

Materiais e Design

A ARTE DA SELEÇÃO DE MATERIAIS NO PROJETO DO PRODUTO



Preencha a **ficha de cadastro** no final deste livro
e receba gratuitamente informações
sobre os lançamentos e as promoções da
Editora Campus/Elsevier.

Consulte também nosso catálogo
completo e últimos lançamentos em
www.elsevier.com.br

Michael Ashby
Kara Johnson

Tradução da 2ª Edição

Materiais e Design

ARTE E CIÊNCIA DA SELEÇÃO DE MATERIAIS NO DESIGN DE PRODUTO

Tradução

Arlete Simille Marques

Revisão técnica, notas e apresentação

Ágata Tinoco

Mara Martha Roberto



ELSEVIER



© 2011, Elsevier Editora Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610, de 19/02/1998.

Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros.

Copidesque: Alessandra Miranda de Sá e Evandro Lisboa

Revisão: Vânia Coutinho

Editoração eletrônica: Stephanie Lin

Elsevier Editora Ltda.

Conhecimento sem Fronteiras

Rua Sete de Setembro, 111 – 16º andar

20050-006 – Centro – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Rua Quintana, 753 – 8º andar

04569-011 – Brooklin – São Paulo – SP – Brasil

Serviço de Atendimento ao Cliente

0800-0265340

sac@elsevier.com.br

ISBN 978-85-352-3842-6

Nota: Muito zelo e técnica foram empregados na edição desta obra. No entanto, podem ocorrer erros de digitação, impressão ou dúvida conceitual. Em qualquer das hipóteses, solicitamos a comunicação ao nosso Serviço de Atendimento ao Cliente, para que possamos esclarecer ou encaminhar a questão.

Nem a editora nem o autor assumem qualquer responsabilidade por eventuais danos ou perdas a pessoas ou bens, originados do uso desta publicação.

CIP-Brasil. Catalogação na fonte.
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ

A85m

Ashby, M. F.

Materials e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto / Michael Ashby e Kara Johnson; tradução de Arlete Simille Marques; revisão técnica de Mara Martha Roberto e Ágata Tinoco. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
il.

Tradução de: Materials and design: the art and science of material selection in product design, 2nd ed.

Apêndices

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-352-3842-6

1. Materiais. 2. Desenho industrial. I. Johnson, Kara. II. Título.

10-3883.

CDD: 620.11

CDU: 620.1.2

Apresentação

Resistência e teoria dos materiais eram duas disciplinas temidas e pouco valorizadas nos cursos de Desenho Industrial (atualmente Design de Produto), nas décadas de 1960, 1970 e 1980, aqui no Brasil. Foi um período de descobertas e realizações pessoais para muitos de nós que não queríamos nos dedicar às tradicionais carreiras de Arquitetura ou Engenharia. Criar objetos e ver surgir modelos tridimensionais em escala real era tão compensador quanto traçar em prancheta projetos de grande porte que, porém, dificilmente poderiam ser sentidos em seus tamanhos verdadeiros. Estudar para essa nova profissão admitia, em curto prazo de tempo, ver a “ideia” sair do papel e se consolidar em nossas mãos numa “criação” materializada em *mock-up* e, por vezes, em protótipo.

Até bem pouco tempo atrás, acreditava-se que tudo que vinha de fora era melhor do que aquilo produzido pela indústria nacional. Pouco a pouco passaram a aparecer oportunidades de atuar como designers em alguma das raras empresas que confiavam no desenvolvimento do produto brasileiro como diferencial da avalanche dos importados. A situação não era confortável: nas fábricas, ficávamos alocados em departamentos junto aos engenheiros de produto e projetistas de ferramentas e, por conta dessa proximidade, nada parecia tecnicamente possível naquela planta fabril — o material não era apropriado aos processos instalados, o custo de manufatura era alto e os moldes complicados encareciam o produto para o consumidor final.

Nessa realidade, muito pouco nos serviam aquelas matérias obrigatórias que tivemos que “engolir”. Somente começavam a fazer sentido à medida que a prática vinha à tona, porém pouco conhecimento havia sido registrado em nossa memória. Somava-se a esse fato uma enorme dificuldade de encontrar bibliografia que apoiasse os designers de produto no que se refere à adequação de materiais aos “delírios” formais dos projetos. Sim, “delírios” formais, era assim que as criações eram consideradas caso trabalhássemos em um departamento de engenharia de produto ou de produção.

Aço, fibra de carbono ou de vidro, polímeros, cerâmica, vidro, resinas naturais, madeira, materiais compostos — cada um com suas especificidades químicas e físicas — eram processados por empresas especializadas em cada material isoladamente. Hoje, na era da globalização, a dinâmica é bem diferente: apesar de cada empresa entrar com sua estrutura fabril particular, o produto final é montado com componentes escolhidos de um grande leque de possibilidades. Isso faz com que o designer de produto necessite de um conhecimento amplo de materiais e seus respectivos processos de manufatura. As vocações formais próprias do plástico, por exemplo, começaram a ser exploradas somente após o devido reconhecimento da sua contribuição àquilo que ele tem de melhor: sua plasticidade e possibilidade de alteração cientificamente desenvolvida. Assim, os designers exploraram seu potencial com técnicos e engenheiros de produção, do mesmo modo que os artesãos fazem em pequena escala: reconhecem as características do material e cultivam toda sua capacidade.

A partir da década de 1990, com o aumento da atuação dos designers de produto nas fábricas, as editoras detectaram um nicho de mercado pouco

explorado de publicações sobre materiais e técnicas de produção voltados a esses profissionais. Entretanto, os primeiros textos publicados tratavam dos materiais isolados dos seus possíveis usos. *Materiais e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto* contribui para uma relação mais amigável entre o designer e a manufatura ao explorar exemplos de produtos cujas formas seguem os materiais e mostra métodos de se acercar às propriedades dos materiais avaliando seu potencial estético.

A relação design industrial e ciência dos materiais é hoje uma realidade. Equipes multidisciplinares trabalham, de modo geral, integradas no projeto de produto. Há um crescimento conjunto, não compartimentado, da equipe envolvida que discute em pé de igualdade os problemas e soluções em busca de um projeto criativo e viável.

Esta publicação não esgota todos os materiais existentes e isso nem seria possível já que, cada vez mais, são produzidos compósitos com características específicas para as funções de projeto. O livro oferece fundamentos para que o designer possa dialogar com engenheiros de produto e projetistas técnicos, sem ficar à mercê do “isso é impossível” e conseqüentemente argumentar acerca da viabilidade de suas propostas estéticas embasadas em conhecimento de materiais e processos.

Este livro chega em um momento de maturidade do design, mundial e brasileiro, que já é visto e praticado não como mero desenvolvimento de objetos estéticos, supérfluos ou descartáveis, mas de objetos estrategicamente voltados para o bem-estar da humanidade no que tange a: conforto, funcionalidade, uso racional dos materiais e recursos naturais.

Uma das grandes contribuições é o enfoque dado à ciência dos materiais em função do design, invertendo o modo em que o projetista de produto trabalhava a “ideia” – o livro sugere que sejam os atributos dos materiais a ditar a forma do produto. Vale dizer, a forma segue o material.

Os métodos de seleção de materiais por análise, síntese, similaridade e inspiração são, sem dúvida, uma contribuição de grande valia para nós, profissionais da área. Como se não bastasse essa apresentação de um novo método de projetar com materiais em design, a segunda metade do livro, o apêndice, traz uma pesquisa vasta e bem-organizada sobre materiais tradicionais e inovadores seguida de processos de conformação, junção e acabamento.

Os exemplos contemporâneos que relacionam Design, Materiais e Processos, apresentados ao longo dos capítulos, auxiliam o designer de produto a aprender a partir da observação e análise desses casos bem-sucedidos.

Em suma, conhecer as possibilidades permite o processo de criação, e criar sugere experimentação. Experimentar é descobrir, e descobrir permite inovar com pés no chão.

Ágata Tinoco
Mara Martha Roberto

Novembro de 2010

Prefácio

Livros sobre seleção de materiais – e há muitos deles – preocupam-se em encontrar uma combinação entre as propriedades dos materiais, os requisitos técnicos de um projeto e a ciência dos materiais. Atualmente, há métodos bem desenvolvidos para fazer isso, apoiados por sofisticadas ferramentas de software. Juntos formam a base para o ensino da seleção de materiais em faculdades de engenharia no mundo inteiro. Porém, frequentemente esses programas ignoram ou, no máximo, dedicam pouca atenção àquela que poderíamos chamar de “arte dos materiais” e ao papel que estes desempenham no design industrial. Isso talvez ocorra porque os aspectos mais técnicos da Engenharia constituem uma área estruturada e analítica que pode ser registrada e ensinada como um conjunto de procedimentos formais. Mas o design não é tão facilmente formulado como um método; ele depende de raciocínio “visual”, desenhos esquemáticos e modelagem; de uma exploração da estética e da percepção. E também de contar histórias.

Este livro aborda o papel dos materiais e processos no design de produto. Complementa um texto mais antigo que analisa os métodos para escolher materiais e processos que cumpram os requisitos técnicos de um produto. Mas aqui, ao contrário, a ênfase cai sobre uma gama mais ampla de informações sobre materiais que os designers necessitam, sobre o modo como os usam e sobre as razões por que o fazem.

Os comentários que recebemos e as conversas que tivemos com alunos, professores e designers profissionais sobre a primeira edição deste livro nos incentivaram (e também aos editores) a captar novas experiências, novas ideias e desenvolvimentos recentes em setores industriais, e incorporá-los à segunda edição. Com a ajuda de Willy e Patrick, da Swayspace, também dedicamos algum tempo a repensar o design, o *layout*, o esquema gráfico e de cores e o conteúdo do livro de modo a realçar a mensagem e sua apresentação. Incluímos novos estudos de caso derivados das experiências que um de nós (Kara Johnson) teve em seu trabalho com a IDEO. E esses casos ilustram a ideia de materiais e design de modo mais completo e mais inspirador. Tendo como base o trabalho recente de Mike, damos mais ênfase à sustentabilidade e às questões relacionadas com o design ecológico e “verde”. Os perfis de materiais e processos também foram ligeiramente ampliados e as fotografias melhoradas para ficarem mais acessíveis e inspiradores.

O livro tem dois públicos: estudantes e designers profissionais. Para os estudantes, a finalidade é apresentar o papel desempenhado pelos materiais e pela fabricação no design, usando linguagem e conceitos que eles já conhecem bem. Para os designers profissionais, a finalidade é apresentar uma fonte de referência concisa para materiais e manufatura, apresentando perfis de suas características. Com esse propósito, o livro é dividido em duas partes. A primeira apresenta ideias sobre design e métodos de seleção de materiais; a segunda é dedicada aos perfis.

Muitos colegas foram generosos com seu tempo e suas ideias. Em particular, agradecemos pelas discussões, críticas, contribuições e sugestões construtivas

do Professor Yves Brechet, da University of Grenoble; Dr. David Cebon, Dr. John Clarkson, Dr. Hugh Shercliff, Dr. Luc Salvo, Dr. Didier Landru, Dr. Amal Esawi, Dr. Ulrike Wegst, Sra. Veronique Lemerrier, Sr. Christophe LeBacq e Sr. Alan Heaven, da Cambridge University; Dr. Pieter-Jan Stappers, da Technical University of Delft; Dr. Torben Lenau, da Technical University of Denmark; e Julie Christensen, da Surface Design, San Francisco. Na segunda edição pudemos incluir estudos de caso da IDEO, e agradecemos profundamente pela oportunidade de continuar a trabalhar com a empresa na exploração do papel dos materiais no design. Devemos um agradecimento especial a Nicolas Zurcher, da IDEO, e a Jihoon Kim, do IDTC (International Design Trend Center), que, cada um a seu modo, se dispuseram a compartilhar algumas de suas imagens para ilustrar os perfis de materiais e de manufatura. Em particular, agradecemos a contribuição de Willy Schwenzfeier e Patrick Fenton, da Swayspace, em Nova York, pelo design do livro em si. Muitas outras pessoas e organizações, apresentadas nas páginas a seguir, contribuíram com imagens ou nos deram permissão para reproduzir imagens e fotografias de seus produtos.

Mike Ashby e Kara Johnson
Junho de 2009

Nossa lista dos cinco melhores livros da área

Como parte do prefácio deste livro, incluímos nossa lista dos cinco melhores livros que servem como boa referência, inspiração e aprendizado para materiais e manufatura. Esses livros nos ajudam a lembrar de entrar na fábrica, a focar a visualização, a explorar o básico do design e a experimentar.

Mike Ashby

1. Manzini, E. *The Material of Invention*. Londres: The Project Council, 1989. Descrições curiosas do papel do material na “invenção”.
2. McKim, R. H. *Experiences in Visual Thinking*. Califórnia: Brooks/Cole, 1980. Uma introdução de leitura muito fácil ao raciocínio e ao design criativos.
3. Tufte, E. R. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press: Conneticut, 1983. A bíblia dos métodos gráficos para representar (bem ou não) informações.
4. Jordan, P. S. *Designing Pleasurable Products*. Londres: Taylor and Francis, 2000. Uma discussão sobre os requisitos de função, usabilidade e prazer do design.
5. Norman, D. A. *The Design of Everyday Things*. Londres: MIT Press, 1998. Um livro que provoca reflexões sobre o design de produtos utilizados no dia a dia.

Kara Johnson

1. Thompson, R. *Manufacturing Processes for Design Professionals*. Londres: Thames & Hudson, 2007. A melhor referência disponível para conhecer os processos de manufatura.
2. Manzini, E. *The Material of Invention*. Londres: The Project Council, 1989. Uma história dos materiais icônica e inspiradora.
3. *Haptic*. Takeo Paper Show, 2004. Uma coleção de objetos inspirados no papel e feitos de papel.
4. *Suke Suke, Fuwa Fuwa, Zawa Zawa*. Nuno Corporation. Uma coleção da quintessência de manipulações de lindos tecidos. Disponível em www.nuno.com.
5. Johnson, K. e Bone, M. *I Miss My Pencil*. Palo Alto, Califórnia: IDEO, 2009. Uma série de experimentos com os sentidos, artesanato moderno, amor e fetiche.

