards, (2003), Van Benzooyen (2002) e, no Brasil, Kunzler et al. (2002) além de Walter e Silva (2005).

A partir desta análise, Ashby e Johnson (2003) realizaram uma sistematização e agrupamento dos materiais e identificaram 4 tipos de métodos ou estratégias para SMPF:

- Por análise: Consiste na busca de materiais e processos em bancos de dados numéricos pelos atributos desejados ou de condições restritivas. Atributos desejados são condições que se deseja otimizar, em geral, trabalhadas por meio de Índices de Mérito. Condições restritivas são requisitos de desempenho mínimos ou indesejáveis. Este método é aquele que as pessoas tradicionalmente associam ao termo seleção de materiais e utilizado quase sempre como sinônimo deste nos meios acadêmicos;
- Por similaridade: todos os atributos da solução existente são enumerados e ordenados segundo sua importância. São determinados critérios de maior e menor importância, assim como seus valores relativos. Pela utilização de um banco de dados sobre materiais e processos os valores podem ser comparados com os de outros materiais, em busca de similares. É geralmente empregado quando se deseja substituir um material ou se utiliza um projeto como ponto de partida para outro, uma otimização. É o método intuitivamente utilizado na indústria de plásticos, embora sem uma formalização de procedimentos, quando se busca um material alternativo, ou concorrente para substituir aquele em uso;
- Por síntese: consiste da busca de informações sobre materiais e processos em produtos existentes, pelos seus atributos de percepção. A partir de atributos desejados de percepção, num banco de produtos, é possível verificar quais materiais e processos são empregados para tal e estudá-los a fim de reproduzir tal percepção;
- Por inspiração: consiste da livre busca por materiais, processos e produtos de maneira aleatória ou por interesse do projetista, que busca livremente pelo banco de dados e os exemplos deste na busca de uma inspiração para o seu projeto.

Ashby e Johnson (2003) destacam ainda que os quatro métodos são complementares e devem ocorrer em todas as etapas de projeto para que ele seja mais efetivo.

A maioria dos trabalhos teóricos sobre SMPF é centrado em SM relevando a SPF a um papel secundário. Um dos motivos para isso é que, pelas mais diversas razões, a seleção de processos de manufatura não é sempre uma escolha livre e nem sempre ela pode ser baseada em questões puramente técnicas e econômicas. Isto pode ocorrer por questões estratégicas, por logística, por necessidade de flexibilidade de produção, ou mesmo pelo tempo disponível para se realizar o projeto. Devido a isso o projetista, mesmo tendo que considerar todas as hipóteses de manufatura, pode acabar tendo que escolher processos que estão longe do ideal (CHARLES, et al., 1989).

Assim, desde os primeiros trabalhos em seleção de processos (NIEBEL, 1966 *apud* LOVATT; SHERCLIFF, 1998)¹², os pesquisadores desta área tendem a não levar em consideração os motivos citados e consideram a SPF a partir de um caso ideal, geralmente seqüencial a SM. Desta maneira, pouca atenção tem sido dada ao estudo da sistematização da SPF durante os estágios iniciais de um projeto (LOVATT; SHERCLIFF, 1998).

As metodologias de SMPF usuais hoje em dia evoluíram a partir do empirismo e da busca aleatória de dados em *handbooks* e folhas de dados para uma atividade sistematizada e, sobretudo, científica. Essa sistematização começou a aparecer nos anos 80 com a primeira edição do trabalho de Crane e seus associados (CHARLES, et al. op. cit.), quando foram formalizados os procedimentos de Seleção de Materiais.

Esta formalização iniciou-se com o que se pode chamar de “funil” de possibilidades, onde o processo de seleção ocorre pela sucessiva eliminação de candidatos quando comparados aos requisitos. Muitas vezes, porém, os requisitos eram tão exigentes, que frequentemente não sobravam materiais ao final do processo. Este era então reiniciado, baseado em requisitos menos restritivos até que se encontrasse um candidato viável.

¹² NIEBEL, B.W. **An analytical technique for the selection of manufacturing operations.** Journal of Industrial Engineering, New York, v. 17, n. 11, p.598-603, 1966.

O conceito básico dos procedimentos de seleção de materiais pode ser entendido pela “filosofia do compromisso”, onde o sacrifício de uma ou mais propriedades é realizado em troca de uma otimização do projeto geral. Este conceito simples pode tornar-se bastante complexo, principalmente quando as grandezas estão inter-relacionadas como é o caso entre resistência mecânica e a resistência a propagação de trincas, por exemplo.

Na tentativa de se facilitar a comparação de materiais, geralmente é empregado o conceito matriz de propriedades, atribuindo pesos diferentes as diferentes propriedades quando se compara dois materiais, como formalizado por Pahl e Beitz (1994).

Um outro ponto pode ser, por exemplo, a influência dos processos de fabricação sobre as propriedades dos materiais, onde muitas vezes deve-se abrir mão do desempenho máximo para se conseguir fabricar economicamente uma peça, ou então trabalhar com tolerâncias menores para as peças. Justamente por isso é que SM e a SPF formam uma só problemática, a SMPF, que deve ser trabalhada de forma única.

O trabalho de Ashby (1989) deu um grande impulso a esta área de estudos, com a introdução do conceito de Mapas de Propriedades de Materiais (*Materials Properties Maps*), que facilitaram muito a visualização das relações entre distintas propriedades e a comparação entre elas por meio de Índices de Mérito (IM)¹³, levando a uma generalização do procedimento de tal maneira que este deixou de ser tratado apenas como uma ferramenta de ensino, passando a ser explorado em casos reais (FERRANTE, 2000).

A partir desses, Ferrante (1996) define a filosofia da seleção de materiais, como procurar entre os materiais existentes (calcula-se entre 50 e 100 mil tipos diferentes) aquele mais adequado, por meio de sucessivas etapas de eliminação, de modo a não ignorar possibilidades anteriormente não reconhecidas pela experiência ou percepção do projetista.

¹³ Uma breve explicação sobre os mapas de propriedades dos materiais, assim como dos índices de mérito pode ser encontrada no Apêndice C.

2.2 Seleção de Materiais e Processos de Fabricação na indústria: a prática com materiais poliméricos

Várias tentativas foram feitas no sentido de se adaptar as teorias de SMPF para a utilização industrial. Nesta seção foram analisadas as mais utilizadas pelos projetistas. Como já exemplificado, ao longo de um projeto existe uma etapa específica onde o processo de SMPF está incluído. Nesta fase, o projetista procura o material mais adequado baseado em seus requisitos para a aplicação.

Inglis apud Charles (1989)¹⁴ considera que seria desejável que todo escritório (ou departamento) de design de porte tivessem em seus quadros um grupo de pessoas dedicadas a materiais, de maneira que as informações sobre materiais e processos de fabricação estivessem presentes nos projetos desde o seu início.

Infelizmente, no caso do Brasil este modelo é a exceção e não a regra, com a grande maioria das empresas tendo uma equipe ou mesmo um único projetista responsável por todas as etapas do projeto com seu conhecimento de materiais restrito a sua experiência e a soluções tradicionais.

Existe uma necessidade de conhecimento dos materiais e de experiência prévia por parte dos projetistas para que o procedimento de tomada de decisões nos processos de SMPF tenha êxito, e isto tem levado a criação dos chamados *expert systems* ou *Knowledge Based Systems* (EDWARDS 2005) como os desenvolvidos por Sapuan (2001).

Bancos de dados e sistemas computadorizados não são muito utilizados em países em desenvolvimento ou em pequenas empresas com poucos recursos. O que realmente faz a diferença nestes casos é a experiência e o que sabidamente funciona, o que, na maioria das vezes, leva a soluções conservadoras (EDWARDS, 2004).

É justamente pelo fato de que na maioria dos projetos o conteúdo de inovação tem sido muito pequeno, que a SM tradicionalmente só entra em cena quando o trabalho já está num estágio avançado (CHARLES et al, 2001), e que o conhecimento de materiais e a experiência de um projetista com eles são vitais para as tomadas de decisão durante o projeto.

¹⁴ INGLIS, N. P. **Selection of Materials and Design: lectures delivered at the Institution of Metallurgists and the Institution of Mechanical Engineers refresher course, October 1966.** , London: Institution of Metallurgists/Iliffe, 1967.

As metodologias atuais de SMPF são mais adequadas às etapas finais de projeto de produto e algumas escolhas de material/processo na fase de projeto conceitual podem levar a problemas insolúveis ou a complicações na fase de detalhamento que poderiam ser evitadas se os métodos de SMPF estivessem melhor sedimentados para a fase conceitual dos projetos. Esses problemas implicam muitas vezes em um retorno a fase conceitual, com um aumento no custo e no tempo para se finalizar o projeto (WALTER et al, 2005).

Sobre isso, Charles et al. (2001) procurou quantificar estes valores, apresentando os custos relativos de uma mudança em cada etapa do projeto e também o comprometimento de custos versus os custos ao longo deste, como pode ser visto na Figura 22 e na Figura 23. Nota-se que os custos para se modificar um projeto aumentam consideravelmente à medida que ele avança e que cerca de 85% dos custos totais são determinados antes mesmo da fase de detalhamento do projeto.

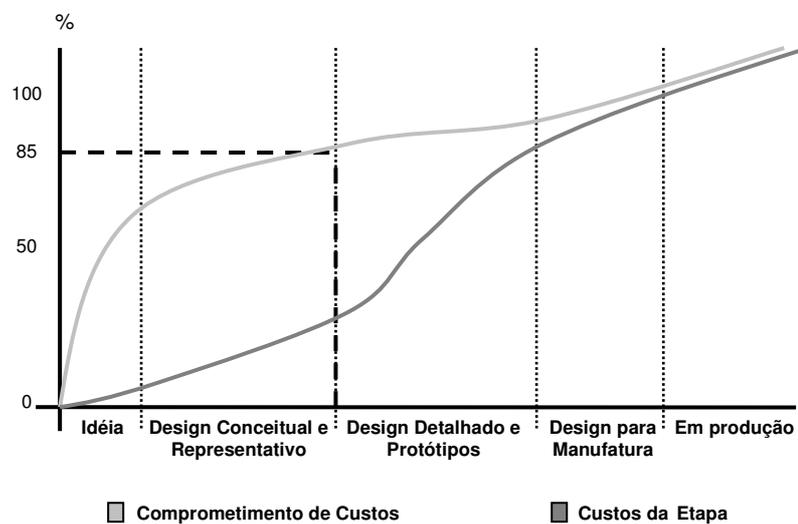


Figura 22: Custo operacional e comprometimento final de custos em função das etapas de um projeto. Adaptado de: Charles, et al., 2001.

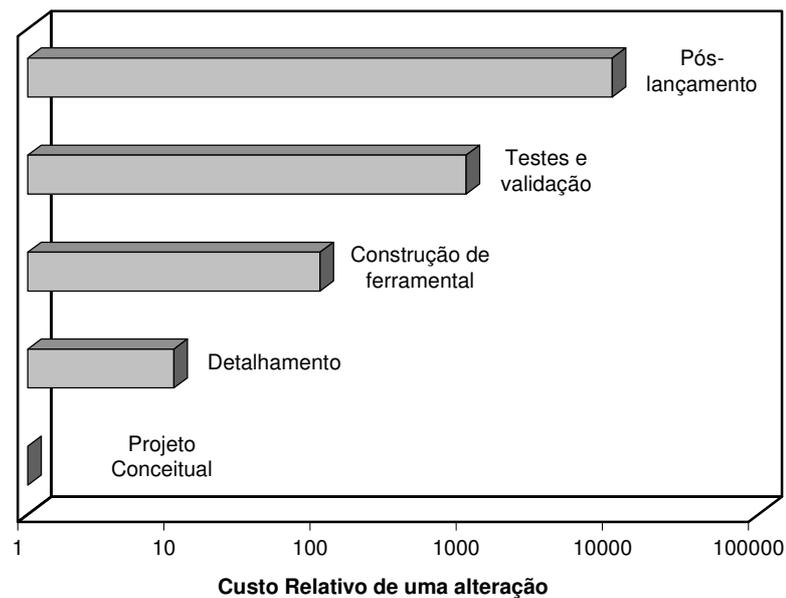


Figura 23: Custo relativo de uma alteração no projeto em função da etapa de projeto. A partir de dados tabelados por Charles et. al., 2001.

Analogamente, pode-se entender que é bastante caro mudar um material escolhido erroneamente para uma aplicação crítica depois de o produto pronto, ao mesmo tempo em que pode ser relativamente mais barato modificar o desenho da peça para que ela não necessite de um material mais caro quando do início do projeto.

Por estes motivos, é tão importante que os processos de SMPF estejam presentes de maneira consciente e participativa desde o mais absoluto começo de um novo projeto. Uma escolha incorreta de um material, processo de fabricação, ou a não modificação de um desenho para uma combinação material-processo podem levar a custos totais muito mais altos do se poderia esperar.

O processo de SMPF, conjuntamente com a incorporação de elementos de design específicos para estes materiais, no começo de um processo de desenvolvimento, pode eliminar muitos problemas e modificações no desenho da peça, reduzindo o tempo de desenvolvimento e os custos do projeto até que se chegue ao desenho final.

A constante evolução dos materiais poliméricos e seus compostos, a busca por um melhor desempenho e redução de peso, têm levado um grande número de empresas a buscar soluções inovadoras em materiais termoplásticos para a produção de peças tradicionalmente produzidas em outros tipos de materiais ou mesmo na busca de um melhor desempenho das peças existentes.

Esses materiais podem, na grande maioria das vezes, atender aos requisitos de projeto com uma outra importante vantagem: a redução do custo total da peça. Todos esses benefícios advêm principalmente das vantagens dos materiais poliméricos em termos de possibilidades de design e processos de fabricação.

No caso de conversão de peças de outros materiais para plásticos, a maioria dos designers ainda pensa em uma substituição pura e simples de material, e como resultado tem-se um longo ciclo de desenvolvimento, o que pode tornar o processo todo muito custoso e muitas vezes frustrante. Em um mercado global e cada vez mais competitivo, esse é um luxo que os projetistas raramente têm, já que o tempo entre o desenvolvimento e a chegada do mesmo a prateleira é um importante fator no sucesso ou fracasso de um produto.

As diferenças inerentes entre as classes de materiais devem ser levadas em consideração desde o começo do projeto. Uma peça desenhada para ser produzida em metal deve ser devidamente redesenhada para que possa não só ser produzida adequadamente, que as vantagens da utilização dos plásticos sejam efetivamente aproveitadas para que os objetivos sejam plenamente atingidos (SANT'ANNA; WIEBECK, 2006b).

Embora algumas vezes a conversão de uma peça de metal para plástico seja impossível, em geral não se consegue realizá-la de maneira satisfatória por não se realizar modificações no design da peça para a utilização de materiais poliméricos, por não se adotar uma metodologia para isso e tolerâncias muito justas ou ainda uma combinação de todos esses fatores (SANT'ANNA; WIEBECK, 2006a).

Para peças plásticas (injetadas) seu desenho é provavelmente o ponto mais importante quanto a custos. De acordo com Desai (2004), pesquisas na indústria de plásticos nos EUA indicam que estes fatores correspondem a 20% do tempo total de desenvolvimento e afeta 80% do custo total de uma peça.

Desta maneira, é muito importante implementar ferramentas como Engenharia Simultânea, Desenho para Usinagem e Montagem (*Design for Machining and Assembly* – DFMA) e Engenharia Auxiliada por Computador (*Computer Aided Engineering* – CAE), antes que o desenho definitivo seja adotado e se comece a construção do molde.

Embora a filosofia de SMPF seja muito debatida entre os engenheiros em geral, ela ainda é bastante incipiente entre aqueles que trabalham com materiais poliméricos. Ainda assim, o processo de seleção de materiais é tradicionalmente um dos primeiros passos de um novo projeto de peça técnica. Como o fator preponderante nos dias de hoje é sem dúvida o custo, um processo de SMPF deve levar em conta vários fatores para se chegar a uma boa relação de desempenho *versus* custo.

Uma das metas gerais do projeto de produto é assegurar a forma mais simples para que um objeto atenda aos requisitos do processo, uma vez que aumentar a complexidade geométrica de uma peça limita os processos de fabricação possíveis e aumenta seus custos. Já o principal critério de SMPF em projeto de produto é o de maximizar a qualidade de um produto ao mesmo tempo em que se minimiza o seu custo. Desta maneira, o projetista deve trabalhar para que ao final de uma única etapa de processamento o objeto esteja o mais próximo possível do objeto final, requerendo apenas um mínimo de montagem e acabamento.

É justamente neste momento onde uma das vantagens do processo de injeção de plásticos aparece. Quando o projeto de produto é bem feito, este processo pode produzir muitas vezes uma peça com a forma, a cor, o acabamento e as tolerâncias desejadas a custos comparativamente mais baixos que outras combinações material/processo de fabricação.

A Seleção de Materiais para Design requer um bom entendimento das propriedades requeridas na aplicação envolvida, já que alguns termoplásticos têm propriedades que nem sempre obedecem à lógica do senso comum de um leigo e mesmo aquelas que são conhecidas por este, ainda podem apresentar surpresas. Como exemplo, pode-se citar que existem plásticos que podem resistir vários minutos sob a intensa chama de um maçarico, – PrimoSpire™ da Solvay Advanced Polymers (SELF REINFORCED POLYPHENYLENE) – e o PVC que embala os alimentos também é utilizado no transporte de água para residências.

Às vezes pode ser difícil assimilar todas essas características, mas o projetista responsável por SMPF deve entender muito bem a aplicação da peça em que trabalha e também estar aberto às possibilidades que os plásticos lhe trazem do ponto de vista de design. É altamente recomendável trabalhar conjuntamente com os fornecedores de matéria-prima desde o começo do projeto, para maximizar essas possibilidades.

No atual estágio de desenvolvimento dos plásticos (commodities, de engenharia ou de alto desempenho), muito do que se pode projetar e produzir era impensável até bem pouco tempo e outras só não são produzidas por não se ter informações a respeito de determinado material ou processo.

O projeto de peças em plástico pode ser dificultado devido ao fato de que a maioria dos projetistas ainda tem uma mentalidade muito influenciada pelas propriedades dos metais (SANT'ANNA; WIEBECK, 2006a) e não tem experiência de sucessos em projetos com termoplásticos.

Devem ser levadas em consideração as diferenças inerentes entre estas duas classes de materiais, como por exemplo, o menor módulo de elasticidade e os efeitos da temperatura e do processamento nas propriedades dos polímeros. Além disso, muitas vezes os materiais plásticos utilizados são na verdade compósitos, pois levam uma combinação de fibras e outros aditivos em sua composição e, por causa disto, são normalmente anisotrópicos.

Um outro ponto a ser levado em consideração é que as propriedades da peça são ditadas não só pelas propriedades dos materiais em si, uma vez que o processamento e o próprio desenho da peça (e do molde no caso de peças injetadas ou termoformadas) podem influenciar as propriedades. Assim, é sempre importante ter em mente que as propriedades podem variar dentro de uma mesma peça. Em português, duas referências sobre o processo de injeção e do projeto de moldes são os trabalhos de Manrich (2005) e Harada (2005).

Devido a toda esta complexidade e a necessidade de se contar com dados confiáveis para todo o projeto, a fase inicial do mesmo (*Concept Design*) deve ser realizada com muito cuidado e vários autores insistem para que os processos de SMPF façam parte do projeto desde o seu mais absoluto início de forma sistematizada.

Nesta fase aparece um outro problema, já que muitas vezes o projetista não sabe realmente os requisitos do projeto, ou os requisitos não têm conexão com a realidade, o que faz com que produtos sejam muitas vezes projetados com excessiva cautela, o que é conhecido como *overdesign*.

Este fato leva a que em um processo posterior que poderia ser de otimização acabe sendo um processo de *redesign*, muito mais custoso. Nunca é demais lembrar que um trabalho bem feito de definição de requisitos de uma peça pode permitir mais opções em termos de combinações de materiais e processos.