Agradecimentos

ALPA of Switzerland (Suíça)	Han Hansen (Alemanha)
Antiques Collectors' Club (Reino Unido)	IDEO (Estados Unidos)
Apple Press (Reino Unido)	IDTC – International Design Trend Center (Coreia do Sul)
Arnoldo Mondadori Editore S.p.A. (Itália)	MAS Design (Reino Unido)
Bang and Olufsen, UK (Reino Unido)	Nokia Group (Finlândia)
Cynthia Nicole Gordon (Estados Unidos)	Porsche Design GmbH (Alemanha)
Dyson (Reino Unido)	Sony Corp. (Japão)
Ergonomic Systems Inc. (Estados Unidos)	Vectra (Estados Unidos)
Gisela Stromeyer (Estados Unidos)	Vitra Management AG (Suíça)
	Yamaha Corporation (Japão)

Introdução

Este livro inclui dez capítulos que exploram a ligação entre materiais e design de produto. Entender de materiais e de manufatura (M&M) é fundamental no processo do design. Nossa intenção é construir uma base sólida de informações e conhecimento centrada em M&M e incentivar a paixão por sua exploração e manipulação no contexto de design.

Nos apêndices, apresentamos exercícios para estudantes e designers profissionais, criados especificamente para cada capítulo, e incluímos mapas mais detalhados de informações técnicas para referência.



Capítulo I

Função e personalidade



Vivemos em um mundo de materiais. São os materiais que dão substância a tudo que vemos e tocamos. Nossa espécie — *Homo sapiens* — é diferente das outras, talvez mais significativamente pela habilidade de *projetar* — produzir “coisas” a partir de materiais — e pela capacidade de enxergar mais em um objeto do que apenas a sua aparência. Objetos podem ter significado, despertar associações ou ser signos de ideias mais abstratas. Objetos projetados, tanto simbólicos quanto utilitários, precedem qualquer linguagem registrada — e nos dão a mais antiga evidência de uma sociedade cultural e do raciocínio simbólico.

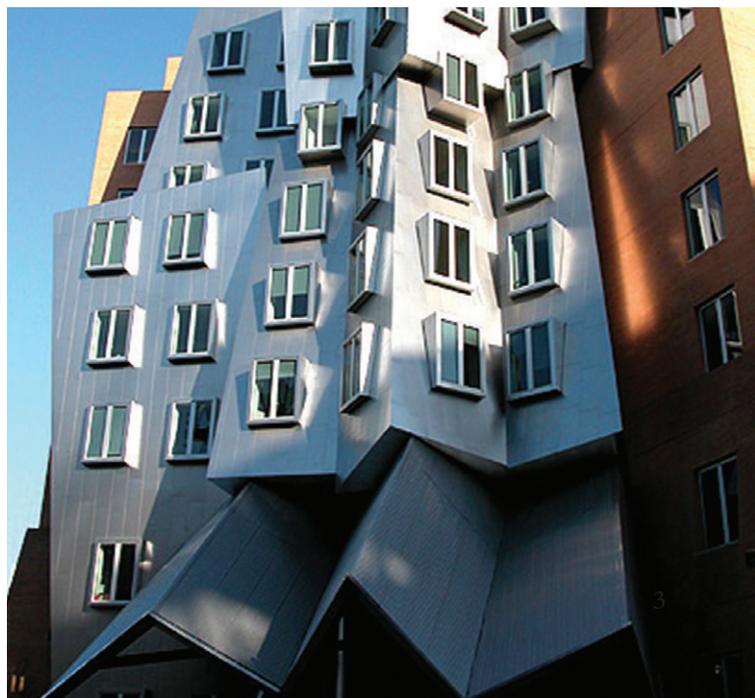
Alguns desses objetos tinham uma finalidade predominantemente funcional: a roda-d’água, o motor a vapor, a turbina a gás. Outros eram (e são) puramente simbólicos ou decorativos: as pinturas encontradas nas cavernas de Lascaux, as máscaras de madeira do Peru, as esculturas de mármore da Ática. Porém — o que é mais significativo —, há objetos que combinam o funcional com o simbólico e o decorativo. A combinação talvez seja mais óbvia na arquitetura — durante milhares de anos, grandes arquitetos procuraram criar estruturas que servissem a uma finalidade prática e ao mesmo tempo expressavam a visão e a grandeza de seus clientes ou de sua cultura: o Coliseu de Roma, o Empire State Building de Nova York, o Centro Pompidou de Paris, cada um deles um exemplo de mescla da técnica com a estética.

Em menor escala, designers de produto buscam mesclar a técnica com a estética, combinando utilidade prática com prazer emocional. Pense na porcelana Wedgwood, nos artigos de vidro Tiffany, nos móveis Chippendale — esses artigos foram feitos e comprados, antes de mais nada, para cumprir uma finalidade

funcional, mas sobrevivem e hoje são apreciados também por seu atrativo como objetos de beleza. Pense ainda nos instrumentos musicais: o violino ou o cravo com detalhes incrustados; nas armas de guerra: o escudo decorado ou os detalhes esculpidos em uma arma de fogo; ou nas armas do intelecto: a caneta folheada, o manuscrito decorado com iluminuras. As formas de todas essas peças expressam aspectos da imaginação e do desejo dos criadores de confeccionar tanto objetos de prazer, quanto de utilidade (Figuras 1.1 e 1.2).

**Figura 1.1 –
Maravilhosa mescla
de estética e função
utilitária**

*Stata Center no MIT
(imagem por cortesia do
prof. John Fernandez,
Departamento de Arquitetura,
MIT, Cambridge,
Massachusetts).*





**Figura 1.2 –
Maravilhosa mescla
de estética e função
utilitária**
Pistola Colt.

No caso de materiais e design de produto, é a combinação de elementos de arte e ciência que funciona. Materiais não são apenas números em uma planilha de dados. E design não é um exercício de estética sem sentido nem uma exploração isolada da tecnologia. O que importa é o processo de achar soluções que sejam significativas para as pessoas, que proporcionem novas experiências e inspirem e criem impacto positivo na sociedade e em nossa vida diária. Hoje, as pessoas buscam produtos que sejam sustentáveis e cativantes, e cabe ao designer desenvolver tais produtos. Precisamos evoluir de uma sociedade industrial impulsionada pelo consumismo para uma sociedade que respeita e aprecia os aspectos de eficiência e aparência. Para explorar os aspectos físicos dos materiais, precisamos entrar na fábrica e conhecer as pessoas que lidam com os processos de produção. Para tomar decisões a respeito do uso eficiente de materiais, é preciso ter uma base sólida de conhecimento técnico sobre materiais e manufatura. Combinadas, materialidade e eficiência permitem ao designer desenvolver produtos que sejam inovadores e, ainda assim, expressões totalmente tangíveis e

otimizadas de uma ideia. Essa é a ideia que chegará ao mercado.

As pessoas — consumidores — compram coisas porque gostam delas, ou as amam, até. É claro que, para ser bem-sucedido, um produto tem de funcionar de maneira adequada, mas isso não basta: tem de ser fácil e conveniente de usar, e deve ter uma “personalidade” que satisfaça, inspire e dê prazer (Figura 1.3). Esse último aspecto — a personalidade — depende fortemente do design industrial. Quando muitos produtos equivalentes em termos técnicos competem, conquista-se (ou perde-se) a participação de mercado por meio de seu apelo visual e tátil, da exploração de outros sentidos ou de uma conexão emocional, das associações que desperta, do modo como é percebido e das experiências que proporciona. Hoje, os consumidores esperam prazer, além de funcionalidade, de tudo que compram. Criá-lo é parte fundamental do design.

Os avanços na área de materiais permitem avanços no design industrial, assim como o fazem com o projeto técnico — juntos, os avanços podem gerar novos comportamentos, novas experiências, novas arquiteturas (Figura 1.4). E aqui precisamos de uma palavra que requer definição: “inspiração” — a capacidade de estimular o pensamento criativo. Novos desenvolvimentos em materiais e processos são fontes de inspiração para designers de produto porque sugerem novas soluções visuais, táteis, esculturais e espaciais para o design de produto. Exemplos extraídos do passado recente são a capacidade de colorir e moldar polímeros para produzir peças brilhantes e translúcidas; a moldagem em conjunto de elastôme-

ros para obter superfícies macias ao tato; vidro temperado e texturizado para criar paredes e assoalhos transparentes; revestimentos de superfície que refletem, refratam ou difundem a luz; compósitos de fibras de carbono que permitem estruturas excepcionalmente delgadas e delicadas — e há muitos mais. Em cada um desses exemplos, produtos inovadores foram inspirados pela utilização criativa de materiais e processos.

Portanto, os materiais desempenham dois papéis que se sobrepõem: o de proporcionar funcionalidade técnica e o de criar personalidade para o produto. Qualquer desequilíbrio nesse ponto fica aparente. Projetistas técnicos têm acesso imediato a informações do tipo que precisam — manuais, softwares de seleção, serviços de consultoria de fornecedores de materiais — e a análises e códigos de otimização para projetos seguros e econômicos. Por outro lado, designers industriais alegam, por intermédio da imprensa e em entrevistas, a frustração de não terem suporte equivalente. Essa discrepância aparece também na educação de nível superior: o ensino da ciência e da aplicação técnica de materiais é altamente desenvolvido e sistematizado, apoiado por numerosos textos, softwares, periódicos e conferências; contudo, não há abundância semelhante de suporte para o ensino de materiais na área de design industrial.

Preencher essa lacuna de informações e métodos não é simples. Os termos técnicos usados por engenheiros não são a linguagem corrente dos designers industriais — na verdade, às vezes eles podem até achar que esses termos não têm



Figura 1.3 – Função, uso e personalidade

Uma bicicleta tem de funcionar (rodas, corrente, engrenagens), ser projetada para ter utilidade (carregar coisas de um lado para outro) e possuir uma personalidade que combine com o proprietário (grafismo do quadro, fita de guidão).

sentido. Por outro lado, designers industriais expressam suas ideias e descrevem materiais de um modo que, para os engenheiros, às vezes parece assustadoramente vago e qualitativo. O primeiro passo para preencher essa lacuna é explorar como cada grupo “usa” os materiais e a natureza das informações que cada um exige. O segundo é explorar métodos e, por fim, ferramentas de projeto que entrelacem as duas correntes de pensamento em um único tecido integrado. Essas duas últimas sentenças resumem o escopo deste livro.



Figura 1.4 – Violino virtual

A forma do violino é parte essencial de sua personalidade. Neste violino eletrônico, o formato fantasmagórico faz a conexão com a forma original e também sugere a transmutação ocorrida (imagem por cortesia de Yamaha Corp.).

Leitura adicional

Há considerável literatura sobre design de produto — algumas abrangentes, outras não. Ao final de cada capítulo apresentaremos uma lista de fontes úteis acompanhadas por um breve comentário. As que apresentamos a seguir são um bom ponto de partida.

Baxter, M. *Product Design*. Londres: Chapman and Hall, 1995. (Este ambicioso livro, cujo objetivo é o entendimento do processo de design de produto como um todo, abrange projeto dirigido a aparência, fabricação, baixo custo, confiabilidade e responsabilidade ambiental. É uma introdução útil, escrita em linguagem simples.)

Clark, P. e Freeman, J. *Project, a Crash Course*. Nova York: The Ivy Press Ltd./Watson-Guption Publications/BPI Communications Inc., 2000. (Um passeio rápido e interessante pela história do design de produto desde 5000 a.C. até os dias de hoje.)

Coates, D. *Watches Tell More than the Time*. Nova York: McGraw-Hill, 2003. (Análise da estética, associações e percepções de produtos do passado e do presente, com exemplos, muitos deles extraídos de design de automóveis.)

Dorner, P. *Project since 1945*. Londres: Thames and Hudson, 1993. (Bem-ilustrado, documenta a influência do design industrial em móveis, utensílios e na área têxtil — história do design contemporâneo que complementa a história mais abrangente de Haufe [1998], citada adiante.)

Forty, A. *Objetos de desejo — design e sociedade desde 1750*. São Paulo: CosacNaify, 2007. (Panorama interessante da história do design de tecidos estampados, produtos domésticos, equipamentos de escritório e sistemas de transporte. Felizmente a obra é destituída de elogios a designers e focaliza o que o design industrial faz, em vez de quem o fez. A maioria das ilustrações é extraída do final do século XIX e início do século XX, com alguns exemplos de design contemporâneo.)

Haufe, T. *Project, a Concise History*. Londres: Laurence King Publishing, 1998. (Provavelmente a melhor introdução ao design industrial para estudantes — e para qualquer um. Conciso, abrangente, claro, projeto gráfico inteligível e boas ilustrações coloridas, embora pequenas.)

Jordan, P. S. *Designing Pleasurable Products*. Londres: Taylor and Francis, 2000. (Gerente de pesquisa estética e design da Philips, Jordan argumenta que hoje os produtos têm de funcionar adequadamente, além de atender a aspectos de usabilidade e proporcionar prazer. Grande parte do livro é uma descrição de métodos de pesquisa de mercado para revelar a reação de usuários aos produtos.)

Julier, G. *Encyclopedia of 20th Century Design and Designers*. Londres: Thames and Hudson, 1993. (Breve resumo da história do design, com boas figuras e discussões sobre a evolução do design de produto.)

Manzini, E. *The Material of Invention*. Londres: The Project Council, 1989. (Descrições curiosas do papel do material na “invenção” — neste caso com o significado de projeto criativo.)