Por outro lado, uma definição de requisitos excessivamente conservadora e segura pode levar que não existam combinações de materiais e processos possíveis em uma etapa conceito, ou mesmo que exista apenas uma combinação material e processo, de maneira que isto limite a criatividade do projetista.

Neste sentido, as atividades de desenho industrial e de projeto técnico estão mais distantes. Enquanto no primeiro caso a busca por inovação e os processos criativos são estimulados, no segundo quase sempre se busca a segurança e o conservadorismo, apesar do discurso em contrário. Tradicionalmente, a inovação em projetos técnicos só ocorre por necessidades específicas, como aquelas da indústria aeroespacial ou das competições automobilistas de alto nível.

Estas diferenças são levadas também para as escolhas de materiais em projetos, e o exemplo mais latente disto é o conceito de *materiotecas*. Pode-se dizer que este conceito nasceu de uma necessidade dos designers em ter contato com os materiais que eles iriam trabalhar de modo a estimular a sua criatividade. Uma união de materiais em um lugar específico deu origem então a um banco de dados relacionado a diversas amostras de materiais e produtos fabricados com eles.

As idéias e os métodos de trabalho dos designers da IDEO tornaram-se conhecidas (KELLEY; LITTMAN, 2001) de tal maneira que pesquisas acadêmicas começaram a aparecer nestas áreas, como por exemplo, Ashby; Johnson (2002), Van Bezooyen (2002) e, no Brasil, Marar e seu grupo¹⁵.

¹⁵ MARAR, J. F. **Design & Materiais**: elaboração e execução de um sistema de informações para Projeto de Produto. Projeto de Pesquisa, UNESP, Bauru: 2004.

Atualmente os projetistas envolvidos em projetos técnicos estão tomando conhecimento destes sistemas, ou mesmo de sistemas dedicados especificamente a seleção de materiais. No caso específico dos materiais poliméricos, a utilização de bancos de dados de materiais é praticamente exclusividade das empresas multinacionais, sendo utilizados muito mais como fonte de informação do que como ferramenta de auxílio a projeto.

CAPÍTULO 3 – DISCUSSÃO E PROPOSTA

3.1 Seleção de polímeros e a necessidade de uma metodologia adequada.

Embora a seleção de materiais tenha evoluído muito nos últimos tempos, ainda há uma tarefa enorme que é a de fazer com que ela seja utilizada de modo eficaz no dia-a-dia dos projetistas (engenheiros e *designers*) de produto. Neste sentido, os materiais poliméricos, por serem aqueles mais novos e enfrentarem uma grande carga de preconceito, são os que talvez mais necessitem de uma metodologia específica.

A variação de propriedades que um mesmo polímero pode apresentar pela mudança em sua aditivação (fibras, cargas, modificadores de impacto, reticuladores, espumantes, nucleantes, etc) é tão grande que os gráficos de Ashby tornam-se de pouca utilidade para aqueles com algum conhecimento na área de polímeros.

Uma vez que se vislumbra possibilidade de se projetar algo em plástico, toda uma nova concepção de projeto deve ser pensada. Uma ótima peça projetada com um metal como matéria-prima provavelmente é um projeto apenas mediano quando apenas “traduzido” para plástico.

Por sua vez, uma conversão de uma peça de outro material para plástico exige todo um retrabalho e repensamento das bases do projeto. As diferenças inerentes entre as classes de materiais devem ser levadas em consideração desde o começo do projeto. Uma peça desenhada para ser produzida em metal deve ser devidamente redesenhada para que possa não só ser produzida adequadamente, mas que as vantagens da utilização dos plásticos sejam efetivamente aproveitadas para que esta conversão atinja plenamente seus objetivos.

Vários guias de desenho de peças plásticas estão disponíveis ¹⁶, principalmente para peças injetadas, que ajudam os projetistas. No caso de extrusão ou termoformagem, no entanto, as opções são muito restritas e a falta de conhecimento ou experiência do projetista pode levá-lo a eliminar opções que exigem uma visão do todo.

¹⁶ Infelizmente, um bom guia geral não está disponível em português. Só encontramos, quando muito, roteiros bastante genéricos ou os guias de desenho dos fabricantes de matérias-primas.

Um bom exemplo é que normalmente não seria levada em consideração a produção de uma xícara pelo processo de termoformagem a partir de uma chapa de material polimérico. Por conta da “asa” do objeto, a escolha natural seria o processo de injeção. No entanto, se seu formato puder ser modificado para se adequar ao processo, isto pode se tornar viável, como se pode ver na Figura 24, que mostra uma xícara descartável produzida em Poliestireno (PS) a custos módicos. Esta é uma boa alternativa aos copos descartáveis para se consumir café, por exemplo.



Figura 24 : Foto de uma xícara descartável em PS.

No dia-a-dia de projetos, a seleção de materiais ocorre de algumas formas pouco sistemáticas: ou se faz uma pesquisa procurando que material é utilizado para aquela aplicação (o que seria equivalente a SM por análise, embora sem método), ou se busca uma alternativa imediata a ele, de preferência com alguma redução de custo (equivalente a SM por similaridade, sem método). E muitos casos, estas duas formas de SM trazem apenas evoluções a um projeto já existente, de modo que os projetistas deixam de aproveitar todos os benefícios de um processo de SMPF integrado ao projeto.

Isto dá pouca margem à inovação, já que poucos são aqueles que pensam no problema e muitos são os que pensam na solução. Um típico exemplo disso é o corpo de borboleta que controla a mistura ar/combustível do motor de automóveis. Os projetistas pensam em como transformar a solução utilizada hoje em dia em alumínio, em uma peça plástica, quando na verdade deveriam estar procurando uma solução mais eficiente (mais leve, mais barata, mais simples, etc.) para o problema de se regular o fluxo da mistura ar/combustível entrando no motor.

A vasta gama de propriedades dos materiais poliméricos, e muitas vezes o desconhecimento por parte dos engenheiros/projetistas sobre isso, leva a necessidade de se adequar as metodologias de SMPF à problemática da seleção de materiais poliméricos e sua popularização, para que sejam melhor aproveitados na indústria em geral.

O desenvolvimento dos materiais poliméricos e seus compostos é um campo em franca evolução e um projetista deve estar sempre atento para não desprezar uma possibilidade de inovação por absoluta falta de conhecimento. A SMPF possui um valor muito grande em todo o processo de *design* e deveria ser pensada de modo mais holístico.

Existem hoje em dia mais de 60.000 diferentes tipos (*grades*) de materiais termoplásticos disponíveis no mercado, e este número cresce dia-a-dia (KMETZ, 2006), como se pode ver na Figura 25.

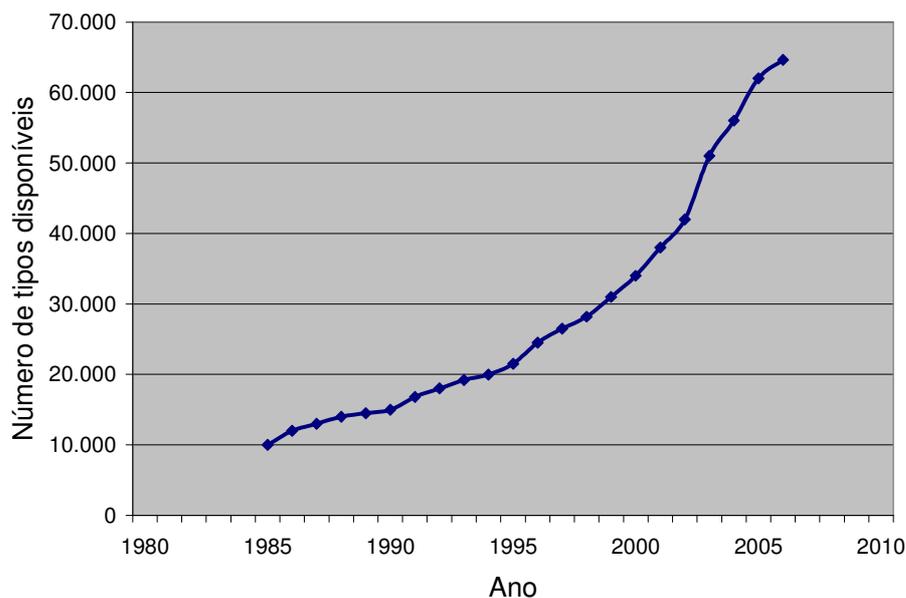


Figura 25: Crescimento do número de tipos diferentes de termoplásticos. Adaptado de Kmetz (2006).

Pode-se notar que mesmo com todo o esforço de racionalização dos tipos e da globalização, nos últimos anos o número de tipos diferentes vem aumentando rapidamente, embora tenha apenas poucas introduções de novas famílias de materiais poliméricos.

Isso se deve principalmente ao fato de que os fabricantes de matérias-primas procuram desenvolver tipos cada vez mais específicos para uma dada aplicação, no intuito de melhorar a relação custo *versus* benefício e garantir seu espaço no mercado.

O esforço para compilar dados de todos estes materiais é grande, o que leva ao problema de limitar a carga de trabalho ao mesmo tempo em que se busca tornar a informação disponível o mais relevante possível. Embora existam folhas técnicas de dados bastante completos que listam até 64 propriedades, a maioria delas lista um número bem menor, uma vez que se estima que uma folha de dados relativamente completa possa custar ao redor de 15.000 dólares (IDES, 2003).

Mesmo com a maior quantidade de dados possíveis, vários problemas ainda persistem. A grande maioria das propriedades listadas em uma folha de dados de um fabricante de matérias-primas é gerada a temperatura ambiente (geralmente 23°C). Sabe-se¹⁷ que praticamente todas as propriedades dos polímeros são dependentes da temperatura, o que faz com que os dados apresentados sejam, na melhor das hipóteses, uma aproximação do que pode acontecer na realidade da aplicação de um material. Além disso, os números apresentados representam em geral apenas um ponto do comportamento de uma propriedade que segue uma curva, esta sim muito mais informativa do ponto de vista do engenheiro projetista.

O exemplo clássico é a curva de tensão x deformação de um ensaio de tração, tão enfatizada nos livros texto de Ciência e Engenharia de Materiais (VAN VLACK, 1984); (CALLISTER, 1994); (SMITH, 1995). Ela representa muitas informações, e não somente dados isolados, ainda mais quando se tem informações disponíveis como o comportamento da curva sob diferentes condições. Infelizmente, para que se pudessem incluir vários gráficos em uma folha de dados, além de suas respectivas explicações, ela se tornaria demasiadamente extensa, deixando de ser prática, embora os fabricantes de materiais poliméricos termoplásticos, especialmente os de engenharia e de uso especial façam exatamente isso nos seus *design guides* (SOLVAY ADVANCED POLYMERS, 2003); (BASF, 2004); (GE PLASTICS, 2006).

¹⁷ Por exemplo, Billmeyer (1971), Brydson (1975), Callister (1994), Mano (1991), Margolis (1995) Ogorkievicz (1974).

Por praticidade, colocam-se simplesmente os números representativos de módulo, tensão de ruptura e alongamento de ruptura, que permitem uma rápida comparação (embora superficial e muitas vezes errônea) entre diferentes materiais. Com o advento de bancos de dados computadorizados, torna-se muito simples classificar e categorizar materiais baseados nos dados pontuais publicados pelos fabricantes.

E essa simplificação pode levar a falsa idéia de que a tarefa de seleção de materiais e especialmente a de materiais poliméricos seja bastante simples, não passando de uma escolha que se afunila conforme se entram as características (quase sempre numéricas) que atendam aos requisitos de um projeto. Ainda assim, ou justamente talvez por isso, muitas peças falham em serviço por que a seleção de materiais não levou em consideração todos os fatores necessários.

Para que se possa traduzir esses números em informação real para utilização em projetos sem gastar um tempo desproporcional a importância dele, é necessário um entendimento básico da ciência dos materiais poliméricos. Uma vez que um pouco da teoria é entendida, padrões de comportamento para as diferentes famílias dos polímeros podem ser deduzidos, e os números nas folhas de dados podem ser melhor entendidos dentro do seu contexto.

Uma breve explanação sobre algumas das propriedades comumente encontradas em folhas de dados pode ser encontrada no Apêndice A, onde se procura enfatizar os aspectos importantes para o projeto de peças, como o método de teste, seu significado e também os efeitos da temperatura sobre essas propriedades. O Apêndice B apresenta uma breve discussão sobre os métodos de teste utilizados na determinação destas propriedades.

3.2 Análise de Similares

Durante a década de 80 começaram a aparecer os bancos de dados informatizados que visavam a busca de materiais para auxiliar na seleção de materiais, embora com dados limitados sobre materiais poliméricos e sem uma base teórica bem fundamentada, até porque os procedimentos de SMPF ainda não haviam sido sistematizados e tornados eficientes para o uso não acadêmico. Esses bancos de dados evoluíram a ponto de se tornarem ferramentas bastante utilizadas na indústria, embora com algumas limitações, como pode ser entendido a seguir.

3.2.1 IDES (www.ides.com)

O IDES apareceu pela primeira vez em 1986 como um *handbook*, a partir de uma necessidade da IBM sobre informações confiáveis sobre materiais poliméricos e logo foi transformado em um banco de dados eletrônico e disponibilizado na internet na metade da década de 90, sendo hoje amplamente reconhecido como a maior ferramenta de busca vertical sobre materiais poliméricos e folhas de dados de fabricantes.

Para isso, aceita dados de qualquer fabricante que se disponha a enviá-los, não confirma nenhum dos dados, mas ao mesmo tempo não cobra nada dos fabricantes. Se um produto não for encontrado durante uma busca, a IDES busca o fabricante e o produto e o adiciona ao banco de dados a partir das informações do solicitante, uma maneira interessante de aumentar o número de produtos em seu catálogo.

Estão disponíveis 64.630 fichas técnicas de produtos termoplásticos provindos de 453 fabricantes de matérias-primas (IDES, 2006a), além de alguns termorrígidos e elastômeros. Essas fichas técnicas variam muito em quantidade de dados disponíveis, já que dependem dos fabricantes em si. Os dados seguem às normas ASTM, sendo os dados ISO disponíveis somente quando o fabricante as disponibiliza voluntariamente ou o mesmo material pode ser encontrado no banco de dados do sistema CAMPUS.

Segundo o próprio IDES, 42.143 (IDES 2006b) empresas utilizam seu sistema regularmente e serve de base para muitos *materials selectors* de fabricantes de termoplásticos incluindo Solvay, GE, BASF, Bayer, Basell, Dow, Dupont, ExxonMobil, Lanxess, LG (IDES, 2006c).

Sua usabilidade é muito boa, embora as ferramentas mais úteis em um verdadeiro processo de SMPF sejam cobradas (entre US\$ 500 e US\$ 700 por ano). A parte “livre” da página é uma boa fonte de informação geral, além de possibilitar o acesso a folhas de dados individuais. Comparações, materiais alternativos e buscas avançadas, entre outros, estão na área paga. Está disponível somente em língua inglesa. A reprodução de uma tela de busca por propriedades pode ser encontrada na Figura 26, e uma comparação entre diferentes materiais na Figura 27.

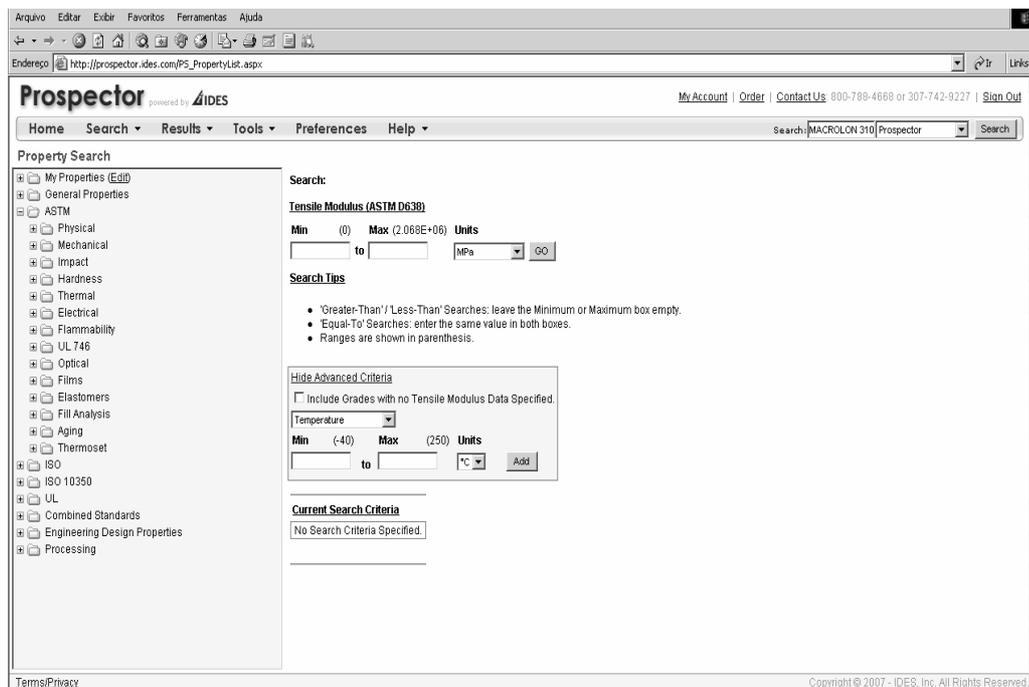


Figura 26: Reprodução da tela de busca seqüencial do serviço IDES em 23 de Janeiro de 2007.

The screenshot shows the Prospector software interface. At the top, there is a menu bar with options: Arquivo, Editar, Exibir, Favoritos, Ferramentas, Ajuda. Below the menu bar is a toolbar with various icons. The main content area is titled 'Product Comparison' and shows a comparison between 'LEXAN® 101 Resin' and 'Makrolon® 3106'. The interface includes a 'Product Description' section, a 'General Information' section, and a table for 'ASTM and ISO Properties'. The date 'Tuesday, July 10, 2007' and 'Unit System: SI' are also visible.

ASTM and ISO Properties ¹				
Physical	Test Method	Unit	LEXAN® 101 Resin	Makrolon® 3106
Density	ISO 1183	g/cm ³	1.20	--
Apparent Density	ISO 60	g/cm ³	--	0.660
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (300°C/1.2 kg)	ISO 1133	g/10 min	--	6.5

Figura 27: Reprodução de uma tela de comparação entre produtos do serviço IDEs em 23 de Janeiro de 2007.

Seu foco original eram os projetistas buscando materiais para suas necessidades e daí se explica a boa usabilidade, mas é também muito utilizado por moldadores e provedores de matéria-prima buscando informação consolidada em um único lugar. Bons atributos são a lista de materiais aprovados pelas grandes indústrias automobilísticas (FORD, GM, Daimler-Chrysler) e a busca por materiais alternativos. Infelizmente, ainda não oferece possibilidade de integração de dados com sistemas de análise de elementos finitos como Abaqus[®] ou Ansys[®].

3.2.2 CAMPUS (www.campusplastics.com)

Este sistema de acesso livre nasceu da idéia de que para se poder comparar diferentes materiais, é necessário que eles sejam testados de acordo com os mesmos parâmetros, e levou ao seu nome: **C**omputer **A**ided **M**aterial **P**reselection by **U**niform **S**tandards – pré-seleção de materiais auxiliada por computador por normas uniformes.

Funciona baseado em dados fornecidos pelos fabricantes – 25 nos dias de hoje (CAMPUS, 2006) – de acordo com normas específicas, baseadas nas normas ISO 10350 e ISO 11403. Com mais de 300.000 sistemas instalados gratuitamente em oito diferentes línguas, mas não em português, pode ser considerado o maior em número de usuários.

Existe uma versão com mais recursos para ser instalado em rede, com um custo de cerca de US\$ 400 por ano, mas que permite não só acesso a um maior número de dados (9.000 *versus* 6.000 do tradicional), mas também ferramentas de busca e integrações com sistemas de análise de elementos finitos.

Sua usabilidade é um tanto difícil, e não é possível fazer comparações entre diversos materiais. É muito bom como ferramenta para levantar dados sobre um determinado tipo de material, mas acaba sendo pouco utilizável como ferramenta de SMPF por não oferecer informações gerais ou uma filosofia de SMPF por trás do *software*. Mesmo para comparações, seu alvo principal, tem sérias limitações pelas dificuldades para se comparar produtos de diferentes fabricantes. A reprodução da tela de trabalho inicial do sistema é reproduzida na Figura 28.

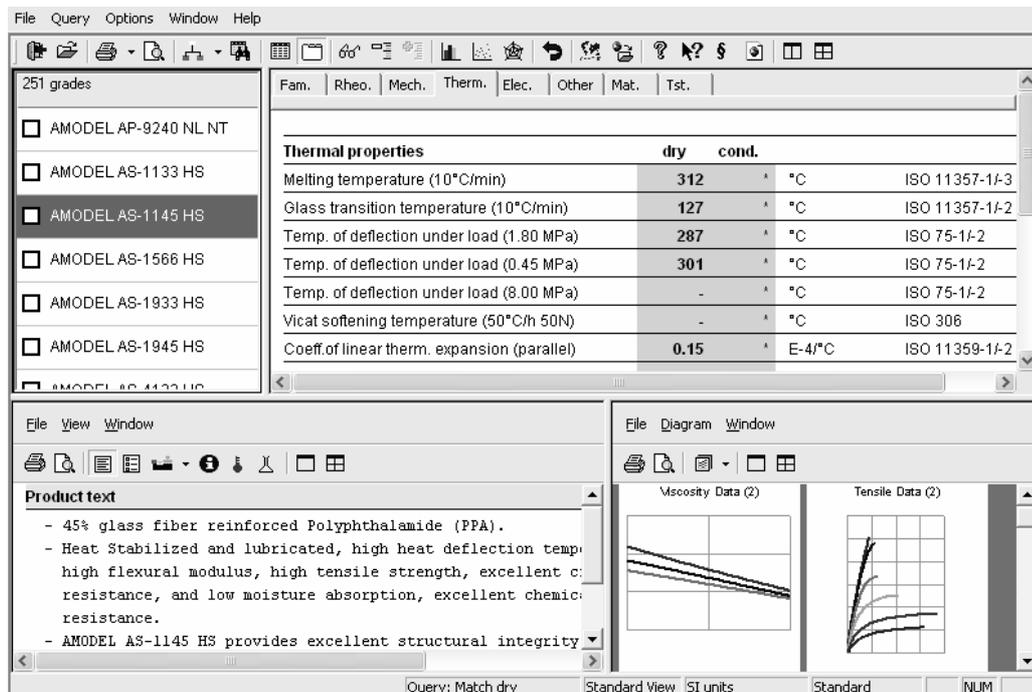


Figura 28: Reprodução da tela inicial de trabalho do serviço campus para os materiais da empresa Solvay Advanced Polymers em 11 de dezembro de 2006.

Por representar somente os fabricantes tradicionais pode estar deixando de lado materiais específicos de alto conteúdo tecnológico e também aqueles mais comuns que são fabricados por empresas menos tradicionais do Oriente Médio, Ásia e América do Sul, que tem crescido substancialmente nos últimos anos.

3.2.3 Granta CES Optimal Polymer Selector (www.grantadesign.com)

Esse sistema se baseia nas idéias originais de Ashby (seu fundador) de mapas de propriedades dos materiais e índices de mérito com o intuito de dar uma aplicação prática à teoria. A idéia é fazer a seleção por etapas, fazendo uma pré-seleção baseada em alguns fatores para somente depois ir a materiais com propriedades específicas determinadas com o auxílio de sucessivos mapas.

Deste modo, o sistema permite que o usuário identifique onde cada uma das alternativas analisadas é mais forte ou fraca, o que, segundo os desenvolvedores do sistema, permite uma tomada de decisão “científica”. Para isso, parte de um banco de dados próprio de cerca de 600 materiais genéricos e depois avança para os bancos de dados licenciados de IDES e CAMPUS.

Segundo Coulter *apud* Neilley (2004), este é um sistema atrativo e poderoso para empresas com requerimentos técnicos bem definidos, embora o projeto gráfico torne a usabilidade ruim. Oferece buscas por propriedades comuns em folhas de dados, mostrando todo o caminho percorrido até se achar um determinado material e as possibilidades de buscas múltiplas são praticamente infinitas, embora possam se tornar bastante complexas devido a uma falta de metodologia definida para as mesmas. Uma tela de trabalho do CES é reproduzida na Figura 29.

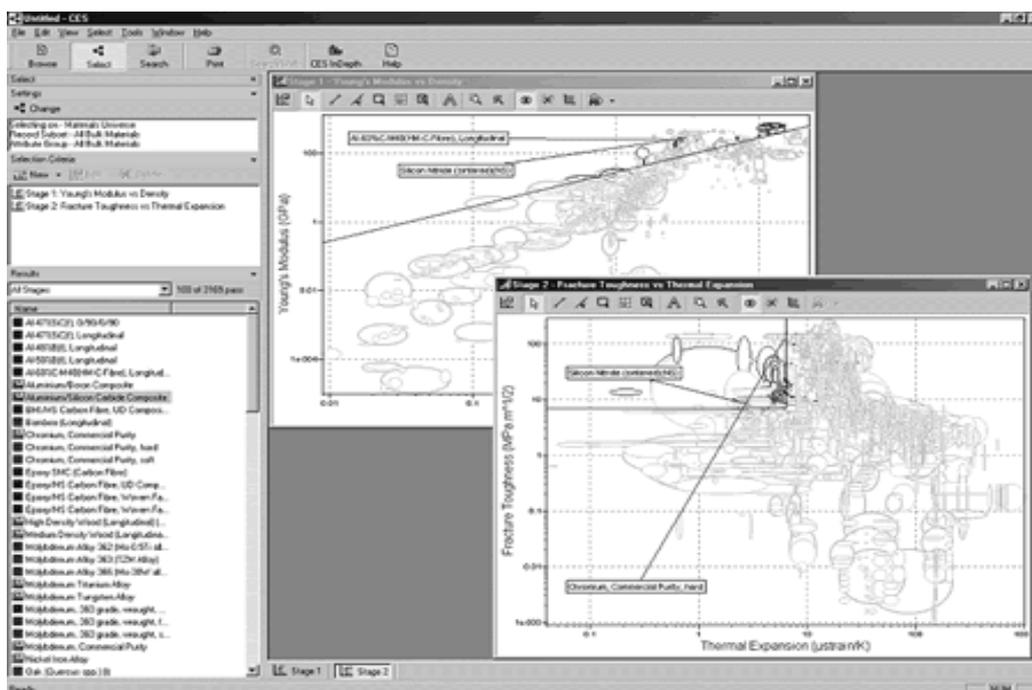


Figura 29: Reprodução de uma tela do CES Material Selector, onde podem ser observados dois mapas de propriedades dos materiais e linhas referentes a um determinado índice de mérito.

3.2.4 Matweb (www.matweb.com)

O Matweb se propõe a ser um banco de dados com ferramentas de busca de folhas de dados de materiais. Inclui termoplásticos e termorrígidos, além de materiais metálicos e suas ligas, materiais cerâmicos, semicondutores, compósitos, fibras e outros materiais de engenharia, perfazendo um total de mais de 59.000 folhas de dados (MATWEB, 2006), sendo 34.532 folhas de dados de termoplásticos, sendo que a principal fonte de dados são os próprios fabricantes dos materiais.

O serviço básico é livre enquanto as ferramentas mais avançadas requerem no mínimo um cadastro, mas podem custar até US\$ 75 por ano para sua utilização. Deve-se destacar que o serviço cadastrado é bastante compreensivo, permitindo fazer comparações entre diversos materiais (inclusive de classes diferentes), comparações gráficas de diversas propriedades – uma ferramenta muito mais útil e dinâmica que a simples comparação direta de números. Já o serviço pago adiciona ferramentas de busca e organização de dados mais poderosas, permitindo comparações mais complexas em uma única etapa, além da exportação de dados em diversos formatos.

Alega ter cerca de 14.000 usuários por dia e cerca de 91.000 registrados (MATWEB, 2006). Também alega ser utilizado como ferramenta de busca por um grande número de empresas, embora elas em geral sejam menores que aquelas atendidas pelo IDES.

Apresenta uma programação visual bastante simples, de fácil usabilidade, mas é muito difícil encontrar um material se o usuário não tiver um conhecimento básico sobre o que se procura, sendo necessário um bom conhecimento sobre as propriedades dos materiais. A tela de busca avançada deste sistema é reproduzida na Figura 30.

The screenshot shows the Matweb search interface with the following sections:

- Text Search:** Includes a search input field, an 'ADD' button, and radio buttons for 'Include' (selected) and 'Exclude from search results'.
- Material Category Search:** Includes a dropdown menu, an 'ADD' button, and radio buttons for 'Include' (selected) and 'Exclude from search results'.
- Material Property Search:** Includes a dropdown menu, an 'ADD' button, and input fields for 'Min:', 'Max:', and 'Units:'.
- Metal Composition Search:** Includes a dropdown menu, an 'ADD' button, and input fields for 'Min:', 'Max:', and 'Wt. %'.
- Search Criteria:** Shows two criteria: '1 (Prop) Hardness, Knoop >= 900' and '2 (Text) NOT "diamond"'. A 'START OVER' button is present.
- 5 Materials Returned (View Results):** Shows 'Results' set to '200 per page' and 'Order by' set to a dropdown menu. An 'APPLY' button is present.
- Saved Searches:** Includes a dropdown menu, a 'Task' dropdown set to 'View', and a 'Search Name' input field. An 'APPLY' button is present.
- Comparison Baskets and Libraries:** Includes a dropdown menu, a 'Task' dropdown set to 'View', and a 'New Name' input field. An 'APPLY' button is present.
- Results Table:** A table with columns 'Basket' and 'Material Name'. It lists five materials:

Basket	Material Name
<input type="checkbox"/> 1	Alumina, 99.9%, Al ₂ O ₃
<input type="checkbox"/> 2	Tungsten Carbide, W2C
<input type="checkbox"/> 3	Quartz (SiO ₂)
<input type="checkbox"/> 4	Topaz
<input type="checkbox"/> 5	Delcrome® alloy 93

Figura 30: Exemplo de tela de busca avançada do serviço Matweb em 13 de Fevereiro de 2007.

3.2.5 AZoM A to Z of materials (www.azom.com)

A ferramenta AZoM foi criada em 1999 por um grupo de cientistas dos materiais australianos. Está baseado na premissa de que hoje mais de 21 milhões de engenheiros utilizam a internet rotineiramente para desempenhar partes de seus trabalhos, mas eles desconhecem o que os materiais ditos “avançados” (novas ligas metálicas, matérias cerâmicos, compósitos) podem lhes ajudar em seus projetos.

Com a missão de ser a principal fonte independente de informações sobre materiais – folhas de dados, notícias, opiniões, etc. – não cobra por seus serviços e nem mesmo pede um cadastro. Pretende ser uma base de informações que permita a engenheiros e projetistas tomar suas decisões SMPF de maneira fundamentada.

A ferramenta é mantida por organizações de pesquisa em materiais e uma rede de colaboradores ao redor do mundo (AZoM, 2006), que produzem a maioria do conteúdo disponível. Fabricantes de materiais e equipamentos não são fontes oficiais. É interessante notar que uma das instituições que fornecem dados e também fazem parte do planejamento estratégico é a Granta Design, cujo produto já foi analisado anteriormente.

Possui muita informação na forma de artigos, de difícil busca, e ferramentas de busca de materiais muito simples, que deixam muito a desejar quando comparados a de outros softwares, já que se necessita saber exatamente o que se busca para se encontrar qualquer informação, algo que inibe o poder criativo dos engenheiros e projetistas como já discutido por Walter (2006).

Além disso, as informações ali contidas, como em qualquer outro sistema “aberto” devem ser utilizadas com cuidado, já que não há meios de se checar sua veracidade. Como exemplo, algumas buscas simples por materiais conhecidos retornaram resultados bastante diferentes dos que constam nas folhas de dados dos fabricantes. A tela de busca deste sistema é reproduzida na Figura 31.

The screenshot displays the AZoM search interface. On the left, there is a sidebar with the text 'Microsystems and Nanotechnology Masters' and 'Materials Masters Programmes at The University of Nottingham', along with an 'ADVERTISE HERE' button. The main search area is titled '"AskAZoM" Ask your "Natural Language" materials question' and features a large text input field and a 'Search' button. Below this, there are checkboxes for 'Articles', 'Journal', and 'News'. Further down, there are three search input fields labeled 'Keyword Search', 'Application Search', and 'Industry Search', each with a 'Reset' and 'Search' button. A 'Material Property Search' section includes radio buttons for 'Imp' and 'Si (Units)', a dropdown menu for 'Select One', and two comparison operators '<=' and '>=' with 'Value' input fields and 'Reset' and 'Search' buttons. At the bottom left, there is a 'Latest Articles' section. On the right, a 'News RSS' sidebar lists several news items with titles like 'SINTEF, EU and China to Cut Greenhouse Emissions from Coal-Fired Power Plants' and 'American Superconductor Materials Help Hyundai Achieve Record Performance in Fault Current Limiters'.

Figura 31: Reprodução da tela de busca do serviço AZoM em 13 de Fevereiro de 2007.

3.2.6 Omnexus Polymer Selector 2.0 (www.omnexus.com)

Da mesma maneira que os serviços IDES e Matweb, o Omnexus pretende ser um ponto de parada na internet para engenheiros e designers a procura de informações sobre materiais poliméricos. Deste modo, oferece a oportunidade de buscas por propriedades e comparações, embora nos dois casos de modos mais limitados que os outros serviços. Como exemplo pode-se mencionar que é muito difícil encontrar um material, a menos que se tenha muitas informações sobre ele, algo que nem sempre é verdade para um usuário buscando materiais em um banco de dados. Uma reprodução da tela de busca deste serviço pode ser visualizada na Figura 32.

POLYMER SELECTOR V2.0

[Send comments](#)
[Recommend this site](#)
[Customer Support](#)

Welcome to the **NEW Omnexus!**
REGISTER NOW!
 and access for free the Innovations, Articles, WebSeminars, Polymer Selector & more.

User ID:
 Password:
 Remember me [Forgot Password?](#)

Flash player 7 is required to view results.
 >> [Click here to download](#)

Please enter numeric values

1. Select your polymer type

Thermoplastics TPE/TPV, Thermoplastic Elastomers

2. Select your property profile

Select unit system: Metric Units US Units

Property 1 :

Very Low Low Medium High Very High

min < GPa < max
 Flexural Modulus (between 0 and 37 GPa)

Explanation: Stiffness is proportional to the flexural modulus (Flexural Stress/Strain). The higher the flexural modulus, the higher the stiffness.

Property 2 :

Medium High Very High

min < % < max %
 visible light transmission (between 70 and 95 %)

Explanation: Percentage of incident light transmitted through a standardized sample. The higher the value, the higher the transparency.

Figura 32: Reprodução da tela de busca do serviço Omnexus em 11 de dezembro de 2006.

Não são permitidas comparações entre termoplásticos e termofixos e, apesar de inicialmente possibilitar somente buscas numéricas, agora já permite usar uma escala qualitativa em algumas propriedades (como muito alto, alto, médio, baixo, muito baixo, por exemplo) e também foi introduzida possibilidade de se comparar graficamente até cinco propriedades.

Bons atributos são as referências de preço (escala comparativa), uma breve explicação para cada propriedade que se busca e os exemplos de algumas aplicações existentes para certos materiais.

Já alguns problemas são a pouca informação sobre cada material, limitada e muitas vezes irrelevante, muito geral, sem citar as possibilidades de cada um e com poucos exemplos.

O mais grave, porém, é que materiais importantes não fazem parte da lista de materiais disponíveis para busca, como as poliamidas 6.9; 6/6.6; 6.12, além de MDPE, mPEs, PPA's, acrilatos, etc. Os materiais disponíveis para busca, assim como aqueles que apresentam estudos de caso são somente aqueles de companhias anunciantes, o que certamente tira a credibilidade do banco de dados como fonte de comparações entre materiais e também quando, pela busca de uma aplicação, o serviço indica somente o material do anunciante.

3.2.7 E-Funda (www.efunda.com/materials/polymers)

Este site, sobre os fundamentos da engenharia contém uma grande quantidade de informações genéricas úteis ao projetista, como fórmulas, conversores de unidades, informações sobre materiais, processos e guias de projeto.

Na área dedicada ao projeto com polímeros, estão disponíveis informações sobre características básicas, comparações de propriedades com outros materiais, uma lista dos principais materiais e suas características e informações genéricas sobre o seu processamento.

Existe também uma área dedicada especificamente a seleção de polímeros, onde a metodologia geral de projeto com materiais poliméricos é apresentada. Ela é muito parecida a aquela preconizada por quase todos os fabricantes e por isso é listada aqui em seus principais pontos.

- **Experiência:** Com que material os produtos concorrentes são fabricados? Que materiais falharam ou tiveram sucesso em aplicações similares e por quê?
- **Requisitos:** Quais os reais requisitos que o objeto produzido com o material deve atingir?
- **Análise:** A análise computacional tem evoluído muito ultimamente, e é de grande valia na busca de se aperfeiçoar uma geometria, embora ela deva ser utilizada com cuidado, pois os polímeros possuem características visco-elásticas que nem sempre são levadas em consideração por estes programas;
- **Processamento e efeitos de superfície:** O processamento afeta as propriedades dos plásticos e é muito difícil modelar todos os efeitos que ele pode produzir (anisotropia, efeitos de superfície, etc.) e são tipicamente mais pronunciados nos materiais carregados e também naqueles semi-cristalinos;
- **Prototipagem e validação e testes:** Justamente pelo fato de que a análise computacional não reflete em 100% a realidade e que o ferramental tipicamente é bastante custoso, é prudente se adicionar uma fase de prototipagem para validar o projeto;

3.2.8 *Manufacturing Advisory Service 2.0*

(<http://bmi.berkeley.edu/Me221/mas2/html/applet/index.html>)

Concebido a partir de uma conversa entre dois professores da Universidade de Berkeley, na Califórnia, o MAS se tornou realidade em um projeto de mestrado (BROWN, 1997). A idéia original era ter uma ferramenta para selecionar projetos e peças para serem usinadas nos laboratórios daquela Universidade, que depois evoluiu para se tornar um programa disponível na internet para ajudar engenheiros na escolha de processos de produção. (MAS 2.0, 2006); (BROWN; WRIGHT, 1998).

A versão 2.0 foi desenvolvida para tornar a ferramenta mais abrangente e ao mesmo tempo mais utilizável. Se auto-entitula como uma ferramenta para seleção de processos e materiais para a fase conceitual de projetos, ou seja, é uma ferramenta para se procurar um bom método de fabricação para um produto ainda em sua fase inicial do projeto. Para isso, utiliza o método do questionário fechado, onde o usuário responde a uma série de perguntas sobre tamanho de lote, tolerâncias, dimensões, formas e custo, por exemplo. A cada pergunta respondida (não há necessariamente uma ordem) o usuário é apresentado a uma lista de possíveis processos, que são classificados por barras maiores ou menores com cores, juntamente com a classificação anterior à última pergunta, em cinza.

Permite também a realização de estimativas de custo, e processos em cadeia, indicando que em situações onde há tolerâncias variadas ou extremamente precisas em uma mesma peça este pode ser o melhor caminho.