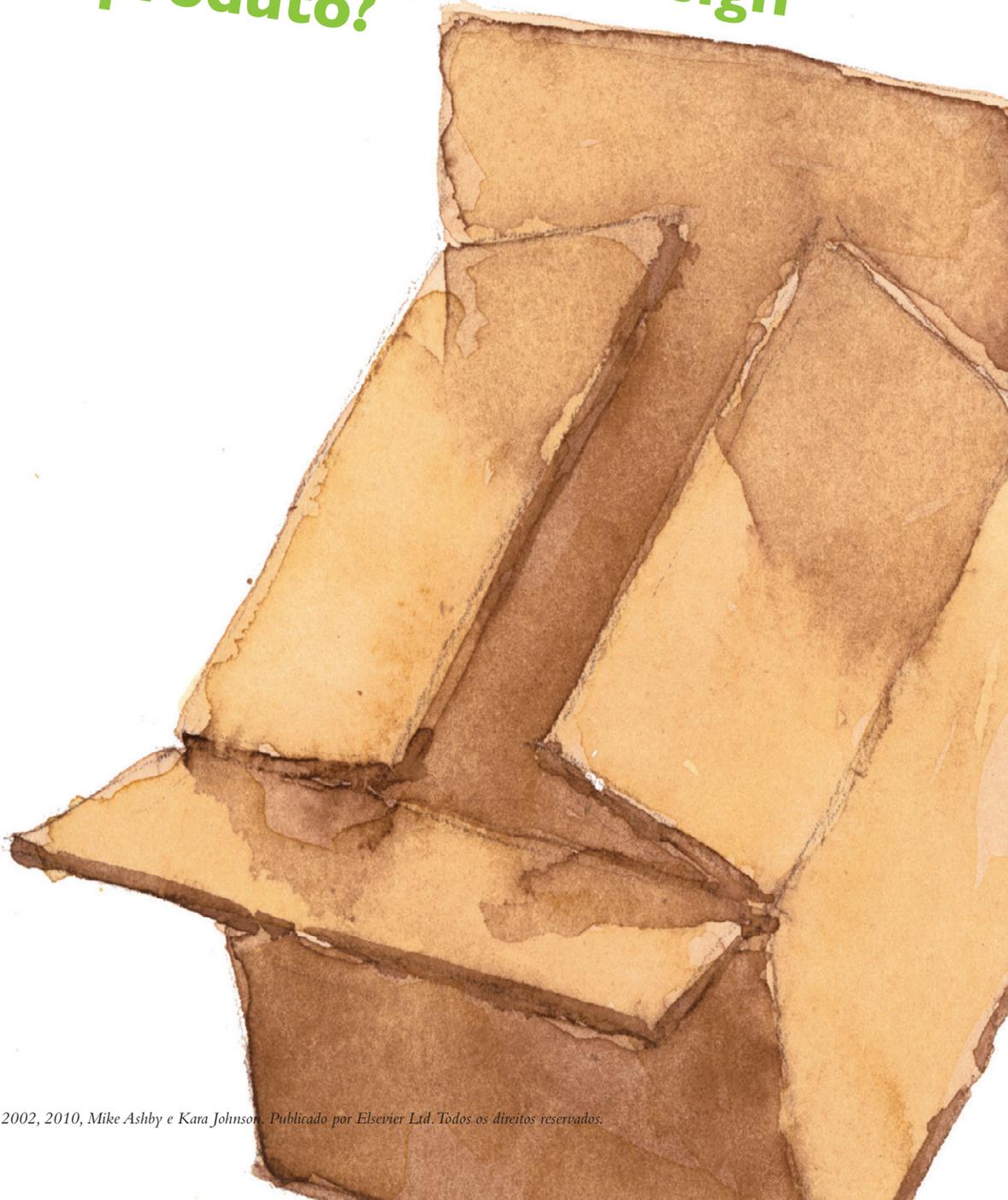
McDermott, C. *The Product Book*. Londres: D & AD/Rotovison, 1999. (Cinquenta ensaios elaborados por designers conceituados que descrevem a própria definição de design, o papel que desempenha nas respectivas empresas e a abordagem de cada um para o design de produto.)

Norman, D. A. *The Project of Everyday Things*. Londres: MIT Press, 1998. (Livro que dá uma noção do design de produto com ênfase na ergonomia e na facilidade de utilização.)

Vezzoli, C. e Manzini, E. *Project for Environmental Sustainability*. Londres: Springer-Verlag, 2008. (Um livro em coautoria com o escritor de *The Materials of Invention*, que apresenta ferramentas e estratégias para integrar requisitos ambientais ao desenvolvimento de produtos.)

Capítulo 2

O que influencia o design de produto?



Nada é estático. O designer de hoje procura otimizar o projeto para melhor atender às necessidades do mercado atual, mas, antes mesmo de concluir a otimização, algumas forças influenciam as decisões de projeto — mudam e exigem um novo direcionamento. É proveitoso ficar ciente dessas forças; elas criam o contexto no qual o projeto ocorre.

A Figura 2.1 sugere cinco dessas forças — o mercado, a tecnologia, o clima de investimento, o meio ambiente e o design industrial. É uma simplificação, mas uma simplificação útil. O círculo central representa o processo de design, cujo funcionamento e dinâmica exploraremos no Capítulo 3. Está sujeito a várias influências externas, indicadas pelos ramos que o rodeiam. Um bom designer está sempre alerta ao desenvolvimento da tecnologia, derivado da pesquisa científica adjacente. Novas tecnologias são exploradas de modo compatível com o clima de investimento da empresa, que por sua vez está condicionado às condições econômicas vigentes nos países nos quais o produto será produzido e utilizado. A preocupação com a minimização do impacto ecológico provocado pela engenharia de produto aumenta a conscientização em relação ao projeto para o meio ambiente e, no longo prazo, ao projeto voltado para a sustentabilidade. Além disso, nos mercados do século XXI, os consumidores exigem muito mais do que um produto que funcione bem a um preço acessível; eles também querem satisfação e prazer, o que transforma os insumos advindos do design industrial e da estética em alta prioridade. Claro que há muito mais influências além das cinco citadas no início deste capítulo, mas

discussões com designers sugerem que atualmente tais forças estão entre as mais poderosas. E, é evidente, não raro elas entram em conflito.

Antes de nos lançarmos ao desenvolvimento propriamente dito deste livro, examinaremos de maneira breve cada uma dessas forças influentes que, daqui em diante, estarão sempre se esgueirando nos bastidores e reaparecendo em capítulos posteriores, quando sua importância se fizer sentir.

O mercado

O crescimento econômico e a prosperidade dos dias atuais, tanto em âmbito nacional quanto pessoal, e a natureza das economias de livre-mercado fazem do mercado um poderoso motivador do design de produto. Em países desenvolvidos há diversos produtos tecnicamente maduros cujo mercado está saturado, no sentido de que quase todos que necessitam deles já os têm. Portanto é o desejo (“querer”), e não a necessidade (“precisar”), que gera as forças de mercado. Hoje, grande parte do design de produto é impulsionada pelo desejo, e um dos principais desejos dos consumidores é mais funcionalidade. Tal demanda desvia a ênfase dos materiais estruturais — que, após décadas (e até mesmo séculos) de desenvolvimento,

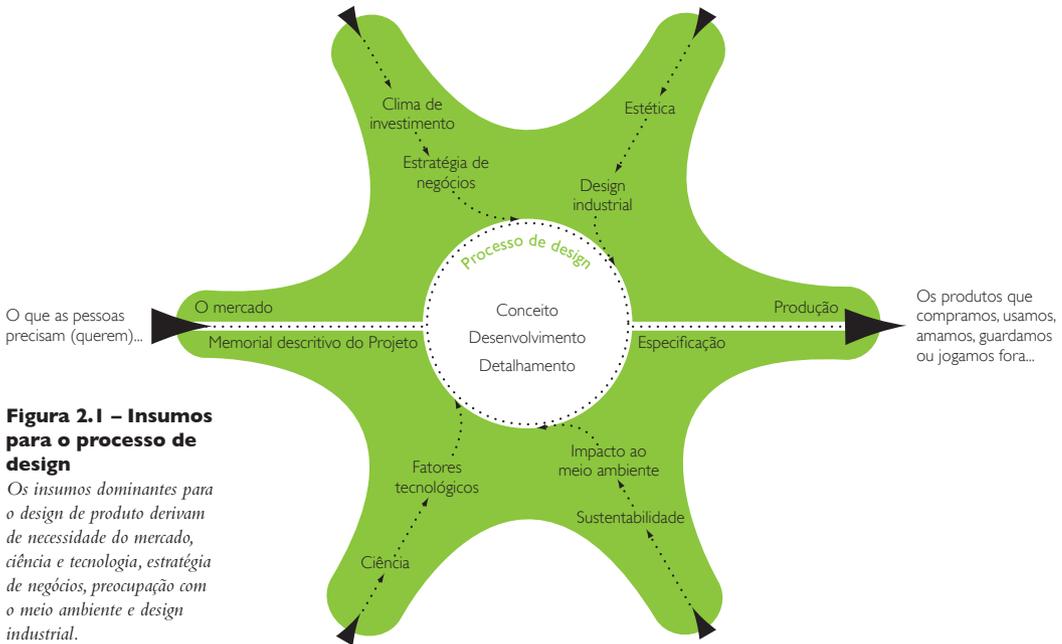


Figura 2.1 – Insumos para o processo de design

Os insumos dominantes para o design de produto derivam de necessidade do mercado, ciência e tecnologia, estratégia de negócios, preocupação com o meio ambiente e design industrial.

evoluem agora lentamente — para materiais que se comportam de novas maneiras. Estas são proporcionadas na maior parte por materiais não estruturais: os atributos elétricos, óticos, magnéticos e biológicos é que são importantes neste caso.

Contudo, não significa o fim da existência dos materiais estruturais; longe disso: mais de 95% de todos os materiais de engenharia produzidos são utilizados primariamente para suportar cargas mecânicas. A pesquisa e o desenvolvimento nessa área enfatizam processamento mais eficiente, maior controle de qualidade e métodos de fabricação mais flexíveis, em vez da busca por materiais completamente novos. Porém, embora a maioria dos carros — para dar um exemplo — ainda seja em grande parte feita de aço, eles também contém até 30 pequenos motores elétricos para posicionar janelas, bancos, limpadores de

para-brisas e espelhos (materiais magnéticos e elétricos), microprocessadores para controle do motor e sistemas de orientação (materiais semicondutores), vidro temperado e não reflexivo, visores de cristal líquido e de diodos emissores de luz (LEDs) (materiais óticos) e assoalhos e painéis laterais para isolar calor e som (materiais térmicos e acústicos). É nessa área que a maior parte da pesquisa e do desenvolvimento atuais está concentrada.

É usual dizer que os designers atendem às necessidades do mercado, mas às vezes é ele próprio quem as cria. Produtos revolucionários tomam o mercado de surpresa — poucos consumidores sentiam falta de um *walkman*, de um relógio digital, ou mesmo de uma impressora a laser antes desses produtos aparecerem no mercado. Nesses casos, o designer antecipou-se e, ao oferecer uma solução, criou a necessidade. A inspiração

subentendida nesses conceitos não surgiu do mercado, mas dos avanços da ciência e da tecnologia — o desenvolvimento de magnetos de efeito de campo, osciladores de quartzo e lasers de estado sólido —, para os quais nos voltamos agora.

Ciência e tecnologia

A menos previsível das forças que impulsionam a mudança é a da própria ciência (Figura 2.2). Apesar das previsões periódicas¹ de que a ciência está “chegando ao fim”, ela continua a expor novas tecnologias que habilitam a inovação em materiais e processos.

Como já dissemos, são as aplicações estruturais que, em termos de capacidade de suportar carga, dominam, em esmagadora dimensão, o consumo de materiais de engenharia. Cimento e concreto, aço e ligas leves, polímeros e compósitos estruturais — todos focos de pesquisa no século passado — atingiram uma espécie de maturidade técnica. O que a nova ciência e a tecnologia podem oferecer nessa área?

Materiais mais adequados para estruturas leves e uso estrutural em altas temperaturas oferecem benefícios de tão considerável potencial, que a pesquisa para desenvolvê-los continua a todo vapor. Também a tendência à miniaturização cria novos problemas mecânicos e térmicos — tamanho pequeno significa com frequência que a estrutura de suporte deve ser excepcionalmente fina e delgada, o que requer materiais de excelente rigidez e resistência, e que, enquanto a potência pode ser baixa, a densidade de potência é enorme, exigindo novos materiais para geren-



Figura 2.2 – Papel da ciência

A ciência revela novas tecnologias; destas, surgem novos materiais e processos. Estes, por sua vez, estimulam novas oportunidades para o design de produto.

ciamento térmico. A reconhecida importância futura dos dispositivos MEMS (microsistemas eletromecânicos) apresenta desafios ainda maiores: materiais para microestruturas, rolamentos, engrenagens e chassis que devem funcionar de maneira apropriada em uma escala para a qual as leis da mecânica funcionam de modo diferente (as forças inerciais deixam de ser importantes, ao passo que as forças de superfícies tornam-se fator de influência, por exemplo).

Sobretudo, há o impulso de descobrir e desenvolver novos materiais funcionais. Alguns exemplos de materiais já consagrados e de sua aplicação foram dados na última seção. Há vários em desenvolvimento e, com o tempo, inspirarão produtos inovadores. Exemplos desses materiais emergentes são polímeros eletroativos, metais amorfos, novos materiais intermetálicos e cerâmicos magnéticos e supercondutores, espumas metálicas e materiais reticulados produzidos por microfabricação ou

1. Veja, por exemplo, Horgan (1996).

tecedura tridimensional. A pesquisa de materiais que imitam a natureza de modo sutil é estimulada pelo conhecimento mais profundo da biologia celular, que sugere novas abordagens para o desenvolvimento de superfícies bioativas e biopassivas que as células podem reconhecer. Técnicas de montagem em escala nano permitem a criação de dispositivos bidimensionais que respondem ao movimento de um único elétron ou a um *quantum* de fluxo magnético.