O mesmo princípio chegou a ser desenvolvido para a seleção de materiais, embora com pouco detalhamento, uma vez que só se define classes genéricas de materiais: ferro fundido, aço carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de zinco, ligas de magnésio, ligas de titânio, ligas de níquel, metais refratários, termoplásticos, termorrígidos, materiais cerâmicos, fotopolímeros e madeiras. Pela lista, fica bastante clara a ênfase em materiais metálicos e uma generalização bastante excludente para as outras classes de materiais, uma vez que características como resistência mecânica, preço e densidade são tomadas pela média da classe, o que certamente induz a erros grosseiros de avaliação.

Há *links* para tutoriais, e também para informações adicionais sobre cada processo (razoavelmente detalhado) e material (muito pouco detalhado), além da descrição minuciosa sobre o assunto de cada pergunta. A reprodução de uma tela do tutorial pode ser visualizada na Figura 33.

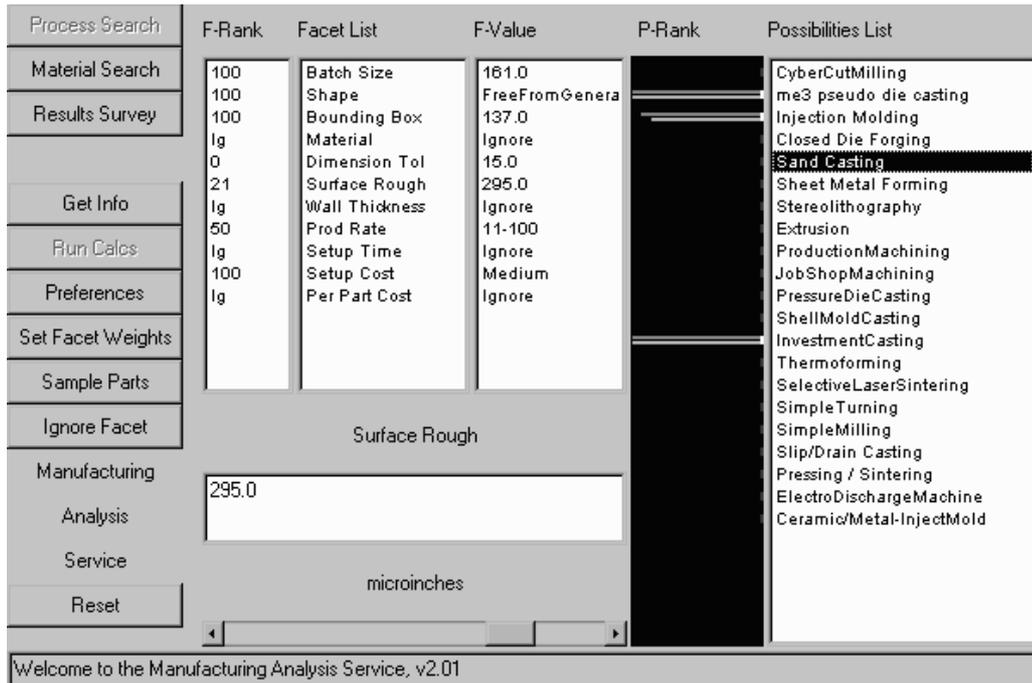


Figura 33: Reprodução de uma tela do tutorial do serviço MAS 2.0 em 11 de dezembro de 2006.

Ele declaradamente ignora alguns processos e materiais, como por exemplo: vidros, borrachas, metais preciosos, papéis, compósitos, processos de união como soldagem, brazagem, feixe de elétrons, ultrassom, adesivos, união mecânica e processos de corte como corte a laser ou a água.

O fato de ser um questionário fechado faz com que o usuário seja “guiado” a uma resposta de maneira intuitiva e permite a um usuário experimentado customizar os valores relativos de cada pergunta, como por exemplo, fazer com que as características mecânicas tenham um valor relativo maior do que o custo de maquinário.

Infelizmente esta ferramenta teve o seu desenvolvimento abandonado em fins de 1999 e sua interface e usabilidade são bastante limitadas. Continua a ser utilizado na Universidade de Berkeley como ferramenta de ensino e está disponível pela internet, apesar de bastante defasado, mas com bastante potencial de desenvolvimento.

3.2.9 Fabricantes de Materiais Poliméricos Termoplásticos

Os fabricantes de resinas que disponibilizam seletores de materiais em seus sítios de internet são tipicamente os fabricantes de polímeros de engenharia ou de uso especial, já que estes materiais são os que requerem dos projetistas uma maior atenção devido ao seu uso técnico.

Estes fabricantes utilizam *softwares* de outras empresas¹⁸ para buscas limitadas somente aos seus materiais e as aplicações típicas destes, sem possibilidades de comparação com produtos concorrentes. Normalmente se inclui uma busca por aplicação, útil quando se deseja saber as diversas utilizações de um material ou que materiais são utilizados em uma determinada aplicação com rapidez.

Por outro lado, estes seletores limitam muito a possibilidade de inovação por parte do projetista, uma vez que relacionam sempre uma aplicação a determinado produto. Assim, a menos que se procure por um material específico, que se esteja fazendo um *benchmarking* ou que se tenham todas as especificações do projeto já fechadas – o que remete aos pontos anteriores – estes seletores são de pouca utilidade.

Uma possibilidade de comparação entre os dados de alguns fabricantes é o serviço CAMPUS (Cf. descrição CAMPUS), mas este funciona muito mais como uma ferramenta de comparação de materiais do que propriamente um seletor de materiais.

Para o caso das empresas fabricantes de plásticos *commodities*, normalmente não se encontram seletores e sim mecanismos de busca simples entre os produtos da empresa em questão. Quase sempre se utiliza de um sistema de questionário fechado que é bastante efetivo em se encontrar um determinado material para determinada aplicação, mas que oferece muito pouca possibilidade de inovação. Alguns fabricantes (principalmente os que não são líderes de mercado) colocam em seus sítios de internet tabelas de contra-tipos, uma maneira indireta de comparar os seus produtos com aqueles que são o padrão de mercado, ou aqueles mais conhecidos.

¹⁸ O IDES é o maior provedor de mecanismos de busca entre as grandes empresas de polímeros de engenharia e de uso especial. Cf. descrição IDES.

Um outro fato a se destacar é que raramente os fabricantes colocam em suas páginas muitas informações de seus mais novos desenvolvimentos.

3.2.10 Materiotecas

Há algum tempo começaram a surgir serviços que tentavam estabelecer uma coleção de materiais catalogados, algo similar a uma biblioteca física de materiais, onde se pode não só ter informações sobre eles, mas também manuseá-los. Estas bibliotecas foram chamadas de materiotecas, e tinham seu foco inicial nos designers de interiores e arquitetos em busca de inovações para seus projetos. Nesta seção alguns destes serviços são avaliados.

3.2.10.1 Material ConneXion (www.materialconnexion.com)

Esta empresa, fundada em 1997 em Nova Iorque, EUA tem a proposta de apresentar uma materioteca e um banco de dados informacional de “materiais inovadores” para designers. Trata-se de um empreendimento muito conhecido entre os profissionais da área de design, atualmente com filial em Milão, Bangkok e Colônia e que abriga cerca de 3.500 tipos diferentes de materiais ditos “inovadores” (MATERIALCONNEXION, 2006).

As principais contribuições deste exemplo estão na associação de uma Materioteca a um banco de dados via Internet, com sistema de recuperação de dados (buscador) e em sua estrutura física, que conta com uma estrutura semelhante a uma biblioteca para exposição dos materiais, além de salas de reuniões, lojas e espaço para exposições. Como pontos falhos podem-se destacar: a) a quantidade de informações sobre os materiais disponibilizadas via Internet, que consiste de um breve texto e um par de imagens, como pode ser visualizado na Figura 34; b) a ineficácia da busca por palavras chave no texto citado, destacado na Figura 35, sem possibilidade de uma busca por atributos; c) a pré-seleção por um júri de profissionais, de “materiais inovadores”, sem dúvida uma definição muito vaga e que pode ter várias interpretações, já que a inovação dá-se tanto pela aplicação de um novo material quanto pelo uso de um material tradicional numa nova aplicação, e pela possibilidade criada por um novo material de criar uma nova aplicação.



Product Overview [> New Search](#)

MC Index Number: 5572-02

PRIPLAK®, **DUOLUX**, **DUOLUX Metal**, **STARLIGHT**, **OXYGEN**

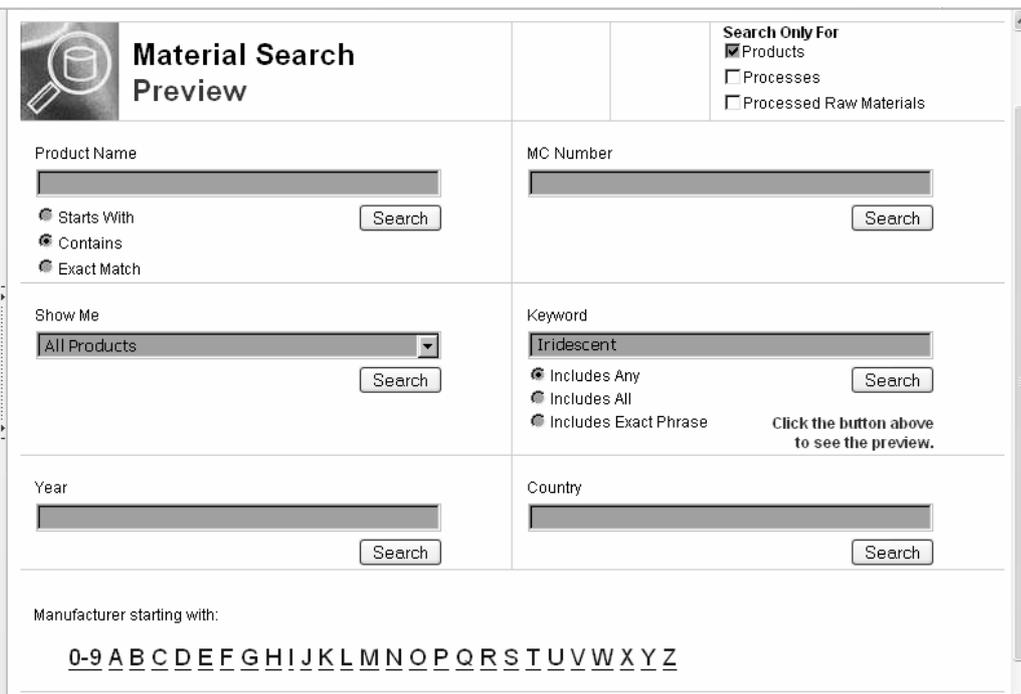
Technical Name:
Polymer film with effect pigments
Year introduced:

Flexible polymer film with effect pigments Iridescent polymer films made from 100% polypropylene (PP). These films incorporate various effect pigments that range from metallic to color change pigments. The films are break-resistant, robust, easy to handle, do not contain VOCs, are resistant to water, fats and chemicals and they are recyclable. They comply with the requirements for food safety (90/128/CEE) as well as with the toy safety regulations (EN71/3). They are easily die-cut, grooved, cut, riveted, clamped and they are suitable for hot foil and blind stamping. Suitable printing methods are screen, UV offset, and UV digital printing. Depending on the product group, the films are available in 7 translucent, iridescent colors, gold and silver and also with a double face effect (one side metallic and one side deep black). Custom colors are possible for a minimum order of 3 tons. Applications are high-quality packaging, folders, portfolios, displays, lampshades and other accessories.

Detail
See **Alternative Views**
[> Detail](#)
[> Detail](#)

[> PRIPLAK SAS - ARJOWIGGINS GROUP](#)
France

Figura 34: Reprodução de uma ficha de material do serviço Material Connexion em 12 de dezembro de 2006.



Material Search Preview **Search Only For**
 Products
 Processes
 Processed Raw Materials

Product Name MC Number
 Starts With

Contains
 Exact Match

Show Me Keyword

Includes Any
 Includes All
 Includes Exact Phrase **Click the button above to see the preview.**

Year Country

Manufacturer starting with:
0-9 A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

Figura 35: Reprodução da tela de busca do serviço Material Connexion em 12 de dezembro de 2006.



Figura 37: Reprodução de uma ficha de material do serviço Matério em 25 de Fevereiro de 2007.

3.2.10.3 Materioteca® (www.materioteca.com)

Esforço realizado pelo consórcio para a promoção da cultura do plástico (Proplast) da Itália, tem sede na pequena cidade de Alessandria, e é a primeira materioteca dedicada exclusivamente aos materiais poliméricos e idealizada de maneira a valorizar tantos os aspectos técnicos dos materiais como os sensoriais.

Utiliza amostras de materiais em formas de placas com determinadas cores e texturas, além de disponibilizar informações técnicas e de processamento dos materiais. As amostras são produzidas pelo próprio consórcio, seguindo a orientação dos fornecedores de matérias-primas. Por ser uma iniciativa relativamente nova (iniciada em 2005) e que demanda muito trabalho, seu acervo ainda é bastante limitado, mas seu projeto deve se tornar uma referência para materiotecas na área de plástico.

3.2.10.4 Material Explorer

Um trabalho de graduação que se transformou em uma ferramenta de auxílio a designers resume bem o que é o serviço Material Explorer. Arnold Van Bezoooyen começou a trabalhar em seu projeto de conclusão de curso na Universidade de Delft sobre um problema proposto pelo professor Michael Ashby, o de se criar uma interface amigável para que a seleção de materiais fosse mais bem explorada por designers (VAN BEZOOYEN, 2002).

Ele partiu do princípio de que técnicas e ferramentas estão disponíveis para a seleção de materiais baseados em requisitos técnicos e funcionais, mas que para atender requisitos estéticos e sensoriais elas não estão disponíveis. Também considerou o fato de que a SM não se restringe a informações sobre os materiais, mas sim em um constante intercâmbio de considerações que devem levar em conta os materiais, o objeto em projeto e também a tecnologia envolvida.

Finalmente, considerou que o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias permite uma maior liberdade para os designers, de maneira que estes deveriam se atualizar constantemente sobre as novas possibilidades e estarem aptos a explorar as propriedades destes novos materiais.

Neste serviço, aos materiais são atribuídas propriedades funcionais e estéticas, e a partir disto os designers podem realizar suas buscas, com os resultados sendo subsequentemente apresentados em seu contexto (ou aplicação) para que os aspectos funcionais e estéticos possam ser mais bem compreendidos. A Figura 38 reproduz uma tela de busca, enquanto que a Figura 39 reproduz uma ficha de material deste serviço.

O sistema foi repetidamente testado por designers e engenheiros e hoje se pode dizer que é o sistema que melhor consegue unir os aspectos técnicos e os sensoriais dos materiais. No entanto, da mesma maneira que outros serviços, este faz uma pré-seleção de materiais inovadores, o que por si só já é uma contradição e não permite uma comparação entre produtos. No entanto, o projeto original de mestrado previa vários recursos que não foram aplicados na versão atualmente disponível.

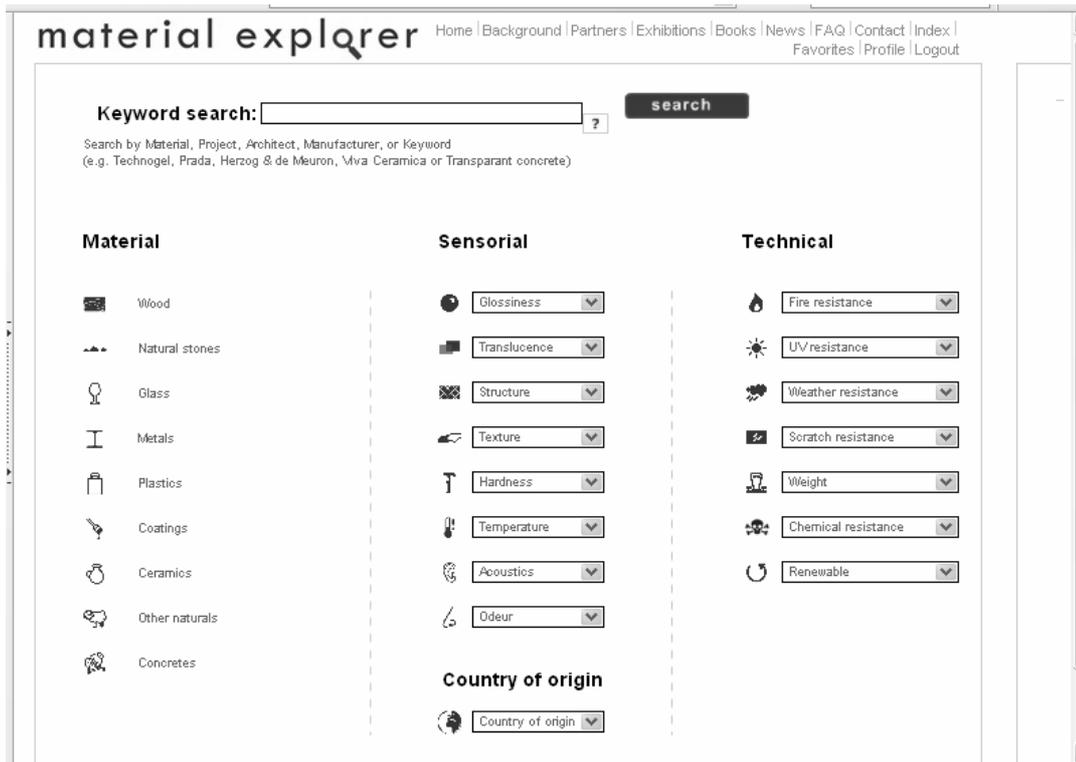


Figura 38: Reprodução da tela de busca do serviço Material Explorer em 25 de Fevereiro de 2007.

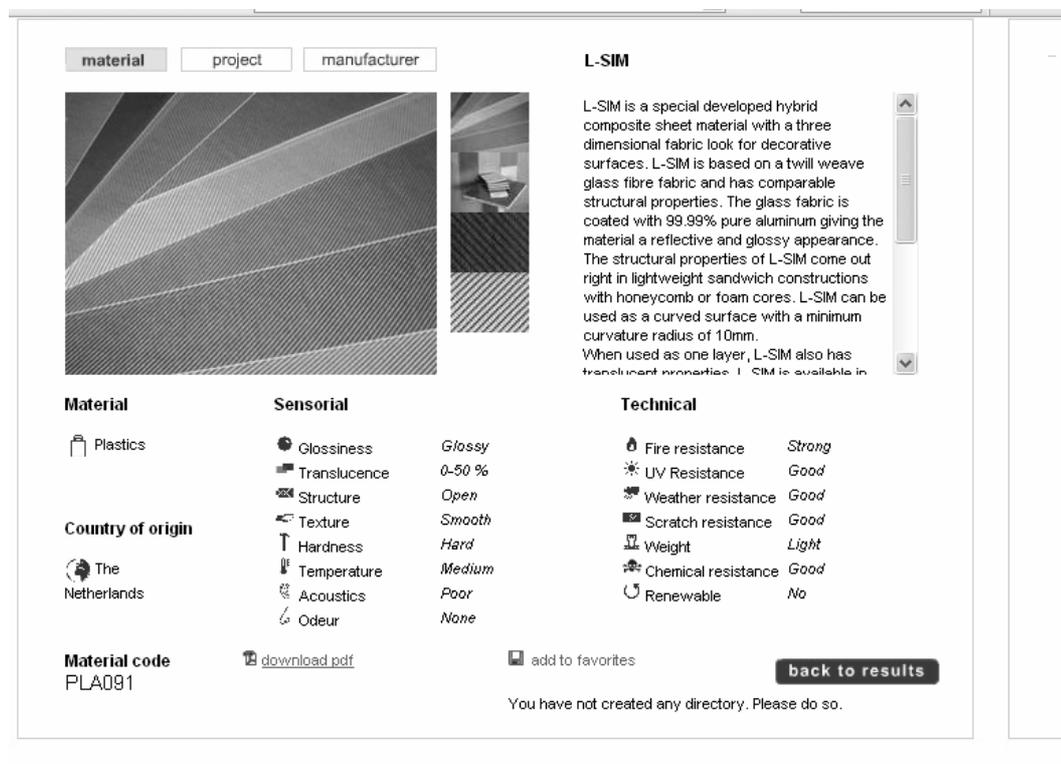


Figura 39: Reprodução de uma ficha de material do serviço Material Explorer em 25 de Fevereiro de 2007.

3.2.11 *Comparação entre os sistemas*

É muito difícil uma comparação direta entre os diversos bancos de dados disponíveis, ainda mais quando nem sempre os mesmos materiais ou dados sobre estes estão disponíveis em todos eles. O IDES cita mais de 60.000 tipos (KMETZ, 2006), o Matweb diz ter 34.536 termoplásticos (MATWEB, 2006) enquanto que o CAMPUS tem somente cerca de 6.000 (NEILLEY, 2004), mas indica que eles são inteiramente comparáveis entre si, embora de maneira pouco prática.

No caso específico do CAMPUS, o fato de todos os materiais ali disponíveis apresentarem todos os seus dados de acordo com as mesmas normas ISO, possibilita uma comparação direta. Embora o número de grades seja limitado e bem inferior ao de seletores concorrentes, Baur *apud* Neilley (2004) cita que os tipos ali apresentados representam cerca de 90% dos termoplásticos utilizados no mundo. Essa é uma afirmação um tanto otimista, visto que há poucos fabricantes ali representados.

O CES Optimal Polymer Selector lista apenas 600 materiais genéricos, mas acordos com CAMPUS e IDES permitem uma busca mais refinada conforme o processo evolui e o fato de haver uma filosofia de Seleção de Materiais por trás do software é um grande avanço, embora ainda esteja muito aquém das necessidades dos projetistas de hoje em dia.

O Omnexus Polymer Selector permite comparações diversas em forma de gráficos, mas induz o usuário a uma gama de materiais dos seus patrocinadores, o que exclui diversas possibilidades de materiais que podem ser melhores para uma dada aplicação, ou ainda mais baratos. O fato de disponibilizar bastante informação sobre algumas aplicações e de propriedades gerais é um atenuante.

Percebe-se que a grande maioria dos sistemas ainda é desenvolvida por especialistas para especialistas. Uma rara exceção talvez seja o MAS 2.0, já que este pode ser utilizado e customizado por não especialistas, além de ser um dos poucos desenvolvidos desde o início para seleção de processos. Dos seletores disponíveis comercialmente, o único que trata da problemática de seleção de processos é o CES, embora somente em um módulo separado do analisado anteriormente.

O Material Connexion é uma referência para o estilo “materioteca” dos sistemas. Este serviço pioneiro certamente mudou a maneira como os designers desejam trabalhar com SMPF, embora do ponto de vista dos engenheiros ainda esteja muito aquém de suas necessidades, por disponibilizar muito pouca informação técnica dos materiais em si e seu processamento.

O Matério é bastante utilizado por designers e como tal tende a ser mais utilizado como um explorador de informações, sem uma metodologia específica de SMPF. Destaca-se a sua usabilidade e o foco nas propriedades sensoriais dos materiais, algo que tipicamente não é explorado nos seletores utilizados por engenheiros.

O serviço Materioteca® tende a se estabelecer como um modelo para este tipo de serviço, dada a sua capacidade de reunir em um único ambiente as necessidades do desenho industrial e do projeto técnico. Seria interessante que este sistema pudesse se valer dos conceitos estabelecidos por Van Bezooen (2002) e que estão sendo utilizados no serviço Material Explorer.

Estes sistemas ainda estão aquém do potencial de público que podem atingir, já que existe uma necessidade enorme desse tipo de informações, e não só dados, por parte de engenheiros, projetistas, técnicos e designers, entre outros. O conceito de materiotecas tende a se desenvolver e, se realizado com método e com objetivos claros, pode se tornar um ponto de encontro entre as realidades do design e da engenharia, hoje tão distantes.

A Tabela 1 apresenta um comparativo dos principais sistemas informatizados para auxílio de seleção de materiais poliméricos utilizados na indústria.

Tabela 1: Análise de similares dos serviços disponíveis de bancos de dados informatizados para auxílio de seleção de materiais poliméricos mais utilizados na indústria.

Serviço	IDES Prospector	CAMPUS / Material Data Center	CES4 Optimal Polymer Selector	Matweb	AZoM
Provedor	IDES, Inc.	M-Base Engineering	Granta Design Ltd.	Automation Creations, Inc.	AZoM™.com Pty.Ltd
URL	www.ides.com	www.campusplastics.com	www.grantadesign.com	www.matweb.com	www.azom.com
Fundação	1986	1988	1994	1997	1999
Descrição	Maior banco de dados de datasheets, com mais de 60.000 produtos, boa usabilidade, muitas informações complementares, base para muitos seletores de fabricantes de resinas, muito utilizado na indústria.	Completo dentro de seus limites; As informações completas estão disponíveis sem custos.	Aplicação do modelo de Ashby com suas vantagens e desvantagens; Único software de SMPF verdadeiro; Com o sistema completo, permite comparações infinitas entre as diferentes classes de materiais, mas tem um custo bastante elevado	Por ser um sistema generalista, permite comparar plásticos com outros materiais; Em plásticos, é menor e menos poderoso que o IDES, mas com os mesmos problemas;	Banco de dados independente, embora impreciso. Fontes oficiais (fabricantes) não são aceitas; informações em artigos, o que dificulta busca.
Custo	<i>Datasheets</i> : livre. Comparações, auto specs, contratipos, e outros recursos avançados: entre US\$ 500 e US\$ 700 / ano	Campus: livre. MDC: US\$ 350 / ano	Não divulgado.	Busca de <i>datasheets</i> : livre; Recursos como comparações necessitam de registro; Recursos de comparações avançadas e de exportação de dados: US\$ 75 / ano.	Livre
Crítérios de busca	200+ possibilidades, simples ou complexas.	Ilimitado, mas depende de experiência do usuário.	Busca por propriedades ilimitada, incluindo possibilidades bastante complexas, dependente da definição de índices de mérito e podem exigir experiência do usuário.	Propriedades, tipo de resina, nome comercial, comparações até 10 materiais.	Propriedades (máx 2), aplicações, palavras chave e texto.
Vantagens	Maior quantidade de produtos, bastante informação, usabilidade, atualizado constantemente.	Todos os produtos testados com os mesmos padrões; Dados confiáveis, por serem testados independentemente; Sistema pago possibilita integração com softwares de elementos finitos.	Possui uma filosofia de SMPF integrada; Acordos com IDES e Campus permite acesso a um número grande de dados.	Parte livre bastante compreensiva, permitindo comparações com outras classes de materiais; Comparações gráficas são bastante úteis.	Qualquer pessoa pode contribuir com dados; É mantido vivo por uma comunidade de cientistas, sem fins lucrativos.
Desvantagens	Dados de <i>datasheets</i> fornecidos pelos fabricantes, e difíceis de comparar. Comparações complexas somente no sistema pago.	Poucos fabricantes e produtos disponíveis, embora sejam os mais conhecidos; Difícil usabilidade; Difícil comparar materiais de fabricantes diferentes.	Difícil usabilidade, particularmente por não engenheiros; O custo da licença, embora não informado, é bastante alto para usuários não acadêmicos, da ordem de milhares de dólares.	Necessário conhecimento sobre propriedades dos materiais; Dados de <i>datasheets</i> fornecidos pelos fabricantes, nem sempre completos.	Difícil usabilidade; informações imprecisas; difícil encontrar informações; deve-se ter cuidado com o uso das informações.

3.3 Proposta

A revisão da literatura e a análise de similares indicam a necessidade de uma modificação na metodologia de SMPF para materiais poliméricos, para que os processos de SMPF realmente ajudem no projeto de produtos industriais, já que as metodologias tradicionais não se adequam a realidade desta classe de materiais. O processo tradicional de projeto pode ser visto na Figura 40.

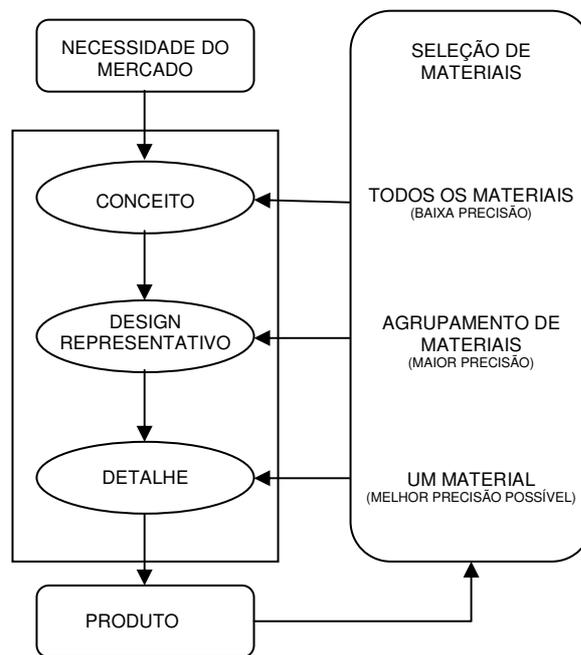


Figura 40: Esquema de um processo de SMPF e projeto tradicional (SAPUAN, 2001).

Para o caso específico de materiais termoplásticos, normalmente o primeiro passo é o de se escolher o processo de fabricação. Isto ocorre por diversos motivos, sendo os principais a disponibilidade de maquinário, a forma geral do objeto e o número total de peças a serem produzidos em um determinado período de tempo.

Os termoplásticos oferecem inúmeras possibilidades de desenho, e toda esta liberdade acaba por definir rapidamente o processo a ser utilizado, mesmo que o projeto ainda esteja em seu início.

O processo de fabricação pode ser escolhido rapidamente pelo método do questionário fechado. Em seguida, faz-se uma pré-seleção dos materiais juntamente com o processo inicial de se projetar o produto, utilizando-se para isso informações básicas sobre o processo escolhido e suas capacidades, além de informações básicas sobre os materiais advindos de uma materioteca ou de métodos de questionário aberto. Em um passo seguinte, faz-se o detalhamento do projeto concomitantemente com o refinamento da seleção do material mais adequado, por meio de sucessivas análises.

Para produtos onde é feita uma conversão de materiais (por exemplo, de metal para plástico), este processo é ligeiramente modificado para incluir uma etapa de análise anterior à seleção de processo, de modo a se redefinir o problema a ser estudado e os novos requisitos para o projeto. Um diagrama esquemático do processo proposto pode ser visto na Figura 41.

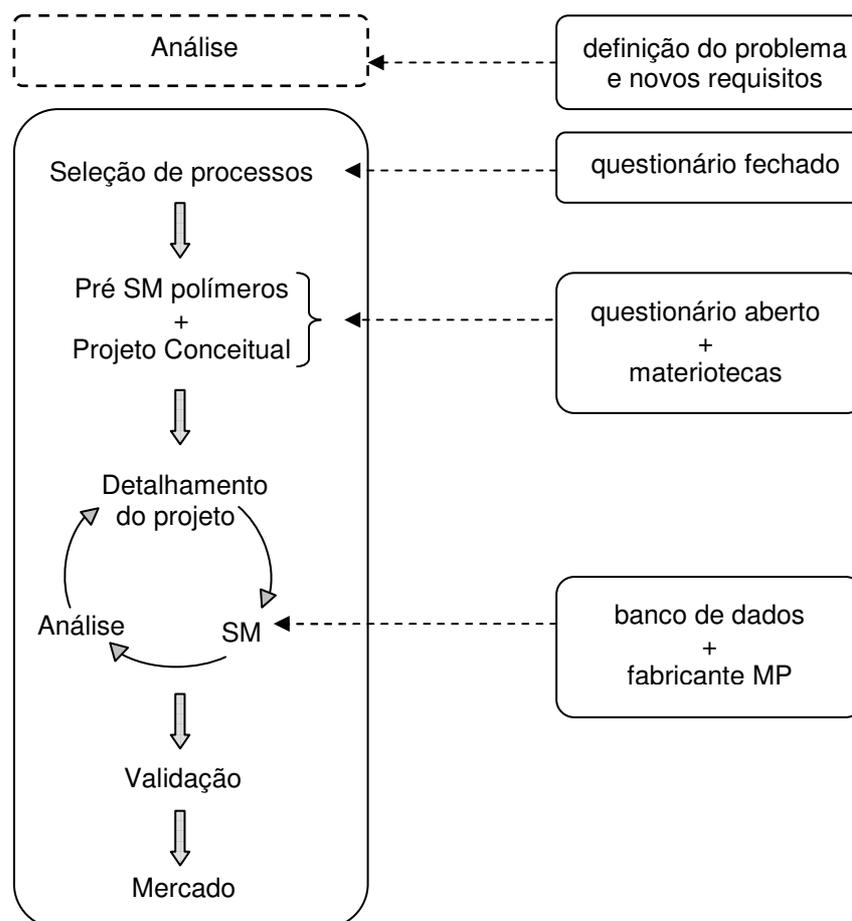


Figura 41: Diagrama esquemático para projeto de peças plásticas.

A análise de similares aponta para um sistema de biblioteca física de materiais ao estilo a Materioteca® , ligado a um banco de dados com uma poderosa ferramenta de busca (como por exemplo, o IDES), tendo os recursos de um programa como o CES e baseado em uma filosofia de seleção de materiais e processo de fabricação estabelecida de acordo com o modelo proposto. Um sistema como esse que estivesse disponível livremente pode vir a ser de grande utilidade para projetistas em geral, sejam eles engenheiros ou não, assim como poderia levar a um aumento na utilização de termoplásticos e o avanço da indústria nacional.

3.4 Sugestões

Este trabalho aponta a necessidade de que os projetistas (engenheiros ou não) adquiram um maior conhecimento sobre os materiais termoplásticos, suas propriedades e como elas são afetadas pelo ambiente a sua volta. Para isso, ainda faltam textos de apoio voltados a este público, assim como um maior desenvolvimento de metodologias de ensino de SMPF (hoje quase toda baseada nos preceitos de Ashby) tanto para engenheiros como, principalmente, para designers.

Uma maior integração entre as áreas de Engenharia de Materiais e Desenho Industrial, a exemplo do que já ocorre em outros países, certamente colaboraria bastante para que a necessidade apontada seja atendida mais rapidamente.

A análise de similares permite ainda apontar para um sistema híbrido de SMPF para projeto de produto como as Materiotecas, como sendo aquele que mais se aproxima das necessidades dos projetistas de peças plásticas. Embora as metodologias para implantação e uso destas ainda estejam em desenvolvimento, e maiores investigações sejam necessárias para se determinar o exato conceito a ser utilizado nas áreas destinadas aos materiais poliméricos, elas devem ser melhor desenvolvidas e popularizadas.

Finalmente, é necessário que as metodologias atuais de SMPF sejam adaptadas para que se aproximem da realidade industrial e que possam, ao mesmo tempo, levar um maior desenvolvimento tecnológico a estas indústrias. Neste sentido, sugerem-se investigações similares à deste trabalho para outras classes de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASHBY, M. F. **The engineering properties of materials**. Acta Metallurgica, v. 37, n. 5, pp. 1273 - 1293, 1989.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materials and design: the art and science of material selection in product design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 336p.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **The art of materials selection**. Materials Today, v. 6, n. 12, p. 24-35, 2003.

ASSUNÇÃO, R. B. **Eco-design e seleção de materiais para mobiliário urbano**. 2000. 224p. Dissertação (Mestrado), Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

AZoM™ THE A TO Z OF MATERIALS. **Global AZoSearch**. Disponível em: <http://www.azom.com> Acesso em 29 de Agosto de 2006.

BASF CORPORATION. **Design solutions guide**. Mount Olive: BASF, 2003. Disponível em: <http://www.basf.com/PLASTICSWEB/displayanyfile?id=0901a5e18000486d>. Acesso em: 14 abr. 2006.

BILLMEYER JR, F.W. **Textbook of polymer science**. 2th.ed. New York: John Wiley, 1971. 598p.

BLASS, A. **Processamento de polímeros**. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1988. 313p.

BRASÍLIA. Congresso Nacional. **Comissão parlamentar mista de inquérito sobre as causas e dimensões do atraso tecnológico**: relatório final. Brasília: Centro Gráfico do Senado Federal, 1992.

BRECHET, Y; BASSETTI, D.; LANDRU, D.; SALVO, L. **Challenges in materials and process selection** Progress in Materials Science, New York, v. 46, n. 3-4, p. 407-428, 2001.

BROWN, S. M. **A multimedia manufacturing analysis service**. 1997. 187p. Dissertação (MS Thesis) - Mechanical Engineering. University of Califórnia at Berkeley, Berkeley, 1997.

BROWN, S. M.; WRIGHT, PAUL K. **A progress report on the manufacturing analysis service, an internet-based reference tool**. Journal of Manufacturing Systems, Dearborn, v. 17, n. 5, p. 389-398, 1998.

BRYDSON, J. A. **Plastic materials**. 3rd Ed. London: Newsnes-Butterworths 1975. 731p.

CALLISTER Jr.,W.D. **Materials science and engineering**. 3rd ed New York: John Wiley, 1994. 811p.

CAMPUS, THE PLASTICS DATABASE. **Campus Local**, disponível em: <http://www.campusplastics.com/access/webupdate.php> Acesso em 29 de Agosto de 2006.

CHARLES, J. A.; CRANE, F. A. A.; FURNESS, J. A. G. **Selection and use of engineering materials**. 2nd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1989. 336p.

CHARLES, J. A.; CRANE, F. A. A.; FURNESS, J. A. G. **Selection and use of engineering materials**. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 352p.

COHEN, M. (Ed.) **Ciência e engenharia de materiais: sua evolução, prática e perspectivas**. Tradução de J. R. G. da Silva. 3.ed. São Carlos: UFSCar, 1985. 2v.

DENG, Y.-M.; EDWARDS, K. L. **The role of materials identification and selection in engineering design**. Materials & Design, Oxford, v. 28, n.1, p131-139, 2007.

DESAI, K. C. **Optimizing total cost of molded underhood parts using high performance engineering polymers (HPEP)**. In: Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, 13., São Paulo, 2004. Technical papers. São Paulo: SAE Brasil, 2004. Trab. 2001-01-3425. (SAE Technical Papers Series).

EDWARDS, K. L. **Selection materials for optimum use in engineering components**. Materials & Design, Oxford, v. 26, n. 6, p. 469-473, 2005.

EVBUOMWAN, N. F. O.; SIVALOGANATHAN, S.; JEBB, A. **Concurrent materials and manufacturing process selection in design function deployment.**

Concurrent Engineering: research and applications, London, v. 3, p135-144, 1995.

FERRANTE, M. **Seleção de materiais.** São Carlos: UFSCar, 1996. 326p.

FERRANTE, M; SANTOS, S. F.; CASTRO, J. F. R. **Materials selection as an interdisciplinary technical activity: basic methodology and case studies.** Materials Research, São Carlos, v. 3, n. 2, p 1-9, 2000.

GE PLASTICS. **Lexan® PC Resin Product Brochure.** Disponível em: http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/6217_12.pdf Acesso em 29 de Agosto de 2006.

GRANTA MATERIAL INTELLIGENCE. **CES Materials and process selectors.** Disponível em <http://www.grantadesign.com/products/ces/components/selectorprodoverview.htm>. Acesso em: 15 fev.de 2006.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projeto e princípios básicos.** São Paulo: Artliber, 2005. 308p.

HAYDEN, W.; MOFFATT, W.G.; WULFF, J. **Mechanical behaviour.** New York: John Wiley, 1965 247 p. (Structure and Properties of Materials, v. 3)

IDES. **Pocket Performance Specs for Thermoplastics.** 3rd ed. Denver: IDES, Inc., and Canon Communications LLC, 2003. 991p.