Se o século XX é considerado a era dos materiais volumosos, tridimensionais, o século XXI será a era das superfícies, monocamadas, e até de moléculas isoladas, e da nova funcionalidade que permitem.

Sustentabilidade e meio ambiente

Toda atividade humana causa algum impacto sobre o ambiente em que vivemos. O ambiente tem

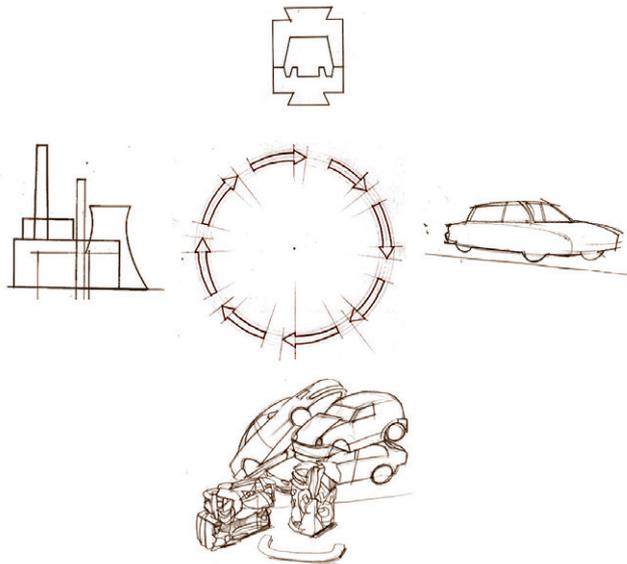
certa capacidade para enfrentar tais impactos, de maneira que determinado nível pode ser absorvido sem danos duradouros. Mas é evidente que as atividades humanas de hoje frequentemente ultrapassam esse patamar e diminuem a qualidade do mundo em que vivemos agora, além de ameaçar o bem-estar de gerações futuras. A situação pode ser traduzida pela seguinte declaração dramática: a uma taxa global de crescimento de 3% ao ano, extrairemos, processaremos e descartaremos mais coisas nos próximos 25 anos do que em toda a história da civilização humana.

Projetar respeitando o meio ambiente, geralmente, é interpretado como o esforço para ajustar o processo projetual em design de modo a corrigir a já conhecida e mensurável degradação ambiental. A escala temporal desse modo de pensar é de dez anos mais ou menos, expectativa de vida média de um produto. A preocupação com a sustentabilidade vai além: a adaptação de um estilo de vida que atenda às necessidades presentes sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Nesse caso, a escala temporal é mais longa — talvez 50 anos no futuro.

As reais considerações no projeto voltado ao ambiente evidenciam-se quando examinamos o ciclo de vida do material delineado na Figura 2.3. Minérios e insumos primários, a maioria não renovável, são processados para fornecer materiais; destes são fabricados produtos que serão utilizados e, ao final da vida útil, descartados; uma porcentagem talvez entre em um ciclo de reciclagem, e o resto é destinado a incineração ou aterros. Em cada ponto desse ciclo há consumo de energia,

Figura 2.3 – A vida de um material

Extraem-se e se processam minério e insumos primários para resultar em material; desse material é fabricado um produto que será utilizado e, ao final da vida útil, descartado ou reciclado. Consomem-se energia e materiais a cada etapa, gerando um excedente de calor e emissões sólidas, líquidas ou gasosas.



acompanhado por um excedente de CO₂ e outras emissões — calor e resíduos sólidos, líquidos e gasosos. O problema, em termos rudimentares, é que a soma desses subprodutos indesejáveis ultrapassa a capacidade de absorção pelo ambiente. O dano visível é na maioria local; a origem pode ser determinada e é possível executar ações para remediá-lo. Grande parte da legislação ambiental visa a reduções modestas, embora contínuas, da atividade prejudicial; a regulamentação que exige uma redução de 20%, por exemplo, no consumo médio de gasolina em carros de passeio é considerada um grande desafio.

Sustentabilidade requer soluções de um tipo completamente diferente. Mesmo as estimativas conservadoras do ajuste necessário para restaurar o equilíbrio com o ambiente a longo prazo preveem uma redução de um quarto em relação ao fluxo mostrado na Figura 2.3; há quem diga de um décimo.² O crescimento da população e o aumento das expectativas dessa população eliminam com folga quaisquer economias de 20% que as nações desenvolvidas possam conseguir. Parece ser um problema árduo, que exige difícil adaptação e cuja resposta não será encontrada neste livro. Mas continua sendo um dos fatores motivadores e a condição-limite definitiva para o desenvolvimento de produtos, que devem ser mantidos como pano de fundo para qualquer pensamento criativo em design.

Portanto, como responder ao problema mais urgente de redução do impacto de uso? Um modo óbvio é fazer mais com menos. A redução de materiais é possibilitada pela reciclagem, pela utilização de materiais

renováveis cuja matéria-prima são coisas que podem ser cultivadas, pela miniaturização e pela substituição de bens por serviços. Pode-se conseguir a redução de energia por meio do projeto de sistemas de transporte leve, pelo gerenciamento térmico otimizado de edifícios e pelo aumento da eficiência da conversão e utilização de energia na indústria. Provavelmente, a medida mais efetiva de todas é aumentar a vida útil do produto: dobrá-la reduz pela metade o impacto de três das quatro etapas mostradas na Figura 2.3. E isso redireciona o foco para o design industrial — as pessoas não se desfazem daquilo de que gostam.

Clima econômico e de investimento

Muitos projetos nunca chegaram ao mercado. Transformar um projeto em um produto de sucesso (Figura 2.4) requer investimento, e investimento relaciona-se a confiança, a determinação da viabilidade econômica — algo que depende em parte do projeto em si, mas também, e isso é importante, da natureza do mercado ao qual é dirigido, bem como do grau de proteção possível contra a concorrência. A análise de caso de negócio para um produto procura estabelecer sua viabilidade econômica.

Um produto é economicamente viável se seu valor no mercado é maior do que seu custo por uma margem suficiente que justifique o investimento exigido para fabricá-lo; tal é o que determina a receita potencial que ele pode gerar. Técnicas de modelagem de custos permitem estimar o custo de produção. Estimar o valor³ é mais

2. Os livros de Von Weizsäcker et al. (1997) e de Schmidt-Bleek (1997) defendem a proposta de redução massiva no consumo de energia e materiais, e citam exemplos de como é possível conseguí-la.

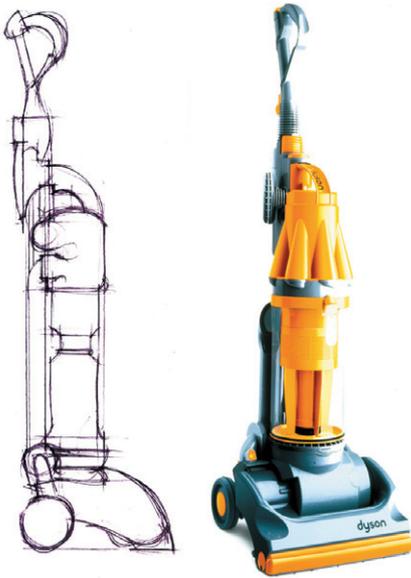


Figura 2.4 – Do conceito ao produto

A trajetória de uma ideia desde o conceito até o produto requer demonstração de viabilidade técnica e econômica, mercado receptivo e investimento de capital (imagem por cortesia de Dyson, Reino Unido).

difícil; requer pesquisa de mercado para se determinar a percepção que os consumidores têm do produto, a importância que dão ao desempenho e a natureza da competição. O valor do produto depende do mercado e do setor ao qual é dirigido: uma bicicleta de titânio (para dar um exemplo) é atraente para os entusiastas do *mountain biking* — para eles, o valor da bicicleta é maior do que o custo; mas não é atraente para a média dos consumidores urbanos, para os quais o custo é maior do que o valor.

Demonstrar viabilidade econômica é apenas uma parte de um caso de negócio digno de crédito. Estabelecer a produção requer investimento, e o investimento só aparecerá quando houver confiança de que ocorrerá um nível significativo de retorno de valor. A capacidade dos desenvolvedores do produto de agregar o valor que o produto oferece depende da capacidade de limitar a concorrência por meio da retenção do controle da propriedade

intelectual e dos insumos fundamentais (pessoas, segredos comerciais, acordos de licenciamento ou parceria). O investimento exigido para comercializar um produto tecnicamente viável só se concretizará se as avaliações dos casos técnico, de mercado e de negócio forem todas atraentes. E, por fim, há a questão da atitude em relação ao risco. Alguns setores industriais são lentos na adoção de novas tecnologias, viáveis ou não; a indústria nuclear, o setor da engenharia civil e, cada vez mais, a indústria aeroespacial estão entre eles. Outros não são: fabricantes de equipamentos esportivos e de muitos produtos de consumo adotam avidamente novos materiais e processos, e promovem com entusiasmo os produtos fabricados com eles, aceitando o risco de que, por serem novos e caracterizados de modo imperfeito, podem fracassar prematuramente.

Este cenário causa um impacto significativo sobre o desenvolvimento de materiais. Desenvolver, certificar e comercializar um novo material estrutural normalmente demora 15 anos, e nem sempre é evidente que ele será técnica e economicamente viável quando alcançado esse ponto. No século passado, grande parte do custo do desenvolvimento de materiais estruturais foi financiada por governos, por meio de programas nucleares, espaciais e de defesa, que estavam dispostos a investir a longo prazo — coisa que os setores privados não estão propensos a aceitar. Contudo, quando se trata de materiais funcionais, a escala de tempo para pesquisa e desenvolvimento pode ser bem mais curta, e — em parte porque esses materiais podem habilitar produtos revolucionários — seu valor, mais

3. Veja o artigo de Clark et al. (1997) na seção Leitura adicional, que descreve técnicas de análise de valor, utilidade e modelagem de custo técnico.

alto, o que os torna um investimento mais atraente. Assim, o processo de design é influenciado pelo clima de investimento, por avaliações de lucro e prejuízos esperados, volume de vendas e facilidade de produção; cada um desses aspectos está relacionado diretamente com o desenvolvimento e a comercialização de materiais.

Estética e design industrial

A anestesia, do grego *anaesthesia*, entorpece os sentidos, suprime o sentimento; anestesia é a falta de sensação. A estética, do grego *aesthesis*, faz o oposto: desperta o interesse, estimula e atrai os sentidos, em particular o senso de beleza. Sinestesia é a combinação de sentidos: para algumas pessoas é uma desordem física; para os designers é inspiração. Elementos estéticos, quando isolados de modo surpreendente ou combinados de maneira inesperada, criam novas oportunidades de projeto e para as experiências que esses projetos habilitam. *Estética* (assim como “inspiração”) é uma palavra difícil que tem diversas nuances de significado para transmitir uma mensagem contundente; apesar disso, parece não haver nenhuma outra que abranja tão bem os atributos sensoriais de materiais e produtos. Designers manipulam esses sentidos — e as reações a cada sentido — para criar a personalidade do produto.⁴

Argumentava-se no passado — e às vezes o mesmo argumento ainda é usado hoje — que um produto projetado para funcionar de maneira adequada teria automaticamente apelo estético; que “a forma segue a função”.

Esse raciocínio resulta na visão de que o design industrial como busca ativa é desnecessário, visto que será necessariamente o subproduto de um bom projeto técnico; sob essa perspectiva, o design industrial é mera embalagem. Há uma visão oposta: a de que produtos construídos apenas sob a perspectiva da função não foram projetados; são meros produtos de engenharia. A realidade, é claro, é que ambos, o projeto técnico e o design industrial, influenciam seu sucesso e o da empresa que o fabrica, e por razões bastante significativas. Citaremos algumas delas.

Diferenciação de produto

Hoje há muitos produtos que estão tecnicamente maduros. As distinções de desempenho técnico são minúsculas, e os preços dos produtos que têm aproximadamente desempenho semelhante também são quase os mesmos. À medida que o mercado para um produto fica saturado, as vendas podem ser estimuladas por diferenciação. Significa criar linhas de produtos distintos e que tenham uma personalidade em sintonia com gostos e aspirações de determinado público-alvo: certa elegância que atraia as mulheres; um caráter resistente que sobreviva à utilização do produto por um atleta; acessibilidade divertida e tolerância à má utilização, adequadas para crianças. Esses detalhes que têm função específica e cuja intenção é diferenciar também servem para criar uma linguagem de design e começar a agregar valor à marca (Figura 2.5).

Interfaces simples

Um produto é seguro, efetivo e agradável se o modo como funciona pode ser compreendido por meio de

4. *A interação de um designer com um material – ou produto – é provavelmente mais bem-descrita como experiência sinestésica. Sinestesia é um termo da psicologia que descreve a experiência física de sensações conjuntas. Muitas pessoas dizem que, quando zangadas, “veem tudo vermelho”, gostam de “queijos picantes” com uma taça de Porto ou querem ouvir “rock pesado”.*

seu projeto: a utilização de tamanho, proporção, configuração e cor para identificar controles e o que fazem; a utilização de luzes, sons, visores e gráficos para informar seu estado atual. A funcionalidade do produto aumentou e, ao mesmo tempo que os consumidores desejam essa característica, também querem tamanho pequeno e uma interface simples e fácil de entender. O tamanho físico que é reservado para a “interface” diminuiu, e o espaço no qual o designer está livre para expressar o uso do produto é limitado. O bom design industrial ajuda a lidar com esse problema.

Identidade corporativa e de marca

A imagem transmitida por uma corporação e seus produtos é um de seus ativos mais valiosos; de fato, o ativo primário de algumas empresas é sua marca. Criar e apresentar a marca de uma empresa e transmiti-la de uma geração de produtos a outra

é função do design industrial, que abrange todos os aspectos da empresa: seus produtos, sua propaganda e até mesmo a arquitetura de seus edifícios. Impérios, exércitos, ordens religiosas, empresas aéreas, ferrovias, corporações que produzem coisas — todos utilizam o design para transmitir o que são ou como gostariam de parecer. A marca está relacionada à construção de conexões emocionais entre a ideia de uma empresa e os produtos que ela realmente faz e vende. Materiais e materialidade são um modo de construir essa conexão entre pessoas e marca. É importante que as histórias que as empresas contam e as marcas que criam tenham expressões de projeto reais e tangíveis, e não sejam completamente baseadas em propaganda e marketing.