IDES. **Prospector Plastics Search Engine.** Disponível em: <http://www.ides.com> Acesso em 25 de Julho de 2006.

IDES. **Overview.** Disponível em: <http://www.ides.com/about/overview.asp> Acesso em 25 de Julho de 2006.

IDES. **Plastics Customers.** Disponível em : <http://www.ides.com/customers/default.asp> Acesso em 25 de Julho de 2006.

KELLEY, T; LITTMAN, J. **A arte da inovação.** São Paulo: Futura, 2001. 341p.

KMETZ, M. **Resin spec check: more materials, more choices – which one is right?** Injection Molding Magazine: article archive, Jan 2006. article n. 2757. Disponível em: http://www.immnet.com/article_printable.html?article=2757 Acesso em 25 de Julho de 2006.

LJUNBERG, L.Y.; EDWARDS, K. L. **Design, materials selection and marketing of successful products.** Materials & Design, Oxford, v. 24, n. 7, p. 519-529, 2003.

LOVATT, A. M.; SHERCLIFF, H. R. **Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection.** Materials & Design, Oxford, v. 19, n. 5, p. 205-215, 1998.

MANO, E. B. **Introdução a polímeros.** São Paulo: Edgard Blucher, 1985. 111p.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 197p.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos.** São Paulo: Artliber, 2005. 431p.

MANZINI, E. **The material of invention.** Cambridge: MIT Press, 1989. 255p

MARGOLIS, J. M. **Engineering thermoplastics.** 10th ed. New York: Marcel Dekker, 1995. 408p. (Plastics engineering series, v.8)

MAS 2.0 **Manufacturing Advisory Service.** University of Berkeley, Ca USA. Disponível em <http://bmi.berkeley.edu/Me221/mas2/html/applet/index.html> Acesso em: 11 dez. 2006.

MATERIAL CONEXION. **Library Access** Disponível em: <http://www.materialconnexion.com> Acesso em 29 de Agosto de 2006.

MATWEB. **Advanced Search.** Disponível em: <http://www.matweb.com/search/SearchSeq.asp> Acesso em 29 de Agosto de 2006.

MIODOWNIK, M. **Facts not opinions?** Nature Materials, London, v. 4, p. 506-508, Jul. 2005.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (U.S.). Committee on the Survey of Materials Science and Engineering. **Materials and man's needs**. Tradução de Morris Raphael Cohen. Washington: National Academy of Sciences, 1975. 217p.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (U.S.). Committee on the Survey of Materials Science and Engineering. **Materials and man's needs**. Washington: National Academy of Sciences, 1974. 218p.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (U.S.). Committee on the Survey of Materials Science and Engineering. **Materials and man's needs: the history, scope and nature of material science and engineering**. Washington: National Academy of Sciences, 1975. v.1.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (U.S.). Committee on the Survey of Materials Science and Engineering. **Materials and man's needs: the needs, priorities and opportunities for materials research**. Washington: National Academy of Sciences, 1975. v.2.

NEILLEY, R. **Materials: taking the pulse: the speed you need: computer-based material selection**. Injection Molding Magazine: article archive, Aug 2004, article n. 2442. Disponível em: http://www.immnet.com/article_printable.html?article=2442 Acesso em 25 de Julho de 2006.

NIELSEN, L. E. **Mechanical Properties of Polymers and Composites**. New York: Marcel Dekker, 1993. 580p.

OGORKIEWICZ, R. M. **Thermoplastics: properties and design**. London: John Wiley, 1974. 260p.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. 2nd. Ed. London: Springer, 1996. 544p.

REIS, A. A. **Matéria, forma e função: a influência material no design industrial**. 2003. 335p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SANNER, W.; NUYTENS, A. **Replacing metals**. Kunststoffe, München, v. 88, n. 8, p 1160-1164, 1998.

SANT'ANNA, J.A.P.; WIEBECK, H. **Conversão de peças de metal para plástico: o desafio da seleção de polímeros, tendências e exemplos.** In: FEIRA E CONGRESSO PLASTSHOW 2006, 2006, São Paulo. Anais. São Paulo: Aranda Eventos, 2006. CD-ROM.

SANT'ANNA, J.A.P.; WIEBECK, H. **Ferramentas para seleção de materiais poliméricos buscando substituir materiais metálicos.** In: 17 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais.** Foz do Iguaçu:, UFSCar, 2006. Trab. 414-006.

SANTOS, S. F.; FERRANTE, M. **Selection methodologies of materials and manufacturing processes.** Materials Research, São Carlos, v. 6, n. 4, p. 487-492, 2003.

SAPUAN, S. M. **A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design.** Materials & Design, Oxford, v. 22, n. 8, p.687-695, 2001.

SELF-REINFORCED POLYPHENYLENE **Ablative properties vídeo.** Disponível em <http://www.omnexus.com/tc/srp/index.aspx?id=Flame%20Retardancy> Acesso em 19 de Fevereiro de 2007.

SILVA, J. R. G. A ciência e engenharia de materiais. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 93-99 1986.

SILVA, J. R. G. **Materiais: ciência e tecnologia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 38., 1994, Blumenau. Anais. São Paulo: ABC, 1994. v. 1.

SMITH, W. F. **Principles of Materials Science and Engineering.** 3rd Ed. New York: McGraw Hill, 1995. 892p. (McGraw Hill Series in Material Science and Engineering).

SOLVAY ADVANCED POLYMERS. **Amodel® polyphthalamide design guide.** Disponível em: http://www.solvayadvancedpolymers.com/static/wma/pdf/6/5/1/AMODEL_Design_Guide.pdf. Acesso em: 11 abr. 2006.

TOMASI, R.; BOTTA, W. **Uma proposta para reformulação do currículo do curso de graduação em engenharia de Materiais.** In: SEMINÁRIO SOBRE ENSINO DE METALURGIA E MATERIAIS, 1991, São Paulo: Anais. ABM, 1991.

VAN BEZOOYEN, A. **Material explorer: material selection support tool for designers.** 2002. 55p. Bachelors Thesis (Trabalho de Graduação), Faculty of Industrial Design Engineering. Delft University of Technology, Delft, 2002.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais.** Rio de Janeiro: Campus, 1984. 567p.

WALTER, Y. **O conteúdo da forma:** subsídios para seleção de materiais e design. 2006. 94p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" de Bauru, Bauru, 2006.

WALTER, Y.; MARAR, J. F.; FERRANTE, M.; ALENCAR, F.; FERRAZ, G. B. **Materiotecas: diretrizes de projeto para uma ferramenta de informação e inspiração.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESIGN DA INFORMAÇÃO, 2., 2005, São Paulo. Anais. São Paulo: SBDI, 2005. v. 1, p. 1-10.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia: processamento e aplicações.** São Paulo: Artliber, 2005. 349p.

APÊNDICE A – Propriedades dos materiais poliméricos termoplásticos

Uma breve discussão sobre as propriedades dos materiais poliméricos termoplásticos apresentados em folhas técnica de dados.

Densidade ou Massa Específica

Este é um dos poucos casos em que um único número pode descrever adequadamente uma propriedade, sendo a razão entre massa por unidade de volume, medida a 23°C, e comumente expressa em g/cm^3 . Embora ela certamente varie com a temperatura, o efeito desta não é importante até que o material já esteja amolecido ou fundido. Um material menos denso leva a peças mais leves, o que pode ser importante em certas indústrias como a automotiva ou aeroespacial, onde a economia de peso se traduz diretamente em economia de combustível.

Mais importante que isso, porém, é que um quilo de um material menos denso produz mais peças que um quilo de um material mais denso. Este é um fator muito importante para ser levado em consideração, uma vez que em geral as matérias-primas são compradas por peso e vendidas por unidade (peças, por exemplo). Assim, é importante analisar o custo por volume de um material e não o custo por quilo, algo que nem sempre é levado em consideração.

A densidade reflete a estrutura química e a organização molecular de um material polimérico e regiões cristalinas de um material são mais densas que as amorfas. A maioria dos plásticos comerciais apresenta densidades entre 0,9 e 1,4 g/cm^3 , e alguns, devidos a presença de halogênios, apresentam densidades por volta de 2,3 g/cm^3 . Materiais com densidades menores que 0,9 são normalmente celulares, com significativo volume de poros. O uso de aditivos nos plásticos comerciais também faz com que a densidade apresentada nas folhas técnicas de dados seja uma característica de cada tipo (*grade*) de material

No caso de esta propriedade ser utilizada como parâmetro de controle de qualidade, vale lembrar que a densidade de um material polimérico varia em função de sua cristalinidade (empacotamento dos átomos) e também pode variar com a perda de aditivos (plastificantes, por exemplo) ou absorção de solventes.

Para sua determinação são comumente utilizados os métodos ASTM D 792 ou ASTM D 1895 ou ainda ISO 1183.

Índice de Fluidez (MFI ou Melt Flow Index)

O número que consta das folhas de dados é determinado por um teste específico (ASTM ou ISO, ver adiante) que expressa a fluidez do material sob determinadas condições. Normalmente é expressa em g/10 min, refletindo o quanto de material escoar por uma determinada passagem sob a ação de uma força no tempo de 10 minutos. Por utilizar uma força constante, é um teste que ocorre a uma força de cisalhamento constante e não a uma taxa de cisalhamento constante. Assim, tem pouca semelhança com os processos usuais de moldagem de plásticos, e é bastante sensível a pequenas variações de massa molar.

Justamente por isso, muitos fabricantes utilizam o MFI como uma especificação para diferenciar tipos de um mesmo material, valendo-se de uma correlação com a massa molar média e para monitorar a uniformidade do material lote a lote ou até dentro de um mesmo lote. Tipos com maior massa molar média apresentam menor MFI. Quanto mais alta a massa molar média (para um mesmo material), tipicamente melhores as propriedades e maior a resistência ao fluxo.

Materiais commodities como, por exemplo, PE, PP e PS se baseiam fortemente neste fator. Alguns materiais de engenharia como PC também. Nestes casos, tipos com menores MFI são considerados de melhores propriedades enquanto que materiais com maior MFI têm suas propriedades reduzidas em favor de um melhor processamento, especialmente para artigos com paredes menos espessas.

O significado do teste de MFI é historicamente mal interpretado por um grande segmento da indústria. Muitos processadores colocam uma ênfase desproporcional nos resultados de MFI por acreditarem que ele reflete corretamente as diferenças em processabilidade. É certamente correto afirmar que para um dado conjunto de parâmetros de processo um PP com um MFI de 20 g/10 min vai fluir mais e preencher uma cavidade de geometria determinada com pressões menores que um PP com MFI de 4 g/10min.

Mas a diferença de fluxo não é de cinco vezes como os números podem sugerir – a pressão não vai cair cinco vezes, ou o material não vai fluir cinco vezes mais. Isso pode ser explicado pelo fato de que o teste de MFI é conduzido a taxas de cisalhamento muito baixas quando comparados a realidade dos processos de fabricação típicos. A taxas de cisalhamento maiores, a viscosidade medida é não só sensivelmente menor, mas também diminui cada vez mais rápido, em um fenômeno conhecido como *shear thinning*, e tem maior efeito quanto maior a massa molar de um polímero. A taxas de cisalhamento típicas de processos de injeção, a diferença de viscosidade entre os dois tipos citados anteriormente é de somente 40%, e não 400% como se poderia imaginar pelos números de MFI.

Vale lembrar ainda que mesmo que tipos dentro de uma mesma família apresentem comportamentos similares, o comportamento da viscosidade entre diferentes famílias pode ser bastante diferente, já que o cisalhamento afeta de maneira diferente as diferentes estruturas moleculares. Assim não se deve esperar que um PP e um PS tenham o mesmo comportamento no processo só porque eles têm o mesmo MFI, por exemplo. Além disso, as diferenças de densidade do fundido fazem com que um mesmo volume de PS tenha massa cerca de 15% maior, o que leva a que mesmo que os dois materiais apresentem o mesmo comportamento reológico, e mesmo MFI, o PP terá menor viscosidade, já que é preciso uma maior quantidade de PP para produzir o mesmo número de MFI de um PS.

Um último item que merece atenção quando se compara a fluidez de materiais diferentes são as condições de teste. Muitas vezes mesmo para uma mesma família de materiais, há diversas condições que podem ser utilizadas, e isto pode variar de acordo com o fabricante. Um mesmo ABS pode ser testado de acordo com a ASTM nas condições G, V, AL, ou I, por exemplo, o que correspondem as condições seguintes: 200 °C /5 kg, 210 °C /2,16 kg, 220 °C /10 kg ou 230 °C /3,8 kg.

Os métodos mais comuns para este tipo ensaio são o ASTM 1238 (Melt Flow Index), com resultados em g/10 min e ISO 1133 (Melt Volume-Flow Rate), com resultados em cm³/10 min.

Módulo de Flexão

Por definição, o módulo é a razão entre tensão e deformação produzida por esta em um material. Nos estágios iniciais de uma curva tensão versus deformação, esta relação é linear e o módulo é representado pela inclinação desta reta. Para materiais homogêneos, os valores em flexão, compressão ou tensão são muito parecidos (SOLVAY ADVANCED POLYMERS, 2003).

Para materiais poliméricos termoplásticos, o módulo em flexão varia inversamente com a variação de temperatura e, mesmo que cada material apresente a sua própria curva de módulo versus temperatura, normalmente o formato da curva depende se o polímero base de um produto é amorfo ou semi-cristalino (NIELSEN, 1993). Um exemplo das curvas de Módulo versus Temperatura pode ser visto na Figura 42.

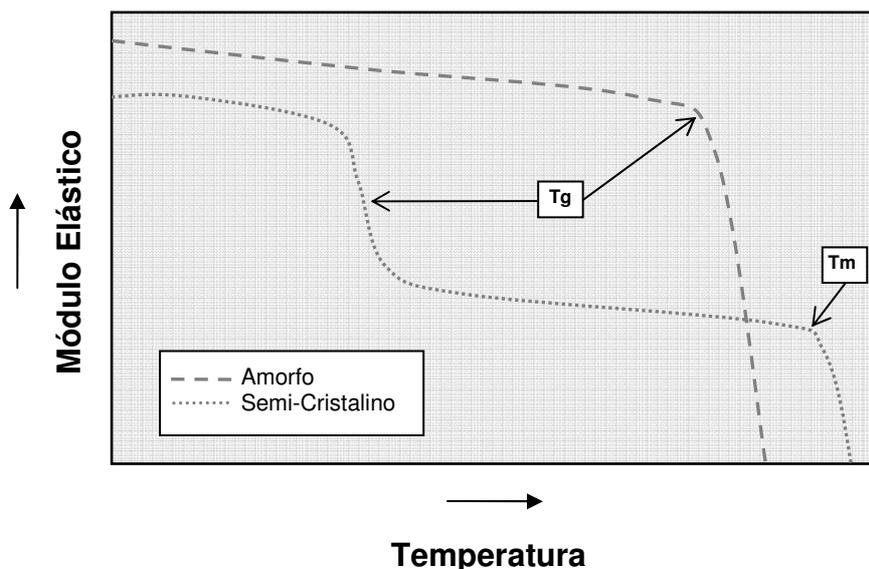


Figura 42: Módulo de Young versus Temperatura para polímeros amorfos e semicristalinos. Fonte: Solvay Advanced Polymers, LLC.

No caso de polímeros amorfos, eles são caracterizados por apresentarem um módulo relativamente constante por uma ampla faixa de temperaturas, até que esta atinja um ponto em que o material comece a amolecer e os valores de módulo caem drasticamente em uma faixa estreita de temperaturas.

Após este amolecimento, um material amorfo perde cerca de 99% de sua rigidez original e não tem mais utilização prática. A estreita faixa de temperatura onde há queda acentuada de módulo é conhecida como temperatura de transição vítrea.

Para polímeros amorfos carregados (com fibra de vidro, por exemplo), o comportamento geral é basicamente o mesmo, mas com algumas pequenas diferenças. A primeira delas é que o módulo é sensivelmente maior. Enquanto que um PC sem carga tem um módulo de 2,2 – 2,4 GPa, o mesmo PC com 20% de fibra de vidro (PC+20 %FV) tem 5,5 GPa e com 40% (PC+40%FV) este valor é de 9,7 GPa. A segunda é que a queda em módulo anterior a T_g é sensivelmente menor, ou seja, a presença de FV não muda a T_g , mas faz com que ele permaneça mais rígido por mais tempo. (Ver descrição sobre HDT/DTUL).

No caso de polímeros semi-cristalinos, estes consistem de pequenos domínios cristalinos distribuídos em uma matriz de material amorfo. As regiões amorfas continuam a apresentar a T_g , mas como as regiões cristalinas ainda estão rígidas, a T_g não amolece completamente o polímero.

Desta maneira, há uma perda substancial de módulo, mas um novo platô intermediário é criado e mantido até que seja atingida a temperatura de fusão cristalina T_m , quando toda a rigidez do material se perde. Assim a principal diferença no formato da curva é que enquanto os materiais amorfos perdem toda a sua rigidez de uma só vez (próximo a T_g) os semi-cristalinos a perdem em duas etapas (próximo a T_g e T_m).

Um bom exemplo de material semi-cristalino é a Poliftalamida, ou PPA. Um polímero base comum é o Amodel A-1000, que tem módulo de flexão a 23°C de 1,7 GPa. Este valor cai muito pouco até que a T_g deste material (123°C) seja atingida. Entre 120 e 160°C este material perde cerca de 85%¹⁹ do valor de seu módulo a 23°C e um novo platô de valor de módulo é estabelecido a 0,21 GPa. Do final da região de transição vítrea até a T_m , este valor cai linearmente até aproximadamente 0,075 GPa, quando então a fusão ocorre a cerca de 313°C.

Como praticamente todos os materiais semi-cristalinos não carregados seguem este mesmo padrão, uma vez conhecido o módulo a temperatura ambiente (23°C), e suas temperaturas de transição vítrea e de fusão cristalina pode-se ter uma boa idéia da curva em si.

¹⁹ Há menor perda de módulo quanto maior a cristalinidade total de um polímero. Por isso é tão importante que materiais semi-cristalinos sejam corretamente processados e cristalizados, já que suas propriedades a altas temperaturas serão significativamente afetadas.

Ao se adicionar uma carga ou reforço, o modelo da curva permanece o mesmo. Como no caso de materiais amorfos, a presença de reforços não altera T_g ou T_m , mas deixa o material mais rígido tanto abaixo quanto acima da T_g . Ainda no exemplo do PPA, o Amodel A-1133HS com 33% de FV, tem um módulo a 23°C de 13,4 GPa (1940 Kpsi), que se mantém praticamente constante até os 123°C (T_g). Ele novamente apresenta uma região de transição entre 120 e 160°C com uma queda acentuada do módulo e um novo platô com queda gradual até a temperatura de fusão cristalina.

A grande diferença está no fato de que ao final da transição vítrea o material perdeu apenas 60% do valor do seu módulo a 23°C, ao invés dos 85% do material sem reforço. Este comportamento pode ser esperado de todos os materiais semi-cristalinos reforçados com T_g acima da temperatura ambiente.

Comercialmente, existem muito mais tipos (*grades*) reforçados de materiais semi-cristalinos do que amorfos. Isto se deve ao fato de que independentemente da quantidade e do tipo de reforço, o material amorfo perde suas propriedades de carregamento quando acima da T_g . Abaixo desta temperatura o reforço não é significativo quando comparado com aquele alcançado nos semi-cristalinos.

Já no caso de materiais semi-cristalinos, as vantagens podem ser sentidas tanto abaixo quanto principalmente acima da T_g , mantendo estes materiais com propriedades utilizáveis a temperaturas relativamente altas como é o caso por exemplo do PPA + 33%FV (AMODEL A-1133HS), que tem T_g de 123°C mas ainda é utilizável a temperaturas de até 285°C (dependente do desenho da peça), graças ao reforço.

Para materiais semi-cristalinos com T_g menor que a temperatura ambiente (23°C), como por exemplo PP, PE e POM, o mesmo princípio também é válido, mas deve-se levar em conta o fato de que a esta temperatura o polímero já está no platô pós- T_g , o que faz com que só haja um longo declínio no valor de módulo até a temperatura de fusão cristalina. No entanto, quando se analisa um gráfico, incluindo aí as temperaturas abaixo de T_g , tem-se o mesmo tipo de gráfico já apresentado.

Deste modo, pode-se deduzir uma grande quantidade de informações a partir de alguns poucos dados como, por exemplo, o módulo (sempre presente nas fichas técnicas) e das temperaturas de transição T_g e T_m . Infelizmente, nem sempre estes valores estão disponíveis nas fichas técnicas, mas existe um outro dado sempre presente e que pode ser muito útil para um melhor conhecimento do comportamento de um polímero a altas temperaturas, a temperatura de deflexão térmica (HDT ou DTUL).

Os métodos ASTM D638 e ISO 527 são os mais utilizados para determinação do módulo elástico.

Temperatura de deflexão térmica (HDT OU DTUL)

Para melhor entender a relação entre este teste e as temperaturas de transição vítrea e fusão é importante entender o que realmente este teste avalia. A medição é realizada como em um teste de deformação em três pontos, com uma carga sendo aplicada no centro do corpo-de-prova de modo a gerar uma tensão constante enquanto a temperatura é elevada. Quando uma deformação específica é atingida, a temperatura máxima é anotada. Assim, o HDT representa a temperatura a que uma carga determinada produz uma deformação determinada em flexão ou ainda a temperatura a que o material atinge determinado módulo de flexão.

Especificamente, as duas condições padrão para teste são com tensões de 66 e 264 psi, o se reflete em um módulo de flexão associado a cada uma das condições de 29 e 116 Kpsi respectivamente.

Como é sabido (Cf. seção anterior sobre Módulo Elástico) que para um material amorfo os valores de módulo diminuem muito pouco entre a temperatura ambiente (23 °C) e sua transição vítrea, e que acima desta, estes materiais perdem mais de 99% do valor de módulo a temperatura ambiente (23 °C), pode-se inferir que o valor de T_g de um polímero amorfo é alguns poucos graus (6 – 15 °C) acima da temperatura de deflexão térmica, sendo que para polímeros amorfos carregados esta diferença é ainda menor. O efeito da adição de 30% de fibra de vidro em alguns termoplásticos amorfos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Efeito da adição de 30% de fibra de vidro na temperatura de deflexão térmica em alguns termoplásticos amorfos.

Material	HDT sem fibra (°C)	HDT com 30% FV (°C)	T_g (°C)
PC	129	132	135
PSU	174	181	185
PPSU	207	214	220

Como é de se esperar, o caso dos materiais semi-cristalinos é um pouco diferente e a presença de cargas afeta fortemente as análises. Para os semi-cristalinos sem carga que apresentam T_g acima da temperatura ambiente (23°C), uma pesquisa atenta revela que o módulo de flexão a temperatura ambiente (23°C) para praticamente todos estes materiais fica entre 2 e 3 GPa.

De acordo com a generalização, após T_g esses valores devem cair cerca de 80% e estar entre 0,4 e 0,6 GPa, ou seja, estarão abaixo do módulo associado ao HDT a 264 psi e a T_g deveria estar a uma temperatura muito próxima a este HDT para materiais semi-cristalinos sem reforço.

Um bom exemplo disso é o PBT (Celanex 1300A) onde a T_g é de 60°C e o HDT a 264 psi é 54,4°C (IDES, 2006a). No caso de uma Poliftalamida sem reforço (Amodel A-1001L), a T_g deste material é de 127°C e seu HDT a 264 psi é 120°C (IDES, 2006a). Esta proximidade de valores se deve a proximidade entre a curva contínua de módulo de flexão versus temperatura - obtida por um ensaio de DMA²⁰ – e os pontos obtidos nos ensaios de HDT.

A temperatura de fusão cristalina também pode ser estimada pela análise do comportamento dos materiais carregados. Neste caso, T_m pode ser estimada como sendo alguns poucos graus acima da HDT a 66 psi. Se este valor não estiver disponível, pode-se também utilizar o valor a 264 psi, embora este esteja um pouco mais longe da T_m. Novamente, quanto maior o reforço, menor a diferença entre as temperaturas de HDT a 66 e 264 psi e entre essas e a T_m.

²⁰ Dynamic Mechanical Analysis – Análise Dinâmico-Mecânica, um tipo de análise térmica muito utilizada no estudo de materiais poliméricos.

Deste modo, demonstra-se como um pouco de conhecimento de estrutura e propriedades dos polímeros e uma análise cuidadosa dos dados de módulo de flexão e HDT, podem dar uma boa idéia de como um material pode reagir a uma larga faixa de temperaturas para as quais quase não se tem informação direta. Ainda assim, alguns materiais, particularmente as blendas poliméricas, aparentemente violam estas generalizações já que o comportamento destes é muito mais complexo e muitos fabricantes não explicam exatamente a composição de suas blendas.

Esta propriedade é normalmente determinada seguindo as normas ASTM D 648 ou ISO 75.

Tensão e deformação

Como discutido anteriormente, a curva tensão versus deformação é uma das ferramentas mais importantes com relação as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos. O trecho inicial é em geral caracterizado por uma linha reta e é conhecida como região elástica, onde qualquer esforço é acompanhado por uma deformação proporcional e reversível. Gradualmente esta relação deixa de ser linear quando entram em ação os mecanismos de deformação plástica. Assim, menores esforços são necessários para uma mesma deformação.

A partir desse ponto os materiais podem reagir de duas maneiras distintas. Eles podem romper abruptamente (comportamento frágil) a uma tensão chamada tensão de ruptura, como por exemplo, no caso dos plásticos com altos teores de fibra de vidro. Eles também podem continuar se deformando até o ponto onde nenhum esforço adicional é necessário para continuar a deformação, conhecido como tensão de escoamento. Vale notar que o material pode continuar se deformando bastante antes que uma ruptura venha a ocorrer e esta deformação pode ser entendida como uma medida relativa da ductilidade ou resistência ao impacto deste material.

A tensão que consta das folhas de dados pode ser tanto a de escoamento quanto a de quebra. Materiais dúcteis também apresentam tensão e alongação de ruptura, mas tipicamente este valor não é informado, embora seja importante lembrar disso quando se compara materiais distintos.

Estes valores limites (tensão de escoamento ou de ruptura) variam com a temperatura e, com isso, um termoplástico que a 23°C apresenta um comportamento frágil vai se tornar mais dúctil com o aumento de temperatura e, ao mesmo tempo em que há uma diminuição na tensão de ruptura (ou de escoamento), a deformação para atingir este ponto é cada vez maior.

O comportamento da tensão de ruptura (ou de escoamento) com a temperatura é menos previsível que o módulo (NIELSEN, 1993). Este comportamento é praticamente linear, independente se o polímero é amorfo ou semicristalino, reforçado ou não, mas é muito difícil prever a inclinação desta reta simplesmente com base na estrutura do polímero. Neste caso, alguns fabricantes fornecem as curvas deste comportamento para seus materiais, embora esta não seja uma regra geral.

Na Figura 43 pode ser observado o comportamento da resistência à tração de um polímero carregado (PPA com 45% de fibra de vidro), com a diminuição da resistência a tração e o correspondente aumento da elongação com o aumento da temperatura.

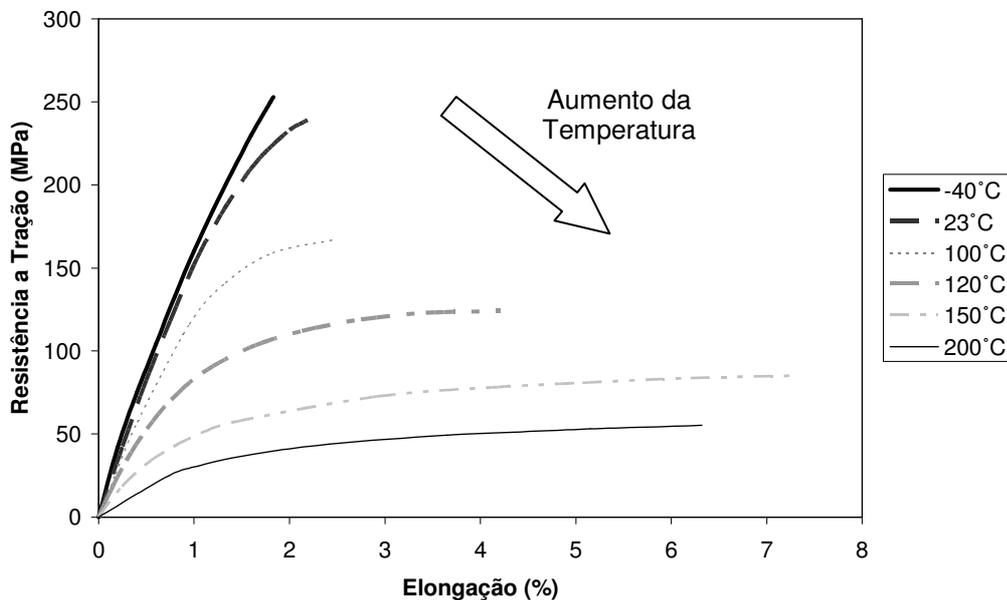


Figura 43 Comportamento da tensão e deformação de um termoplástico carregado (Amodel AS-1145 HS da Solvay Advanced Polymers, LLC). Fonte de dados: CAMPUS 2006.

Da mesma forma que para os valores de módulo, é normalmente determinada seguindo as normas ASTM D638 ou ISO 527.

Elongação

Como citado anteriormente, o alongamento é um bom indicativo da ductilidade de um polímero e altos níveis de alongamento indicam boa capacidade de absorver energia.

Uma modificação na composição que aumente a ductilidade leva ao aumento nos valores de alongamento na ruptura, assim como um aumento na rigidez leva a uma diminuição neste alongamento. Um bom exemplo é o PA 6, onde um tipo de uso geral apresenta ruptura entre 25 e 50% de alongamento, enquanto que um tipo modificado ao impacto apresenta ruptura entre 200 e 250% e um reforçado com fibra de vidro entre 1 e 3,5% dependentemente dos níveis de modificação.

O alongamento aumenta com o aumento da temperatura (NIELSEN, 1993), e isto ocorre mais rapidamente se este aumento de temperatura passar pela transição vítrea de um polímero, o que pode ocorrer para os polímeros semicristalinos. Para polímeros amorfos, pode-se esperar um aumento gradual no alongamento com a elevação da temperatura, em uma razão inversamente proporcional a queda nos valores de módulo em flexão.

É geralmente determinada seguindo as normas ASTM D 638 e ISO 527.

Impacto IZOD com entalhe

O teste de impacto IZOD foi adotado pela indústria de plásticos tal qual como utilizado pela indústria de metais em uma época em que pouco se conhecia sobre o comportamento em impacto dos materiais poliméricos. O conhecimento atual sobre este tema provavelmente levaria a outra solução, mas o fato é que este teste se tornou bastante comum e enraizado na indústria do plástico. Ainda assim, pode-se utilizar melhor os dados deste teste quando se entende melhor o que ele realmente mede.

Os corpos de prova utilizados neste teste apresentam um entalhe proposital com um raio de 0,01 polegadas (0,25 mm). Praticamente todos os materiais poliméricos são sensíveis ao entalhe, mas para alguns materiais como o PC o raio crítico é menor que este valor e, portanto, este material apresenta resultados bastante expressivos neste ensaio.

Para o PA 6, por exemplo, o raio crítico está acima daquele do corpo-de-prova e os resultados relativos a este material neste teste são relativamente baixos. Assim, o teste não é realmente um teste de impacto representativo, já que não compara todos os polímeros acima ou abaixo do seu raio crítico.

Embora nos manuais de design em plástico²¹ a utilização de raios mínimos em todos os “cantos” seja recomendada, muitas vezes a construção do molde ou o uso do produto (quando sujeito a impactos, por exemplo) pode levar ao aparecimento de entalhes ou cantos vivos e a susceptibilidade ao entalhe pode ser um fator decisivo entre a falha ou o sucesso de uma peça.

Como outras propriedades, a resistência ao impacto também é afetada pela temperatura e, neste caso é diretamente proporcional a esta. Um fenômeno bastante conhecido nos metais, também se faz presente. É a transição frágil-dúctil, que ocorre normalmente em uma faixa estreita de temperaturas e está associada a posicionamento da T_g em relação à temperatura do teste.

Deve-se atentar a este fato, uma vez que materiais que se saem muito bem nos testes IZOD a 23 °C podem apresentar valores muito menores se a temperatura estiver apenas um pouco mais baixa. Este é o caso do PC sem reforço, por exemplo, que apresenta uma queda de mais de 90% nos valores desta propriedade em uma faixa estreita (até 8 °C) que é dependente da massa molar do polímero.

No caso de materiais semicristalinos reforçados, principalmente quando o polímero base é frágil, existem algumas diferenças que devem ser analisadas mais atentamente. Em alguns casos a resistência ao impacto cai linearmente com a temperatura até certo ponto, quando então ela volta a subir. E aí aparece uma limitação dos testes de impacto tradicionais.

Estes testes medem a energia total para a fratura, que é uma combinação da energia para iniciá-la e da energia para propagar a trinca até a ruptura total do corpo-de-prova. A primeira é bastante dependente da rigidez do material, enquanto que a segunda é uma medida da ductilidade do mesmo.

Assim, um material bastante rígido pode apresentar altos valores neste teste, mesmo sendo muito pouco dúctil, ou seja, um material frágil. Isto é ainda mais influenciado pelo formato do corpo-de-prova e da localização do entalhe, que maximiza a orientação dos reforços perpendicularmente ao entalhe.

²¹ Por exemplo, Solvay Advanced Polymers (2003), BASF (2004), GE Plastics (2006), Ogorkiewicz, (1974), entre outros.

Logo, materiais semicristalinos reforçados com fibra de vidro, por exemplo, apresentam valores que são artificialmente superiores ao que se poderia esperar e não se deve considerar os testes de impacto como uma medida pura de ductilidade. Este efeito é ainda mais exagerado com o uso de fibras longas, versus a tradicional fibra curta.

No caso de materiais amorfos, a adição de reforços reduz sua ductilidade, e isso pode ser exemplificado pelo PC que quando reforçado com FV tem seus valores de impacto IZOD reduzidos em cerca de 80%.

O ensaio de impacto IZOD é tipicamente realizado seguindo as normas ASTM D256 e D4812 ou ISO 180.

Flamabilidade UL

Os testes do *Underwriter's Laboratories* (www.UL.com) são bastante específicos na maneira em que são conduzidos e como os diversos níveis de flamabilidade com que são graduados os polímeros. Todos os polímeros queimam se a temperatura for suficientemente alta e o que os testes procuram determinar é o quanto o material é (ou não) auto-extinguível.

Dois pontos importantes que devem ser considerados: a) os resultados destes testes são muito dependentes da espessura do corpo-de-prova e b) alguns materiais só se tornam auto-extinguíveis com o uso de aditivos, enquanto outros são naturalmente auto-extinguíveis.

Para o primeiro caso, vale lembrar que alguns materiais são auto-extinguíveis somente acima de uma determinada espessura (2 mm por exemplo), enquanto outros apresentam esta mesma característica para espessuras inferiores a 1 mm e, portanto, espessura mínima é um ponto importante a se observar se o projeto necessitar de características auto-extinguíveis.

O segundo caso é importante porque a presença dos aditivos que promovem a característica de auto-extinção normalmente compromete outras propriedades do polímero base, além de aumentarem muito a sua densidade e normalmente não poderem ser utilizados quando o produto final produzido terá contato com alimentos ou água potável.

Assim, sempre que possível, um produto naturalmente auto-extinguível (pela sua estrutura química) é preferível a outro que tenha propriedades que atendam aos requisitos mas necessite de aditivos para atingir a característica de auto-extinção necessária.

Os métodos mais comuns de avaliação da inflamabilidade medem o tempo para que uma chama percorra um corpo-de-prova, sob determinadas condições, sendo os mais comuns os propostos pelo *Underwriter's Laboratories*, como o UL 94.

Coeficiente Linear de Expansão Térmica (CLTE)

A maioria dos materiais, incluindo os polímeros, expande com o aumento da temperatura. Esta expansão é avaliada pelo coeficiente linear de expansão térmica, que mede a mudança de uma dimensão (comprimento) relativa à dimensão inicial e a mudança de temperatura e é representada pela inclinação da reta resultante. O mais comum é que este teste seja conduzido entre -30°C e $+30^{\circ}\text{C}$, porque nesta faixa de temperaturas os valores de CLTE para a maioria dos polímeros são relativamente constantes.

Para polímeros amorfos, o CLTE é praticamente constante até temperaturas próximas a T_g , e para materiais semi-cristalinos com T_g acima de 30°C esta regra também é válida. Para estes materiais, no entanto, acima da T_g o CLTE aumenta abruptamente por um fator de 3,5, o que deve ser levado em consideração no projeto de peças quando esses materiais serão utilizados acima de sua T_g .

Para materiais semi-cristalinos com T_g abaixo de 30°C , pode ser observado um aumento gradual do CLTE com o aumento da temperatura. No caso de materiais reforçados, vários fatores podem influenciar neste comportamento, como o tipo de reforço, sua quantidade e sua orientação, por exemplo.

Em geral, os materiais poliméricos apresentam valores de CLTE muito maiores do que o de metais, o que faz com que a utilização conjunta destes materiais em um componente deva ser estudada com cuidado, para que o aumento da temperatura não crie tensões superiores àquelas que os plásticos podem resistir.

Nestes casos, torna-se muito importante que os valores de CLTE dos dois materiais sejam os mais próximos possíveis na faixa de temperaturas a que a peça estará exposta. Para casos muito específicos, são necessários CLTE idênticos e um bom exemplo de polímero que pode apresentar valores de CLTE comparativos a metais é a Poliamida Imida (PAI) comercialmente mais conhecida como Torlon[®].

Esta propriedade é geralmente determinada seguindo as normas ASTM D696 (na Europa) ou E831 (nos Estados Unidos) ou ainda ISO 11359-2 e reportada em °C⁻¹.

Conclusão

Discutiram-se alguns dos testes mais comumente encontrados nas folhas técnicas de dados dos materiais poliméricos. Existem muitos outros, específicos de algumas aplicações, e por isto não se prestam a generalizações, uma vez que dados não estão disponíveis se não para um número muito pequeno de produtos.

Além disso, é importante lembrar que os ensaios são conduzidos em corpos de prova especialmente desenhados para estes ensaios, e por isso permitem uma boa reprodutibilidade e representam geralmente as melhores propriedades possíveis. Isso pode servir ao intuito de se comparar diversos materiais, mas indica muito pouco sobre as propriedades do produto acabado, uma vez que o design de uma peça tem grande influência nas propriedades e as empresas que utilizam estes materiais no seu processo de produção produzem produtos, e não corpos de prova.

Embora esta tenha sido apenas uma breve discussão sobre propriedades que constam das folhas de dados dos diversos polímeros, entende-se que estas generalizações são uma contribuição importante para o entendimento do comportamento destes materiais. Neste sentido, nenhum teste padrão é perfeito, mas é importante entender o significado do que está sendo avaliado para poder fazer um melhor uso das propriedades dos polímeros quando da escolha de um material para um determinado projeto.

APÊNDICE B – Métodos de Ensaio

Uma breve discussão sobre o significado dos resultados dos testes apresentados em folhas técnicas de dados

Quando se analisa uma folha técnica de dados (*datasheet*), destacam-se os resultados dos ensaios e as normas utilizadas para gerar estes resultados, sendo as mais comuns as da ASTM, ISO e UL e em alguns casos específicos ABNT, IEC, DIN, BS, ou JIS. Este texto ajuda a “navegar” por eles.