Vida do produto

Produtos têm uma “vida útil” — isto é, após determinado período, espera-se uma substituição, que não precisa necessariamente ocorrer. Na

Figura 2.5 – Família de produtos

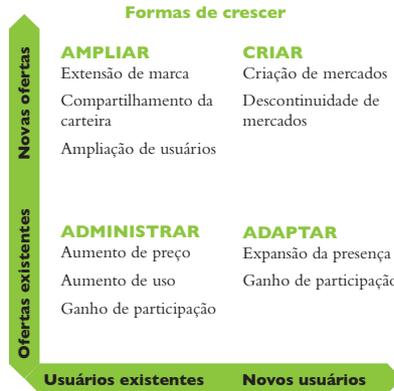
A utilização dos mesmos materiais e acabamentos de superfície cria uma linguagem de design e atributos de marca que unem esses quatro produtos (imagens por cortesia de Porsche Design GmbH).



realidade, um produto chega ao fim da vida quando o mercado ou o usuário não o quer mais. Carros têm uma vida útil de aproximadamente 12 anos, mas carros clássicos sobrevivem por muito mais tempo. Uma aeronave DC3 foi projetada para uma vida útil de 20 anos, mas 60 anos depois ela ainda está voando. A Torre Eiffel tinha um projeto de vida de apenas dois anos; mais de um século depois, ainda está em pé como o símbolo de Paris. De certa maneira, produtos “clássicos” são projetos de tal qualidade que sobrevivem à sua vida esperada — às vezes por muitas gerações. Projetos que se distinguem pelo uso elegante ou criativo de materiais sobrevivem porque são tão encantadores, simbólicos ou evocativos que são considerados tesouros, e como tal preservados. Projetos inexpressivos com materiais que não despertam interesse ou que sejam inadequados são, por deliberação ou acidente, transitórios; nós os descartamos sem pestanejar.

O equilíbrio necessário

Produtos são parte do ambiente em que vivemos — no lar, no trabalho, na rua. Hoje em dia, a produção em massa fornece produtos a um mercado muito maior e em números bem superiores aos dos priscos dias de projetos baseados na perícia de um artesão, quando poucos tinham recursos para possuí-los. Nesse sentido, a produção em massa aprimorou a qualidade de vida, mas em outros teve a capacidade de reduzi-la. Nosso ambiente é aprimorado por produtos que satisfazem. Por outro lado, se os produtos criarem expectativas que não serão cumpridas, nada acrescentarem (ou até depreciarem) à autoestima ou à percepção do lugar que ocupamos na sociedade, ou



não provocarem uma sensação de satisfação, a qualidade de vida é afetada.

Produtos de sucesso dependem de um misto equilibrado de projeto técnico e design industrial. Esse fato é aceito mais imediatamente na arquitetura do que no design de produto — arquitetos⁵ falam dos três “ideais” de eficiência, economia e elegância. Contudo, há uma percepção⁶ cada vez maior de que ideias semelhantes se aplicam ao design de produto. Por essas e outras razões, o design industrial é agora um aspecto tão importante do processo do design total quanto qualquer outro. Os exemplos que concluem este capítulo ilustram melhor esses pontos.

Analisando a inovação

Produtos evoluem por meio de inovação. A inovação pode assumir mais de uma forma e há várias maneiras de descrevê-la. Nesse caso, a inovação incremental ocorre quando você administra ofertas e possibilidades de uso existentes. A inovação evolucionária acontece quando você amplia as ofertas ou as adapta a novas utilidades. Inovação revolucionária ocorre quando se cria algo novo: nova oferta para novas utilidades. A Figura 2.6 apre-

Figura 2.6 – Tipos de inovação

Matriz 2 x 2 para inovação (esta matriz foi extraída de “Innovation, Growth and Getting to Where You Want to Go”, de Jacoby e Rodriguez, em Project Management Review, 2007).

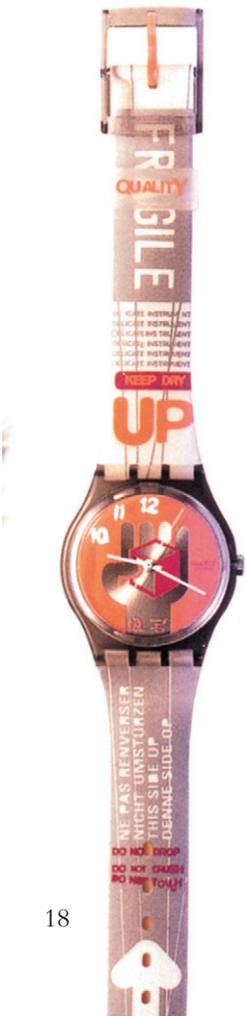
5. Veja, como exemplo, Billington (1985).

6. Pye (1997), em particular, insiste nisso.



Figura 2.7 – Diferenciação de produto: relógios de pulso

Acima, relógio de uma era em que se configuravam bens valiosos e de herança. Abaixo, a estilização radical da Swatch (imagem por cortesia de Apple Publishers, London).



senta outra matriz para inovação. Ela é mais familiar para os designers, mas o conceito é semelhante.

Alguns exemplos

Diferenciação de produto — relógios de pulso

Os relógios de pulso estão disponíveis no comércio desde 1850, embora na maior parte desse tempo apenas os ricos tivessem recursos para comprá-los. Há pouco mais de 40 anos, um relógio era um bem valioso e valorizado — um presente para a vida toda, dado em uma ocasião significativa (Figura 2.7). Se você tivesse um relógio, não precisava de outro.

Com o crescimento da riqueza após 1945, o mercado de relógios se ampliou e ficou saturado — ou seja, praticamente todos tinham um relógio. A necessidade de estimular as vendas tornou-se prioridade, e nada melhor do que transformar relógios de pulso em itens de moda, não somente para os ricos, mas para todos. O relógio se tornou mercadoria comum, comercializada em massa, como roupas. Por exemplo, um catálogo de compras por reembolso postal em 2001 (do qual os relógios eram apenas uma pequena parte) apresenta uma lista ilustrada com 312 relógios, a maioria deles por menos de \$50, alguns por menos de \$10. Todos usam tecnologia digital e por isso a precisão é muito mais alta do que a maioria das pessoas necessita — o marketing baseado no desempenho deixa de ser relevante. Se um relógio tiver de ser vendido por mais de \$50 (e é evidente que há muitos casos assim), então terá de atrair de algum modo o estilo, gosto e individualidade do consumidor.

Se precisarmos de uma demonstração adicional da recente predominância do design industrial no marketing, considere a Swatch. Antes de 1975, a Suíça detinha o monopólio mundial da fabricação de relógios, sustentado pela imagem nacional de qualidade de marca. O relógio eletrônico, inventado nos Estados Unidos e em seguida desenvolvido no Japão, foi uma catástrofe para a indústria relojoeira da Suíça. Em 1984, o número de empresas fabricantes de relógios, sua produção e a mão de obra que empregavam tinham caído para menos de um terço em relação aos picos atingidos alguns anos antes. Desesperados por uma recuperação, relojoeiros suíços se uniram para projetar um relógio que fosse preciso, mais bem-acabado e mais fino do que os dos países do Leste asiático, e cujo preço fosse competitivo. Mais significativo: elaboraram o conceito de “coleção” — uma série de produtos tecnicamente idênticos, mas de cores, texturas, padrões e estilos diferentes (Figura 2.7). Artistas foram contratados para criar um relógio ou uma série deles; e cada novo projeto recebia um nome (“Calypso Beach”, “Lolita”, “Graffiti”). Em 1989, a imagem já estava estabelecida e era um sucesso, não apenas em relação à ampliação do mercado, mas também por convencer os indivíduos a comprar não somente um relógio, mas dois, dez ou até mesmo cem. Até agora a marca já lançou cerca de mil projetos com base em uma única inovação técnica.

Interfaces simples — telefones celulares

Telefones portáteis (celulares) são exemplos de inovações eletrônicas recentes e bem-sucedidas (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Interfaces simples: telefones celulares

Alguns exemplos: de um dos primeiros telefones da Nokia até o mais recente BlackBerry, líder na categoria dos smartphones.

Assim como o tocador de CD portátil, o *walkman* e até mesmo o computador pessoal, agora os telefones celulares são vendidos tanto por seus méritos estéticos quanto pelos méritos técnicos.

Sistemas de comunicação celular exigem a construção de uma rede de estações repetidoras; o crescimento inicial desse setor, em 1988, dependia de uma rede mínima dessas estações. A tecnologia era nova, e foi recebida por *early adopters* — grupo relativamente pequeno de consumidores que adoram nova tecnologia e a comprarão antes mesmo de ela funcionar bem ou ser fácil de usar. Os telefones celulares daquele tempo pareciam tijolos, eram pretos e pesados, e tinham uma aparência “técnica” semelhante à dos rádios militares (Figura 2.8). Aumentar o mercado exigia avanços técnicos: telefones mais leves (o que significava baterias mais eficientes e menor dreno de potência) e, em razão da crescente preocupação com riscos para a saúde, micro-ondas de intensidade mais baixa e, portanto, sensibilidade mais alta. Em 1995, a cobertura por estações repetidoras em países desenvolvidos era quase universal, e a absorção da tecnologia tinha crescido mais rapidamente do que o esperado. Em 1999, os

mercados europeu e norte-americano aproximavam-se da saturação inicial.

Hoje em dia, os telefones celulares têm formato mais orgânico, fazem uso extensivo de cor e padronagem, e vêm com capas que combinam com as roupas, com o humor ou a ocasião. Os celulares contemporâneos exploram os atributos visuais e táteis dos materiais — são produtos que possuem como principais características agradar a uma ampla faixa de consumidores e criar tendências de design que fazem um modelo de apenas um ano parecer fora de moda. Caixas translúcidas que revelam vagamente o interior do telefone, ornamentos em estilo de *pop art* ou de arte clássica, como a *Mona Lisa*, e edições limitadas — todos são maneiras de estimular mercados. Nos dias atuais, o valor percebido suplementou o valor técnico como estratégia de design. Outras inovações recentes seguiram os mesmos padrões, em épocas diferentes. O *walkman* (lançado em 1970), o tocador de CDs portátil (lançado em 1980), o *mouse* de computador (lançado em 1984) transformaram-se de objetos funcionais, desinteressantes e monótonos em objetos com cores vivas ou translúcidas, bem trabalhados e que suscitam emoções.



Figura 2.9 – Identidade corporativa: Bang & Olufsen

As imagens mostram uma identidade corporativa e de produto consistente e poderosa (imagens por cortesia de Bang & Olufsen, Dinamarca).

Identidade corporativa — Bang & Olufsen

Quem quer que tenha um mínimo de interesse por equipamentos de áudio pode reconhecer um produto da Bang & Olufsen (B&O), mesmo que nunca o tenha visto antes (Figura 2.9). No final da década de 1960, essa empresa decidiu estabelecer uma identidade corporativa reconhecível por meio do design de seus produtos. Rádios, televisores e fones eram — e continuam sendo — reconhecíveis por formatos *high-tech*, arestas retas, superfícies planas, acabamentos cuidadosos e grafismo caprichado e *clean*. A combinação de lâminas de madeira, acabamento sedoso de alumínio e aço inoxidável sugere qualidade e atenção aos detalhes. Botões, tampas deslizantes e controles complexos foram eliminados e substituídos por sensores infravermelhos e controles remotos simplificados. Os designers procuraram combinar o discreto com o notável.

A Bang & Olufsen expressa essa filosofia⁷ da seguinte maneira:

O design não é nada, a menos que seja utilizado para unir forma e função [...]. Nunca tentamos ser os primeiros a

lançar nova tecnologia [...]. Nosso alvo é diferente: queremos que nossos produtos tenham sentido e o façam se sentir especial na companhia deles [...]. Acreditamos que tais produtos sejam construídos por meio da combinação de tecnologia incomparável e apelo emocional; produtos com personalidade que façam as pessoas se sentirem especiais e criem vínculos emocionais [...]. A maioria de nossos produtos vem em uma gama de cores dentre as quais você pode escolher, exatamente como se estivesse comprando um novo sofá [...]. Nossas cores não seguem a moda, mas combinarão com a sua mobília [...]. Texturas de superfície são outro elemento de design considerado secundário por alguns, mas que para nós é motivo de grande preocupação [...]. Temos apenas uma regra: o desempenho dos produtos Bang & Olufsen deve ser compreendido de imediato [...]. Nossa meta é surpreender com iniciativas incomuns, escapar do tédio do desenvolvimento de produtos em massa [...].

Essa é uma empresa que considera o valor percebido, criado pelo design industrial focado, como fundamental para o reconhecimento e a atração do produto, e também para a

7. Bang & Olufsen (2002).



identidade corporativa. Sua lucratividade e sucesso contínuos sugerem que ela esteja certa.

Tipos de inovação — Chaves USB (pen-drive)

Nos primeiros dias da armazenagem de informações digitais, o meio utilizado era a fita perfurada. Ela foi desbancada na década de 1960 pelos cartões perfurados e, depois, rapidamente pela fita magnética. A fita magnética desbancou o vinil e o acetato como meio de gravação de músicas e filmes, que por sua vez foi desbancada pelo CD na década de 1980 e pelo DVD na década de 1990. Agora, todos esses meios são ofuscados por *downloads* digitais acoplados a armazenamento de dados de estado sólido, cujo representante mais visível é o *pen-drive*, que nos dá um belo exemplo de evolução de produto por meio de inovação.

Os primeiros discos removíveis eram parecidos com caixas pretas com capacidade de 64 ou 128 MB. Eram puramente funcionais e não visavam a nenhuma diferenciação de mercado. Não é surpresa que a primeira inovação fosse caracterizada pela expansão da capacidade, primeiro para 1 GB, depois para 8 GB e além, e pela incorporação de endereçamento USB mais rápido. À medida que a oferta crescia e o mercado começava a ficar saturado, a progressão natural seguiu na direção da criação de nichos (Figura 2.10a–e).

Evolução dos materiais

As influências sobre o design de produto que discutimos anteriormente — mercado, tecnologia, meio ambiente, clima de investimento e design industrial — resultam em uma evolução no uso de materiais para determinado produto ou classe de produto. Citaremos dois exemplos: a máquina fotográfica e o secador de cabelos.

Máquinas fotográficas

Desde aproximadamente 140 anos, quando a máquina fotográfica foi inventada, as mudanças no projeto ocorreram com lentidão. As primeiras máquinas fotográficas eram feitas de madeira, bronze, couro e, é claro, vidro. E tinham certo estilo, o do marceneiro, que refletia a manufatura artesanal. Pouco a pouco elas se transformaram em ferramentas de arte, negócios e ciência, e evoluíram até ficar mais parecidas com instrumentos científicos, com mais ênfase na funcionalidade do que na atração visual.

Os materiais escolhidos para essas máquinas fotográficas eram em grande parte metálicos — eram duráveis e davam ênfase à qualidade de “engenharia”. Porém, à medida que o mercado começou a ficar saturado para o produto padrão, apareceram novas variantes: a máquina fotográfica descartável (feita de papel), a máquina fotográfica espionagem

Figura 2.10 – Tipos de inovação: Pen-drives

(a) Aço inoxidável da Cartier (fonte: www.gizmodo.com); (b) fita cassete analógica da Mixta (fonte: www.makeamixa.com); (c) cristal Swarovski (fonte: blog.getitnext.com); (d) PVC moldado da Mimobot (fonte: www.gizmodo.com); (e) madeira do OOOMS (fonte: www.oooms.nl).



Figura 2.11 – Evolução de materiais: máquina fotográfica

Do metal ao polímero ao papel aos polímeros revestidos com metal. A evolução dos materiais é mostrada nessa seleção de máquinas fotográficas.

turizada (polímeros metalizados) e máquinas fotográficas à prova d’água (elastômeros moldados sobre vários tipos de polímeros) — a diferenciação por meio de inovação técnica muitas vezes é acompanhada de mudança nos materiais. O desenvolvimento técnico continua até hoje: lentes com *zoom* e imagens digitais são exemplos. Mas tudo isso veio de mãos dadas com um tipo singular de diferenciação: máquinas fotográficas para crianças, máquinas fotográficas para turismo submarino, máquinas fotográficas instantâneas, máquinas fotográficas para usar como acessórios de moda. A Figura 2.11 mostra alguns exemplos.

Vale a pena observar como os produtos dão saltos evolucionários, que redefinem seus papéis e alcançam novos mercados. A evolução da fotografia baseada em películas fotográficas (filmes) para a imagem digital é um exemplo. A dos telefones com a tradicional conexão por cabos telefônicos terrestres para a tecnologia móvel (celular) é outro. O salto da contagem do tempo da engrenagem de relógio para o oscilador de quartzo é um terceiro. Trata-se de inovações consideradas “revolucionárias”, no sentido de que com frequência destroem os mercados

existentes, porque a nova tecnologia é controlada por um setor fabril diferente do antigo, o que dispara um novo processo evolucionário.

Secadores de cabelos

Os secadores de cabelos elétricos apareceram pela primeira vez no mercado de massa aproximadamente em 1945. Desde então, pouco mudou no modo como desempenham sua função: um motor elétrico aciona uma ventoinha que impele o ar e o faz passar por elementos de aquecimento, de onde é dirigido, por um bocal, ao cabelo. Os primeiros secadores de cabelos (Figura 2.12a) tinham uma potência que mal chegava a 100 watts. Feitos de peças fundidas de zinco ou de folhas de aço prensadas, eram volumosos e pesados. A engenharia empregada era dominada pela “mentalidade do metal”: peças que podiam ser fundidas, prensadas e usinadas com facilidade, unidas por vários elementos de fixação. Metais conduzem eletricidade e também calor, portanto era necessário isolamento interno para evitar que o usuário fosse eletrocutado ou sofresse queimaduras. Essa preocupação, aliada a motores e ventoinhas ineficientes, resultava em um produto volumoso. O único desenvolvimento técnico desde então foi a ventoinha centrífuga, que permite um design mais compacto, no qual o motor ocupa o ponto central da própria ventoinha (Figura 2.12b).

O desenvolvimento de polímeros resultou em secadores de cabelos que usaram a princípio baquelita, uma resina fenólica (Figura 2.12c), e então outros materiais poliméricos para a caixa e o cabo. As primeiras versões são imitações em plástico das contrapartes em metal; o modelo em

baquelita tem a mesma forma e o mesmo número de peças, porém um número ainda maior de elementos de fixação em relação ao de metal.

Inicialmente, os polímeros eram atraentes em razão da liberdade de moldagem decorativa que permitiam. Os secadores de cabelos começaram a perder um pouco do formato industrial; eram dirigidos a um público mais atento à moda. Porém, esses projetos não exploravam todas as vantagens oferecidas pelos polímeros: cores mais vivas, moldagens mais complexas, de encaixe, elementos de fixação, também de encaixe, para fácil montagem e outras semelhantes. Mas houve um saldo positivo: a unidade era mais leve e (como a condutividade térmica dos polímeros é baixa) não ficava tão quente. Contudo, se a ventoinha emperrasse, o ponto de amolecimento dos polímeros era rapidamente ultrapassado; a maioria dos antigos secadores de cabelos que sobreviveu dessa era está seriamente deformada pelo calor. Não obstante, motores menores e o aprimoramento do projeto técnico resultaram no aumento da potência e na redução do peso, o que permitiu voltar ao projeto mais eficiente de fluxo axial (Figura 2.12d).

As mudanças no projeto descritas aqui resultam em grande parte da introdução de novos materiais. O diminuto motor de um secador de cabelos moderno usa magnetos de cerâmica e uma estrutura de cerâmica para dar alta densidade de potência. Sensores detectam superaquecimento e desligam a unidade quando necessário. A velocidade mais alta do fluxo de ar permite um aquecedor com maior densidade de potência e reduz a necessidade de isolamento entre o elemento

de aquecimento e a caixa. Atualmente o projeto da caixa permite explorar por completo os atributos dos polímeros: é moldada em duas peças, em geral com apenas um elemento de fixação. Um bocal ajustável pode ser retirado por simples torção — é um bocal de encaixe que explora a alta razão resistência/módulo de elasticidade do polímero. Hoje em dia, o projeto é jovial e atraente, leve e extremamente eficiente. Qualquer empresa que continuasse a produzir secadores de cabelos de metal prensado quando uma unidade como essa tornou-se disponível descobriria que seu mercado desapareceu.

Já há alguns anos que os secadores de cabelos se equipararam em termos técnicos. Aumentar a participação de mercado depende de criar demanda entre novos grupos sociais (crianças, atletas, pessoas que viajam muito...) e por novos modelos com atributos visuais e táteis, e outras diferentes associações: secadores de cabelos do Snoopy para crianças; mi-

Figura 2.12 – Evolução de materiais: secador de cabelos

Do ferro fundido ao aço prensado aos polímeros moldados por injeção.

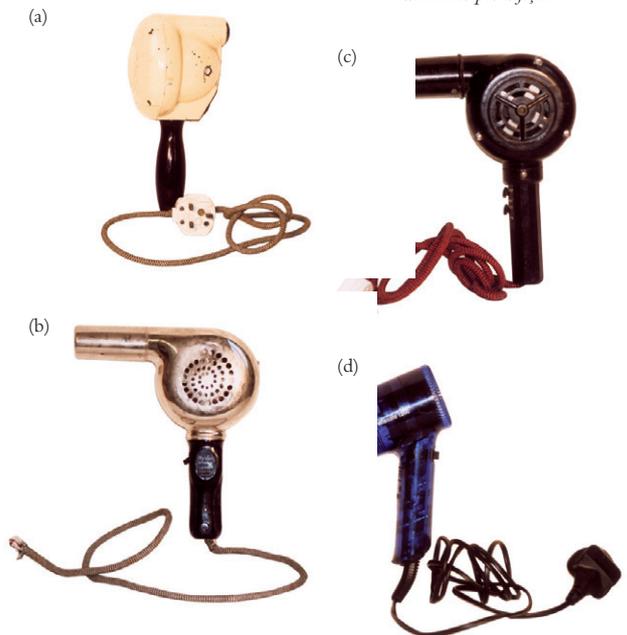


Figura 2.13 – Os primeiros carrinhos de bebês

(a) Silver Cross Balmoral.
(b) Carrinho dobrável. (c e d) Carrinhos esportivos.

(a)



(b)



(c)



(d)



niaturas de secadores para esportistas e pessoas que viajam muito, porque pesam bem menos do que se espera. Em cada caso, materiais e design de produto habilitam avanços tecnológicos e conquistam a atenção do consumidor, bem como aumentam a participação de mercado.

Materiais e sociedade

Carrinhos de bebês

A empresa britânica Silver Cross fabrica carrinhos de bebês desde 1877. Os “perambuladores” eram pequenas carruagens, *Bentleys* para bebês, destinadas a famílias que podiam pagar uma babá para passear com a criança no parque em vez de

elas mesmas o fazerem. Os modelos tinham nomes como *Fleur de Lis* (símbolo dos reis da dinastia francesa dos Bourbon) e *Silver Cross Balmoral* (um dos castelos da rainha da Inglaterra). Observe o exemplo na Figura 2.13a: grandes rodas sobrepostas conectadas a enormes feixes de molas, ligados por tiras de couro, a uma carruagem cuja estrutura é de madeira, feita a mão, com longarinas da capota e guidão copiados diretamente dos tálburis *Hansom* da época de *Sherlock Holmes*.

A empresa original sobreviveu à austeridade que se seguiu à Segunda Guerra Mundial, mas requereu concordata em 2002. Famílias que não têm babás precisam de transporte de bebês ao alcance de seu orçamen-

to, um transporte que ainda possa carregar compras e ser dobrável para caber no porta-malas do carro ou no vestíbulo de uma casa pequena. O produto evoluído (Figura 2.13b) é mais baseado nos carrinhos de supermercado do que nos tîlburis Hansom: rodas minúsculas, estrutura de aço tubular, bandeja aramada.

Em meados da década de 1980, a percepção da paternidade compartilhada entrou no mundo dos fabricantes de carrinhos de bebês. Fazer compras com bebês deixou de ser privilégio exclusivo da babá ou da mamãe. Adicione a isso a liberdade que o crescimento da renda tinha dado para passar férias em lugares interessantes e participar de esportes excitantes. Então surgiu a necessidade de um carrinho que atraísse a população masculina tanto — ou mais — quanto a população feminina. Dois modelos atuais que buscam satisfazer essa necessidade são mostrados na parte inferior da figura. Construção robusta, pneus notáveis, cabos de freio, rodas fáceis de saltar originam-se do projeto da *mountain bike*; a estrutura leve e o material resistente são derivados das mochilas usadas para escalar o Himalaia; as cintas que prendem o bebê são baseadas nas utilizadas em carros de Fórmula 1. Tudo isso foi testado “em campo para atender às condições mais exigentes”. As metáforas são eficientes. São modelos como estes que agora dominam o mercado.

Implícitos a essas qualidades estão os materiais que foram usados para criar a personalidade de cada produto. O revestimento interno de seda e o corpo de madeira laqueada do carrinho Balmoral, com detalhes

de latão cromado e a utilização de couro e lona, evocam a tradição e a produção artesanal. A estrutura tubular de aço, a trama soldada e os pneus sólidos de borracha da cadeira dobrável são materiais de construção simples e fortes. As rodas de aros, a estrutura de alumínio e CFRP (Polímero de fibra de carbono reforçado) e o estofamento de náilon resistente dos carrinhos esportivos são o material de equipamentos usados ao ar livre, que podem ir a qualquer lugar e sugerem liberdade, saúde e atividade física.

Conclusões

Hoje, o design industrial está integrado ao processo de design da maioria dos novos produtos e, em um mundo de competição global, essa iniciativa faz sentido para os negócios. Em alguns produtos — óculos de sol, esquis, cafeteiras —, a influência do designer industrial é mais obviamente central do que em outros — lâmpadas, ferramentas de máquinas, motores a jato —, mas mesmo assim pode ser encontrada. Na próxima vez que você sair de um avião, repare no logo discretamente visível da Pratt e Whitney ou da Rolls Royce na carlinga do motor — não aparecem ali por acaso. Resumindo: o projeto técnico e o design industrial são partes essenciais e complementares de *qualquer* projeto.

Este livro procura estudar o papel que os materiais podem desempenhar no equilíbrio entre projeto técnico e design industrial e na seleção de materiais no design de produto em si.

Leitura adicional

Abernathy, W. J. e Clark, K. B. “Innovation: Mapping the Winds of Creative Destruction”, *Research Policy*, n. 14, pp. 3–22, 1985. (O “mapa de transilência” desenvolvido pelos autores tornou-se um método aceito para analisar inovações.)

Ashby, M. F. *Materials and the Environment*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009. (Texto didático que apresenta recursos — históricos, métodos, dados — que possibilitam a introdução de questões ambientais em cursos sobre materiais.)

Bang & Olufsen. Catálogo de produtos e site: www.bang-olufsen.com, 2002. (Ilustrações de produtos da B&O e declaração da filosofia de projeto da empresa.)

Billington, D. P. *The Tower and the Bridge, New Art of Structural Engineering*. Princeton: Princeton University Press, 1985. (O professor Billington, engenheiro civil, argumenta que grandes estruturas — a ponte do Brooklyn, os arranha-céus de Chicago, os tetos de conchas de concreto de Pier Luigi Nervi — não apenas superam desafios técnicos, mas também atingem o estado de arte. Grande parte da obra é biográfica — as realizações de arquitetos estruturais individuais —, mas os comentários que permeiam o texto são convincentes e esclarecedores.)