Primeiramente deve-se lembrar que cada um dos resultados expressos em uma folha técnica de dados é o resultado de uma média de vários ensaios (cujo número depende da norma específica) e normalmente as letras pequenas ao final da folha de dados indicam que estes são “valores típicos, que não devem ser utilizados como especificação“. Assim, quando se lê um valor de 100 MPa, deve-se interpretá-lo como sendo “ao redor de 100 MPa” e um corpo-de-prova escolhido aleatoriamente pode apresentar valores um pouco mais altos ou um pouco mais baixos que aquele apresentado.

Outro ponto interessante a ser levado em consideração é que realizar os testes para uma folha de dados completa tem um custo bastante elevado. Michael Sepe (IDES, 2003) estima que este custo seja de aproximadamente US\$ 15.000 para um único *grade* de material e isto não passa despercebido pelos fabricantes. Multiplicando este valor pelo número de grades disponíveis de cada fabricante, torna-se notório que é muito difícil que todos os materiais sejam testados para todas as propriedades, mas somente aquelas mais comuns e também aquelas que estão diretamente ligadas ao uso pretendido para o material.

É por isso que normalmente se encontra os valores de acordo com um único padrão (normalmente ASTM ou ISO) ou ainda com resultados em duas unidades (Kpsi e MPa por exemplo) apesar de o material ter sido testado de acordo com um único padrão.

Isso fica claro ao se comparar as folhas de dados de dois fabricantes diferentes de PA 6.6 carregado com 30% de fibra de vidro como, por exemplo, DuPont e RTP Company. A primeira apresenta os dados completos de acordo com as normas ASTM e ISO enquanto a outra apenas “transforma” os valores entre os diferentes sistemas de unidades. Muito provavelmente, a RTP Company não tem tantos recursos disponíveis para gerar todos os dados, mas quer atingir o maior público possível e por isso lista as propriedades nas diferentes unidades.

Vale lembrar que os resultados apresentados são obtidos em testes realizados em corpos de prova corretamente moldados. Estes corpos de prova são dimensionados (e cada norma geralmente determina dimensões próprias) para que os resultados sejam reprodutíveis e os melhores possíveis para uma determinada propriedade. Além disso, como citado anteriormente, as propriedades dos materiais são afetadas pelo processamento e, para a obtenção dos corpos de prova, os fabricantes utilizam as melhores condições possíveis, algo nem sempre encontrado no dia-a-dia das empresas.

Adicionando-se a isso a incerteza dos dados em si, percebe-se que não se deve dar uma importância demasiadamente grande ao padrão utilizado. Não que o padrão utilizado não seja importante (é preciso ter um padrão), mas que a incerteza dos dados e o distanciamento entre a realidade das normas e a realidade dos projetos é muitas vezes maior do que a diferença que poderia vir da modificação do padrão adotado.

Há ainda a diferença nas unidades em que os valores são reportados. Talvez a mais intrigante é a das unidades dos testes de impacto Izod e Charpy entre ASTM e ISO. A ASTM especifica a unidade de (J/m) como medida de energia, enquanto que a ISO especifica que os resultados dos testes devem ser dados em (kJ/m^2), que é uma medida de energia por unidade de área. Assim, não é possível converter uma unidade na outra, o que muitas vezes parece ser inconsistente e faz com que muitas pessoas tentem comparar os resultados dos dois tipos de ensaio, sem sucesso.

Outros pontos importantes:

- As empresas produzem produtos e não corpos de prova. Assim, não se deve levar os resultados apresentados em uma folha técnica de dados como especificações ou mesmo como propriedades dos materiais que serão atingidas em uma peça durante a sua produção;
- As normas e os corpos de prova projetados para elas são pensados para obter resultados consistentes, repetitivos e com pouca variabilidade. Deste modo, a típica variabilidade de produção e de outros “designs” será sempre maior que a variabilidade que se pode encontrar em resultados obtidos em corpos de prova;
- Os materiais poliméricos podem apresentar muitas variações de propriedades de acordo com a geometria da peça, com variações advindas do processamento em si;

Assim, deve-se tomar muito cuidado quando se compara duas folhas técnicas de dados de materiais para a escolha de um material para um projeto, pois além dos aspectos discutidos no Apêndice A, outros fatores, como por exemplo, forma, processamento e ambiente de uso da peça podem afetar grandemente as propriedades de um material, fazendo com que elas sejam bastante diferentes daqueles constantes das folhas técnicas dos materiais.

APÊNDICE C – Mapas de Propriedades dos Materiais

Uma breve discussão sobre Mapas de Propriedades dos Materiais e Índices de Mérito.

Os mapas de propriedades de materiais são uma maneira de se dispor as propriedades dos materiais proposto por Ashby (1989). Normalmente elas são apresentadas como uma lista ordenada ou ainda um gráfico de barras, como aquele mostrado na Figura 44.

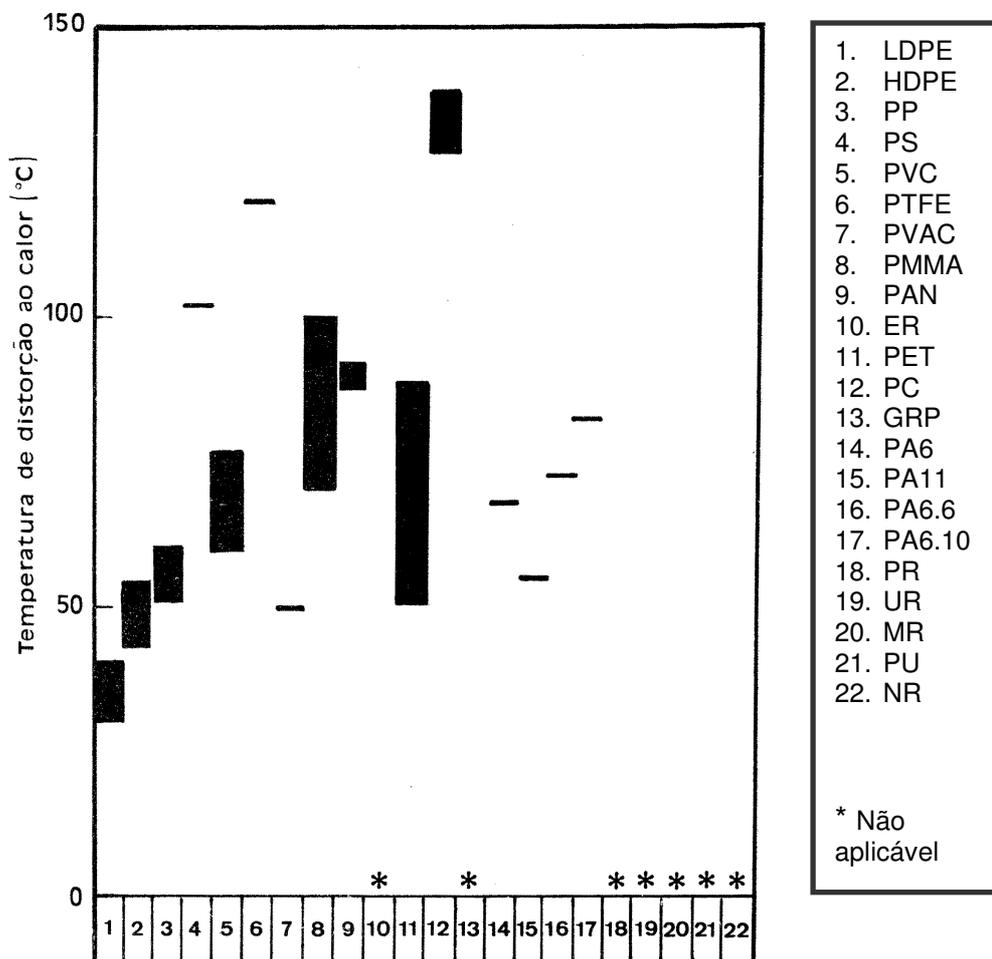


Figura 44: Gráfico de barras mostrando a temperatura de distorção térmica de diversos materiais. Cada barra mostra o quanto a propriedade pode variar para uma mesmo material. Adaptado de Mano (1991).

Porém, o desempenho de um componente raramente depende de uma única propriedade, e sim de uma combinação delas. Tem-se como exemplo a relação rigidez/peso ou mesmo resistência mecânica/peso. Ashby (1989) propôs que se fizesse uma representação gráfica de uma propriedade versus a outra, de maneira a formar um mapa com campos definidos para cada uma das classes dos materiais, sendo que os eixos do gráfico são formatados em escala logarítmica para que possam incluir todas as classes de materiais. Isto faz com que estes mapas permitam a visualização de todas as famílias de materiais em coordenadas cartesianas que representam pares de propriedades.

Assim, esses mapas são representações gráficas bidimensionais nas quais os eixos representam duas propriedades que são plotadas em escalas logarítmicas. Um exemplo de mapa pode ser visto na Figura 45.

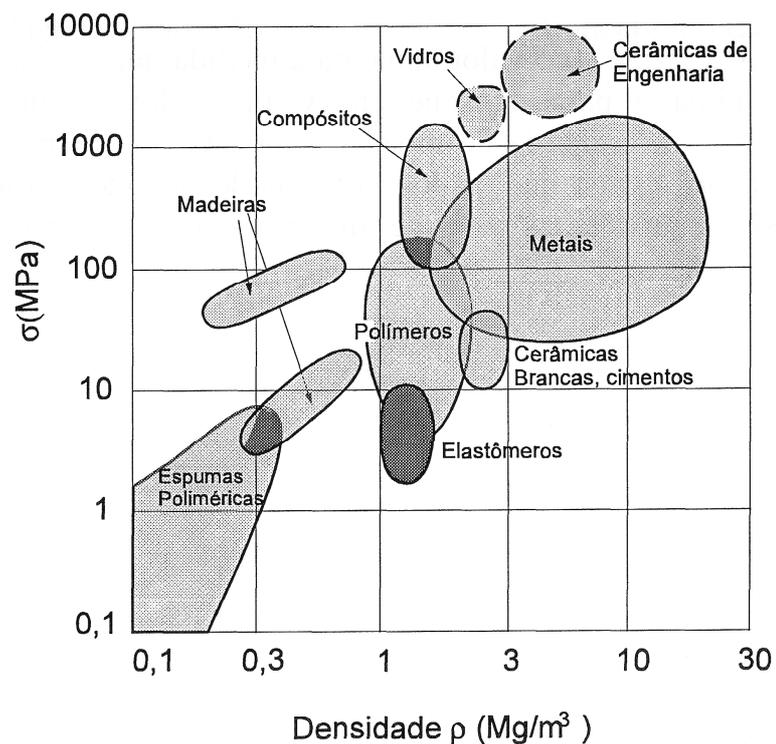


Figura 45: Mapa de propriedade dos materiais, Resistência mecânica versus densidade para diversos materiais. Fonte: Ferrante (1996).

O verdadeiro valor do seu método, porém, aparece quando da utilização dos Índices de Mérito (IM). Este conceito, também introduzido por Ashby (1989), é na verdade uma fórmula algébrica que permite expressar o compromisso entre duas propriedades de um material. Na sua forma mais simples, um IM pode ser simplesmente a propriedade ou o seu inverso, mas na maioria dos casos ele é descrito por uma fração, onde o denominador é aquela propriedade que deve ser minimizada e o numerador aquela que deve ser maximizada (SANTOS; FERRANTE, 2003).

Para cada caso específico, é possível identificar ou deduzir um ou mais IMs que sejam úteis para o projeto e, embora se apresente de forma bem simples, pode se tornar bastante difícil em outras, principalmente nos caso reais onde múltiplos objetivos conflitantes estão envolvidos.

Em seu artigo introdutório, Ashby (op.cit.) deduziu vários destes índices de mérito. Para o exemplo de uma barra em tração, a barra de menor peso que resiste a uma determinada força é aquela em que E/ρ tiver o maior valor. Para o caso de uma barra em flexão, este índice é para o maior valor de $E^{1/2}/\rho$. Para uma placa em flexão, este índice é para o maior valor de $E^{1/3}/\rho$.

Para facilitar a sua aplicação, os índices são representados por linhas retas superpostas ao gráfico, e assim pode-se definir a eq.(1):

$$C = \frac{E}{\rho} \quad \text{onde } C \text{ é uma constante.} \quad (1)$$

Escrevendo de outra maneira, tem-se a eq. (2):

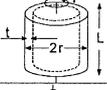
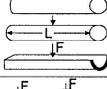
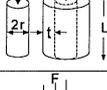
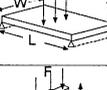
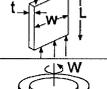
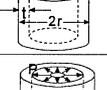
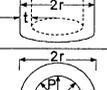
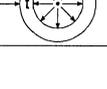
$$E = C \times \rho \quad (2)$$

Utilizando logaritmos para que o resultado no gráfico seja uma reta, tem-se a eq.(3):

$$\log E = \log C + \log \rho \quad (3)$$

A eq (3) representa uma família de linhas retas de inclinação 1, sendo uma linha para cada valor de C. Os índices de $E^{1/2}/\rho$ e $E^{1/3}/\rho$, conduzem a famílias de retas de inclinação 2 e 3 respectivamente. Existem inúmeros critérios como estes, ou índices de mérito (IM) que podem ser utilizados em SMPF, e alguns são apresentados na Tabela 3, que foi adaptada por Ferrante (1996) a partir do trabalho de Ashby (1989).

Tabela 3: Alguns índices de mérito utilizados em projeto. Fonte: Ferrante (1996).

MODO DE CARREGAMENTO		MINIMIZAÇÃO DE PESO PARA...		
		Rigidez	Resistência dobramento	Resistência fratura
Barra em tração		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Barra em torção		$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Tubo em torção		$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Barra e tubos em flexão		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$	$\frac{k_{IC}^{2/3}}{\rho}$
Flambagem de coluna e tubo		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	—	—
Chapa em flexão		$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$	$\frac{k_{IC}^{1/2}}{\rho}$
Flambagem de chapa		$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	—	—
Cilindro em rotação		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Vaso de pressão cilíndrico		$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Vaso de pressão esférico		$\frac{E}{(1-\nu)\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$

Dentre todas as propriedades dos materiais, tipicamente dez se destacam como sendo as mais importantes e estão listadas, juntamente com seus símbolos e unidades, na Tabela 4.

Tabela 4: Principais propriedades dos materiais segundo Ashby (1992).

Propriedade	Símbolo	Unidade
Densidade	P	Mg/m^3
Módulo Elástico (ou de Young)	E	GPa
Resistência a tração	σ_y	MPa
Tenacidade a Fratura	K_{Ic}	$MPa.m^{1/2}$
Tenacidade	G_{Ic}	J/m^2
Coeficiente de amortecimento	H	-
Condutividade Térmica	Λ	$W/m.K$
Difusividade Térmica	A	m^2/s
Calor Específico volumétrico	$C_p\rho$	$J/m^3.K$
Coeficiente de Expansão Térmica	A	$1/K$

Um exemplo de mapa de propriedades e a utilização dos índices acima, marcadas como linhas-guia para minimização de peso, podem ser vistos na Figura 46.

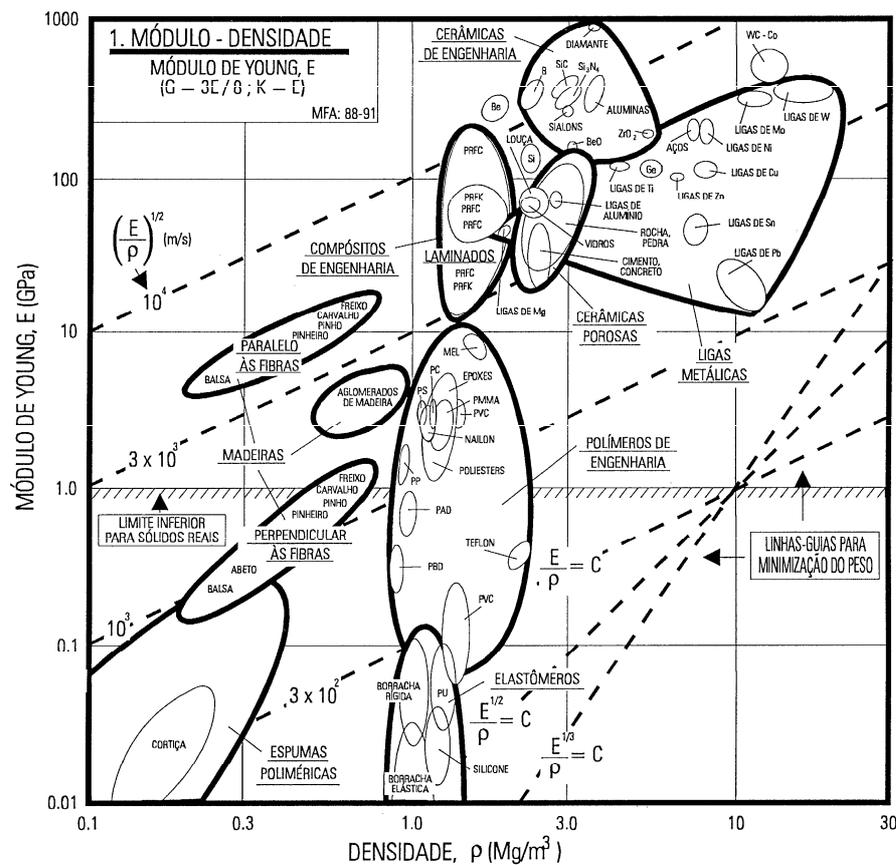


Figura 46: Mapa de propriedade dos materiais no espaço Módulo de Elasticidade versus densidade, com as diversas classes dos materiais e as linhas guia para minimização de peso.

Pode-se entender a utilização destas linhas por meio de um exemplo. Para o mapa apresentado, se dois materiais estiverem sobre uma mesma linha, eles apresentam desempenhos semelhantes, enquanto um material que esteja em uma linha paralela acima terá um desempenho melhor e um abaixo terá um desempenho inferior. Neste caso, um melhor desempenho significa ou uma deflexão menor para a mesma massa do componente ou um mesmo valor de deflexão para uma massa menor.

As mais diversas combinações de propriedades podem ser visualizadas desta maneira, e no artigo original de Ashby (1989) são citadas o que o autor considera como as dez mais importantes, e que dão origem a 10 mapas originais de propriedades dos materiais. São eles:

- Módulo elástico versus densidade
- Resistência mecânica versus densidade
- Tenacidade a fratura versus densidade
- Módulo elástico versus resistência mecânica
- Tenacidade a fratura versus módulo elástico
- Tenacidade a fratura versus resistência mecânica
- Coeficiente de amortecimento versus módulo elástico
- Condutividade térmica versus difusividade térmica
- Coeficiente de expansão térmica linear versus módulo elástico
- Resistência mecânica específica versus coeficiente de expansão térmica linear

Quando da publicação destes gráficos em um livro (ASHBY, 1992) e apesar de este estar protegido pelos direitos autorais, o próprio autor recomenda, no prefácio do livro, que sejam feitas cópias dos gráficos publicados como maneira de facilitar e disseminar o uso dos mesmos, desde que citada a referência.

APÊNDICE D – Biografia



José Alex Piccolo Sant'Anna

Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, Mestrando do Programa de Pós-graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo na área de seleção de materiais. Atua na área de plásticos desde 1998 com os mais diversos tipos de polímeros, em extrusão, injeção e sopro, nas áreas de vendas, assistência técnica, desenvolvimento de produto e de mercado. Atualmente é Gestor de Clientes da área de Polímeros Especiais da Solvay Química Ltda., sendo responsável por desenvolvimento de novas aplicações e mercados para a América do Sul.

É autor de diversos artigos técnicos, científicos e de divulgação além de palestrante sobre assuntos como astronomia, divulgação científica, ensino de engenharia, embalagens, seleção de materiais, transformação de peças de metal para plástico, nanocompósitos e polímeros de uso especial.