Braun. Catálogo de produtos e site: www.braun.de, 2002. (Ilustrações de produtos da Braun e declaração da filosofia de design da empresa.)

Clark, J. P.; Roth, R. e Field, F. R. “Techno-economic Issues in Materials Science”, *ASM Handbook*, v. 20, Materials Park, Ohio, p. 255, 1997. (Os autores exploram métodos de análise de custo e valor e questões ambientais na seleção de materiais.)

Edwards, F. *Swatch, a Guide for Connoisseurs and Collectors*. Londres: Apple Press, 1998. (Documentação bem-escrita e fartamente ilustrada da história do projeto da Swatch, com mais de 300 exemplos, cada um com um breve comentário.)

Horgan, J. *The End of Science*. Londres: Abacus Books, Little, Brown Co., 1996. (Horgan argumenta que, em quase todos os ramos da ciência, a evolução ocorre nos detalhes, e não na descoberta revolucionária. Muitos discordam.)

Jordan, P. W. *Designing Pleasurable Products*. Londres: Taylor and Francis, 2000. (Jordan, gerente de estética de produtos da Philips Design, argumenta que hoje os produtos devem dar prazer. Grande parte do livro é uma descrição de métodos de pesquisa de mercado, como entrevistas, questionários, estudos de campo e grupos de foco, que tentam trazer à tona a reação dos usuários aos produtos.)

Pye, D. *The Nature and Aesthetics of Design*. Connecticut, EUA: Cambium Press, 1997. (Livro dedicado à compreensão do design, com foco particular no projeto mecânico. Descreve-se o papel da estética, mas não há nenhuma referência específica a materiais.)

Schmidt-Bleek, F. *How Much Environment Does the Human Being Need – Factor 10 – The Measure for an Ecological Economy*. Munique: Deutscher Taschenbuchverlag, 1997. (O autor argumenta que a verdadeira sustentabilidade requer uma redução de um décimo do consumo de energia e de recursos por parte das nações desenvolvidas.)

Von Weizsäcker, E.; Lovins, A. B. e Lovins, L. H. *Factor Four*. Londres: Earthscan Publications, 1997. (Primeira publicação a adotar o ponto de vista perturbador, mas defensável, de que a sustentabilidade exige mudanças massivas no comportamento e no consumo humanos.)

Capítulo 3

Design e planejamento



Na língua italiana há uma única palavra para “design” e “engenharia”: *la progettazione*;¹ um designer ou um engenheiro é *il progettista*. Traduzido literalmente, *il progetto* significa “projeto”. Também nas línguas inglesa e portuguesa, a palavra “design” é definida como “projeto”, com uma gama de significados ainda mais ampla, como quando referida à moda (por exemplo, design de chapéus) ou à aerodinâmica e a fluidos (por exemplo, design de pás de turbinas) ou até mesmo design com apelo emocional². Tal abrangência de significados cria oportunidades para confusão*. Para evitá-la, usaremos as expressões *projeto técnico*, *design industrial* e *design de produto*, com o sentido explicado a seguir.

Projeto técnico (ou de engenharia) inclui os aspectos de design que levam em conta a técnica adequada de funcionamento do produto: seu desempenho mecânico e térmico, custo e durabilidade. Tais características serão denominadas coletivamente como atributos técnicos do produto — atributos que descrevem como ele funciona e como é feito. O **design** (projeto, ou ainda desenho) **industrial** inclui os aspectos do projeto que levam em conta atributos visuais e táteis, associações e percepções, antecedentes históricos — atributos que descrevem uma personalidade ou caráter. O **design** (ou projeto) **de produto**, no sentido que utilizamos aqui, significa a síntese do projeto técnico e do design industrial para criar produtos de sucesso.

Há um risco em se fazer essas distinções entre projeto técnico e design industrial como atividades separadas, não interligadas. Uma visão mais equilibrada é que formam um contínuo; que são apenas partes do processo de um projeto global. Porém, enquanto o projeto técnico utiliza métodos bem-estabelecidos e ferra-

mentas sofisticadas baseadas em computador, não é tão fácil transformar o design industrial em algo sistemático ou quantitativo. Diferentemente dos atributos técnicos, que são absolutos e especificados com exatidão, diversos atributos do design industrial dependem da cultura e da época: o ideal de beleza japonês é diferente do europeu; e o que é bonito para uma geração pode parecer feio para a seguinte. A linguagem e o pensamento científicos e técnicos funcionam bem quando as ideias podem ser expressas de modo explícito e com precisão, mas nada valem quando as ideias são imprecisas ou envolvem apreciação ou preferência subjetiva; em tais casos, são necessários outros modos de pensar.

Modos de pensar

O projeto técnico depende do raciocínio dedutivo — o modo de pensar baseado em lógica e análise. O raciocínio dedutivo, aplicado à seleção de materiais, é descrito com mais detalhes no Capítulo 7. Ele se presta à formulação como um conjunto de

1. Adaptado do notável livro de Manzini, *The Material of Invention*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1989.

2. “Não desenhe roupas; desenhe sonhos” (Ralph Lauren, *New York Times*, 19 abr. 1986).

* A partir da década de 1990, no Brasil, os dicionários incluíram o termo inglês “design” pelo fato de não existir outra palavra, em português, tão abrangente para as atividades de projeto de produto, planejamento, desenho — no mais amplo sentido da palavra. (Nota da revisão técnica — doravante N.R.T.)

etapas, que muitas vezes envolvem análise matemática. Ao contrário, o design industrial depende de raciocínio indutivo — síntese extraída de experiência prévia. Métodos indutivos para seleção de materiais, também estudados no Capítulo 7, utilizam percepção e visualização. Precisamos explorá-los mais profundamente, já que são fundamentais para a discussão que virá em seguida.

Observação e percepção

Imagine que você está em uma feira comercial de motocicletas atrás de dois homens que examinam uma Harley Davidson (Figura 3.1). A Harley tem atributos técnicos descritos em sua especificação: peso, número de cilindros, potência, velocidade máxima, material usado na estrutura — esses e muitos outros atributos podem ser definidos com precisão e medidos com exatidão. A Harley também tem atributos estéticos — é preta, metálica e barulhenta. Os dois homens veem a mesma motocicleta, mas a percebem de maneira diferente. A mente de um deles vê a imagem ideal de uma motoneta urbana, amarela e macia, de linhas elegantes e no estilo da moda, sem partes mecânicas visíveis; ele nota que a Harley é pesada, extravagante e perigosa. A imagem ideal na mente do outro é a de uma estrada deserta, vestimenta de couro negro, capacete com

visor escuro, dois canos de escape; ele nota que a Harley é poderosa e impositiva, a própria expressão de liberdade.

Percepção é o resultado da interpretação daquilo que é observado. Dois observadores do mesmo produto o perceberão de maneiras diferentes, que resultarão da reação de cada um ao objeto físico que veem e às imagens e experiências mentais acumuladas que levam com eles. Ambas, observação e percepção, contribuem para a criatividade em design, e aqui é necessário aprimorar a definição de quatro termos que usaremos para descrever, em ordem crescente de abstração, os atributos de produtos — em particular os que se referem ao design industrial e à personalidade de um produto.

- *Atributos estéticos* são aqueles relacionados diretamente aos sentidos: visão, tato, gosto, olfato e audição; o sentido da visão inclui a forma, a cor e a textura de um material ou produto.
- *Atributos de associação* são aqueles que remetem a uma época, lugar, evento, pessoa ou cultura. Portanto, o jipe é associado a militares; o ouro, à riqueza; a cor preta, à morte (na cultura Ocidental); a cor vermelha, à paixão.
- *Atributos percebidos* descrevem a reação a um material ou produto — que ele é sofisticado, moderno ou engraçado, por exemplo; essas reações são a soma do que você percebe a princípio, e são muito influenciadas por contexto e experiência.
- *Atributos emocionais* descrevem a sensação que um material ou produto provoca em você: felicidade, tristeza, ameaça talvez — “ergonomia emocional”, nas palavras de

Figura 3.1 – Percepções diferentes

(Imagem por cortesia da Harley Davidson (EUA) e Piaggio Corporation.)



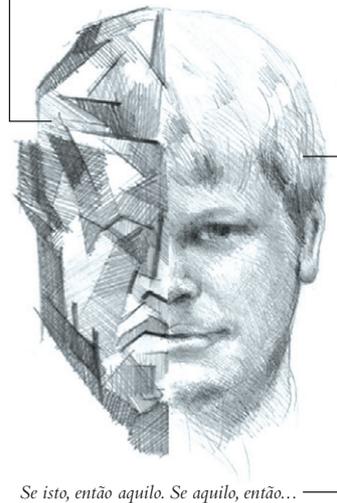
Richard Seymour, cofundador da SeymourPowell, em Londres, uma das mais reconhecidas agências de design no mundo.

A esses atributos adicionamos a ideia de estilo, com base na história do design. Estilos têm nomes: *art nouveau*, *art déco*, modernista, pós-moderno etc. Cada um deles é, por assim dizer, a síntese de um agrupamento particular — a respeito do qual existe uma concordância geral — de atributos e associações estéticos, percebidos e relacionados à emoção. Às vezes, estilos de design estão ligados a certos materiais, mas não se pode dizer que um material tem estilo; apenas que adquire um estilo quando se torna parte de certo produto. Exemplos desenvolvidos mais adiante neste capítulo e no seguinte esclarecerão melhor essas distinções.

Raciocínios verbal-matemático e visual

Escritores como McKim,³ quando discutem as diferentes maneiras como o cérebro humano manipula informações para raciocinar, distinguem dois processos bastante diferentes (Figura 3.2). O primeiro, que é o domínio do hemisfério esquerdo do cérebro, utiliza raciocínio verbal e procedimentos matemáticos. Passa do conhecido para o desconhecido por análise — um caminho essencialmente linear, sequencial. O segundo, que é o domínio do hemisfério direito, utiliza imagens — tanto lembradas como imaginadas. Cria o desconhecido do conhecido por síntese — dissecando, recombinao, permutando e dando forma a ideia e imagens. O primeiro modo de pensar, o raciocínio verbal-matemá-

Algo parecido com isso aqui, mas com uma característica como aquela ali, e com um pouquinho desta, mas um pouco mais parecida com aquelas...



Se isto, então aquilo. Se aquilo, então...

Figura 3.2 – Lados esquerdo e direito do cérebro

Pensar com o lado esquerdo ou com o lado direito — o primeiro procura soluções por lógica e análise; o segundo busca soluções por sintetização de elementos de imagens ou analogias lembradas ou imaginadas.

co, é baseado em regras de gramática e lógica aprendidas. O segundo, o modo visual, faz maior uso da imaginação; é menos estruturado, mas permite maiores avanços conceituais por meio da livre associação.

Pense um pouco no seguinte exemplo sobre o modo como você armazena informações visuais. Provavelmente você conhece e reconhece várias centenas de pessoas, talvez muito mais. Se alguém lhe pedisse que fizesse um desenho reconhecível de qualquer uma delas, você conseguiria? A maioria das pessoas não; muitas não conseguem sequer evocar a imagem de um rosto com os “olhos da mente” (a imaginação). Isso sugere que o modo de armazenar a imagem visual é bastante rudimentar. Apesar disso, se você encontrasse inesperadamente uma pessoa que conhece, digamos, no aeroporto, de imediato a distinguiria das milhares de outras pessoas que ali estão. Reconhecer um rosto

3. O livro de McKim, *Experiences in Visual Thinking (1980)*, explica melhor do que a maioria a maneira como as imagens entram no processo do pensamento criativo.

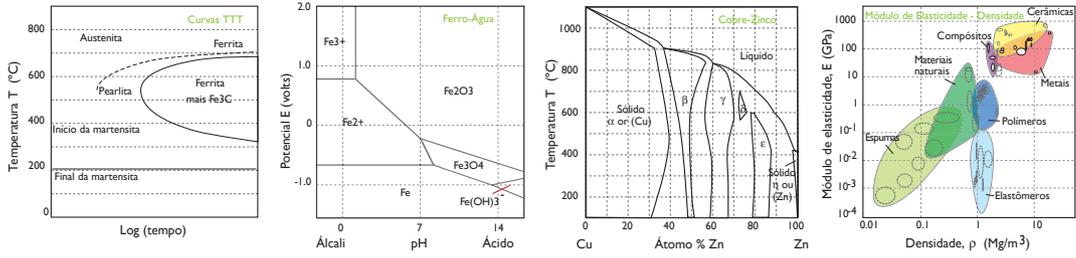


Figura 3.3 – Imagens da ciência de materiais

Alguns exemplos de como as imagens visuais ocorrem na ciência de materiais (da esquerda para a direita): eletromicrografias; micrografias óticas; diagramas de fase; mapas de mecanismos de deformação; diagramas de propriedades de materiais.

ou lugar requer uma comparação detalhada de uma imagem visual com uma imagem armazenada na mente, procurando por uma combinação de um tipo muito sutil — e o indivíduo comum pode armazenar informações suficientes para reconhecer e distinguir não apenas uma pessoa, mas centenas delas. O modo como a mente armazena imagens não está muito claro, mas é evidente que seu banco de dados de imagens é muito grande e, quando acionado, é capaz de acessar tais imagens mentais de maneira rápida e com grande precisão.

Criatividade no projeto (tanto de engenharia quanto de design) envolve a livre associação e combinação de imagens para conseguir um conjunto de atributos desejados. As imagens podem ser visuais — objetos, fotografias, esboços e desenhos observados — ou mentais — armazenadas na memória e na imaginação do designer.

Pensamento visual na ciência dos materiais

A palavra “ciência” sugere imediatamente raciocínio dedutivo — análise. Mas cientistas criativos, de Leonardo da Vinci e Newton a Einstein e Crick/Watson, afirmam que seus momentos de grande percepção surgiram tanto da síntese — pensamento visual — quanto da análise. A ciência de materiais, em particular,

faz uso de imagens para comunicação e como modo de pensar (Figura 3.3). Diagramas de Venn e fluxogramas ilustram relações e procedimentos; gráficos de barra e grafos mostram magnitudes e tendências numéricas. Desenhos esquemáticos ilustram estruturas moleculares e mostram como mecanismos e equipamentos funcionam.

Informações podem ser melhor apresentadas em diagramas e imagens que mostram relações. Diagramas de fase demonstram regimes de estabilidade de ligas concorrentes. Micrografias revelam semelhanças estruturais entre materiais diferentes, sugerindo, por exemplo, que um tratamento térmico usado para um deles poderia ser efetivo para outro. Mapas de mecanismos de deformação relacionam regimes de dominância de mecanismos de deformação concorrentes. Diagramas de propriedades de materiais⁴ relacionam um conjunto de materiais no espaço material-propriedade, um espaço com muitas dimensões. Cada um destes abrange uma vasta quantidade de informações e as comprime em uma única imagem, revelando padrões nos dados que palavras e equações não revelam. É aqui que os diagramas se tornam uma ferramenta não apenas de comunicação, mas também de raciocínio.

4. Esses diagramas, usados extensivamente no livro, serão apresentados no Capítulo 4.

O poder da imagem visual encontra-se na facilidade com que ela pode ser manipulada pela mente e na capacidade que tem de acionar o pensamento criativo. A foto de uma lanterna traseira de automóvel feita de acrílico, tirada para mostrar sua transparência e capacidade de ser colorida, revela muito mais: que pode ser moldada em uma forma complexa; que pode suportar água e óleo; e que é robusta o suficiente para enfrentar a utilização nas ruas sem proteção. Em particular, diagramas que mostram relações têm o poder de despertar novas ideias — exemplos no Capítulo 4 mostrarão como o fato de montar um gráfico com informações sobre materiais pode sugerir compósitos e combinações de materiais inovadores. Sem a imagem visual, essas ideias não seriam tão facilmente autossugestivas.

Portanto, comunicação visual e raciocínio ocupam um lugar há muito tempo definido no mundo da ciência de materiais. Mas como são usados em design? Para responder a

essa pergunta, temos de examinar o processo do design propriamente dito.

O processo do design de produto

Primeiro, uma palavra sobre tipos de design. O design inovador (ou original) parte de uma ideia ou princípio de funcionamento genuinamente novo: a lâmpada, o telefone, a caneta esferográfica, o disco compacto (CD), o telefone móvel (celular). Com mais frequência, o design é adaptativo: aproveita um conceito existente e busca um avanço incremental no desempenho por meio de refinamento.

O ponto de partida do design de um produto é uma necessidade de mercado ou uma nova ideia; o ponto final é a especificação completa de um produto que atenda à necessidade ou personifique a ideia (Figura 3.4). É essencial definir a necessidade com precisão, isto é, formular uma declaração de necessidade, ou diretrizes básicas do projeto, acompanhada de uma lista de

Figura 3.4 – Materiais no processo de design

O projeto de um produto começa com a identificação e o esclarecimento da tarefa e prossegue com o conceito, desenvolvimento e projeto detalhado, até a especificação de um produto final. A princípio, todos os materiais (existem, talvez, 100 mil no total) são candidatos. Restrições técnicas (no centro) e restrições do projeto industrial (à direita) reduzem a escolha e resultam em um pequeno número que pode ser explorado detalhadamente.



requisitos do produto, ambiente esperado de utilização e possíveis consumidores.** Autores de livros sobre design de produto enfatizam que a declaração deve ser neutra em relação à solução (ou seja, não deve dar a entender como a tarefa será executada), para evitar que o raciocínio seja cerceado e limitado por concepções prévias.

Entre a lista de diretrizes básicas do projeto (*briefing*) e a especificação final do produto há muitas etapas. Uma maneira de modelar esse processo de desenvolvimento do projeto é mostrada na coluna da esquerda da Figura 3.4. Nessa perspectiva, o processo tem três etapas gerais: design conceitual, desenvolvimento do projeto e projeto detalhado.⁵

O conceito apresenta o modo como o produto atenderá a necessidade, o princípio de funcionamento. Nessa etapa, o designer considera a gama de ideias mais ampla possível, tanto técnicas quanto estéticas. A escolha do conceito tem implicações para a configuração global do projeto, mas deixa decisões sobre material e forma em grande parte sem resposta.

O próximo estágio, desenvolvimento, considera cada conceito promissor e o desenvolve, bem como analisa sua operação e explora escolhas alternativas de materiais e processos que permitirão uma operação segura nos quesitos cargas, temperaturas e ambientes previstos. Em paralelo são exploradas formas, cores e texturas alternativas, procurando, da maneira descrita no Capítulo 6, materiais e processos capazes de criá-las.

O desenvolvimento termina com um design viável que então passa para a fase de detalhamento. Nessa fase são criadas especificações para cada

componente; componentes críticos são submetidos a análises mecânicas ou térmicas precisas; métodos de otimização são aplicados a componentes e grupos de componentes para maximizar desempenho e os custos são analisados. Modelos de superfície em três dimensões são usados para desenvolver a forma, e então é feita a escolha final de geometria, material, processo de fabricação e superfície. O resultado desse estágio é uma especificação detalhada do produto.

Nessa linha de pensamento, o designer precisa de informações sobre materiais em cada estágio do projeto (Figura 3.4). Em termos de nível de precisão e amplitude, a natureza da informação necessária nos primeiros estágios é muito diferente da que será necessária mais adiante. No projeto conceitual, o designer precisa de informações genéricas — rascunhos de caráter abrangente — para a faixa de materiais mais ampla possível. Todas as opções estão em aberto: um polímero pode ser a melhor escolha para um conceito, um metal para outro, ainda que a função requerida seja idêntica. A necessidade, nesse estágio, não é de precisão; é de amplitude e facilidade de acesso: como a vasta gama de materiais pode ser apresentada a fim de dar ao designer a maior liberdade possível para considerar alternativas?

A próxima etapa de desenvolvimento requer informações para um subconjunto desses materiais, porém com um nível mais alto de precisão e detalhe. Atributos técnicos são encontrados em manuais mais especializados e softwares que tratam de uma única classe de materiais e propriedade — resistência de metais à corrosão, por exemplo —, e permitem a escolha

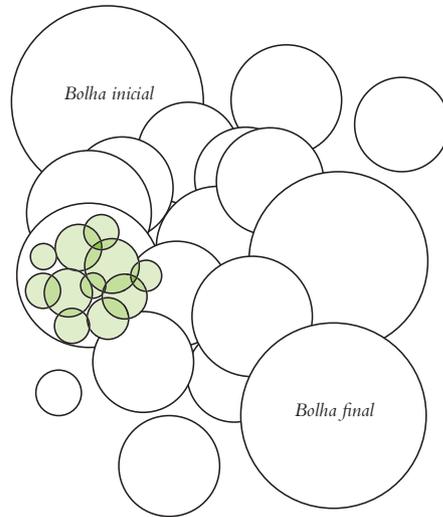
** No Brasil adotamos o termo inglês *briefing* para esse elenco de especificações de projeto. [N.R. T.]

5. Aqui usamos as palavras de um respeitado livro didático sobre projeto (Pahl e Beitz, 1997); muitos outros seguem essa influente obra sobre projeto (ou *design*) técnico.

em um nível de detalhamento que não é possível no caso de compilações mais abrangentes que incluem todos os materiais. Os atributos de materiais relevantes para o design industrial são reunidos e apresentados de modo diferente — ideias extraídas de outros projetistas e produtos, estudo de coleções de materiais, montagem de painéis semânticos,^{***} utilização de outros recursos de criatividade, elaboração de desenhos esquemáticos e construção de modelos. Voltaremos a todos esses tópicos logo adiante.

O estágio final do projeto detalhado exige um nível de precisão e detalhe ainda maior, mas para apenas um material, ou para um número muito pequeno de materiais — informações que são mais fáceis de encontrar entrando em contato com o fornecedor. Determinada categoria de um material (polipropileno, por exemplo) tem uma faixa de propriedades que se deve a diferenças no modo de fabricação de cada fornecedor. E, às vezes, nem mesmo isso é suficiente. Se o componente é crítico (o que significa que, em caso de falha, em um sentido ou outro, seria desastroso), talvez seja prudente realizar testes por conta própria para medir propriedades críticas, usando uma amostra do material que será utilizado para fabricar o próprio produto. A etapa final é testar protótipos em escala natural para garantir que o projeto atenda às expectativas técnicas e estéticas do cliente.

Os insumos fornecidos pelos materiais ao design não terminam com suas especificações para o produto e produção final. Produtos falham em serviço, e as falhas contêm informações. É imprudente o fabricante que não coleta e analisa dados sobre falhas.



Muitas vezes esses dados indicam a má utilização de um material, que pode ser eliminada com um novo projeto ou uma nova seleção de material mais apropriado para essa aplicação.

Há muito a dizer em favor desse modelo estruturado de design. Sua formalidade atrai os projetistas técnicos, treinados em métodos sistemáticos para enfrentar problemas de análise de tensão ou fluxo de calor. Mas o grau de interdependência em design é muito maior do que o de análise de tensões, de modo que o design requer habilidades adicionais, mais próximas às de um advogado ou político experiente — exercitadas na montagem e no rearranjo de fatos e no julgamento de similaridades, diferenças, probabilidades e implicações. Para o design — e em particular para o papel dos materiais no design — esse modelo talvez seja muito estruturado. Não permite a variedade de caminhos nem influências que se encontram entre a necessidade do mercado e a especificação do produto.

Ken Wallace, tradutor do modelo conceito/desenvolvimento/projeto

Figura 3.5 – Bolhas no processo de design

Analogia para o processo de design. Adaptada de Wallace (1991), em *Research in Design Thinking*, conferência realizada na Technical University of Delft em 1991.

^{***} Painel semântico: Representação gráfica, em um quadro, feita por meio de colagem de imagens, fotografias, cores, tecidos, texturas, frases que relatam um estado de espírito, sentimento ou conceito. São muito utilizados em design, moda e em publicidade. [N.R. T]

detalhado do original alemão, sugere uma outra analogia: a das bolhas (Figura 3.5).

Nesse modelo, cada bolha representa uma etapa no processo do design ou o resultado de tal etapa. Não há um caminho linear desde as “diretrizes iniciais de design” até a “especificação final do produto”; em vez disso, muitos caminhos ligam as milhares de bolhas que se encontram entre elas. É importante entrar na bolha inicial para enfrentar o problema. Mas não há nenhum caminho identificado desde essa bolha até a bolha final, e é sempre possível que outras bolhas venham a ter influência significativa. O modelo das bolhas é mais representativo de um processo de projeto aleatório e não estruturado. Os designers mais eficientes podem mergulhar nas bolhas e ter os recursos adequados para enfrentar quaisquer desafios que possam surgir. Ficar preso a uma bolha — a fraqueza do especialista — é fatal. O progresso requer a habilidade de recuar, ver as bolhas como padrão e também como fontes de informação detalhada, exercer controle do padrão e só lançar mão do detalhe quando necessário. Isso está mais próximo da nossa visão de seleção de material no que tange ao processo de design, conceito que será expandido no Capítulo 7, quando detalharemos métodos de seleção.

bem; mas também é possível comercializar com sucesso uma que custe mais de \$2 mil. Canetas são exemplos de produtos que combinam aspectos técnicos e estéticos de modo particularmente efetivo. Aqui examinaremos de maneira breve o design de canetas.

Conceito original

Desde que o homem inventou a linguagem escrita, existe a necessidade de deixar marcas precisas e duráveis em superfícies planas. Podemos fazer marcas com arranhões ou por meio de entalhes, mas é um processo muito lento; a real necessidade é de um instrumento compacto que faça marcas com rapidez. Marcar com pigmentos é a resposta.

A Figura 3.6 mostra quatro conceitos para fazer marcas com pigmentos. No conceito exemplificado em (a), as marcas são transferidas pelo atrito de pigmentos sólidos como carvão, grafita ou creiom (pigmento colorido à base de cera ou giz). No conceito mostrado em (b), um pigmento ou tinta à base de água é forçado a fluir sobre a superfície de um bico — uma pena de ganso cortada, ou algo equivalente em aço ou ouro — com utilização de tensão superficial para manter a tinta no bico e direcioná-la à ponta. O conceito em (c) também depende da tensão superficial — usa uma ponta de feltro ou náilon para sugar o pigmento de um reservatório e depositá-lo em qualquer superfície que tocar. O conceito final, mostrado em (d), faz com que um pigmento à base de óleo deslize sobre a superfície mediante uma pequena esfera cujo êxito depende da viscosidade e da boa capacidade umectante do óleo para transferi-lo à esfera.

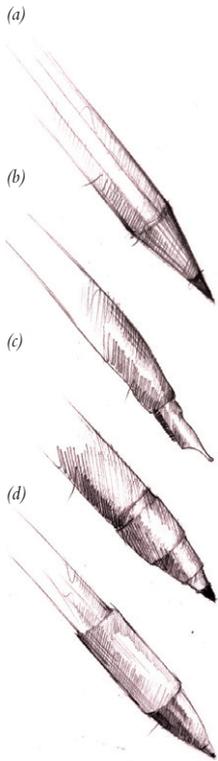


Figura 3.6 –
Conceitos de escrita

Desenhos esquemáticos de quatro conceitos para instrumentos de escrita:

- (a) transferência de pigmento sólido por desgaste;*
- (b) marcação pelo fluxo de tinta líquida através de um bico;*
- (c) marcação por transferência de um feltro ou náilon poroso; e*
- (d) transferência de tinta à base de óleo através de uma esfera rotativa.*

Design de canetas — exemplo

Para ilustrar essas ideias, considere o design de canetas. As canetas são objetos utilitários e também de desejo. É possível comprar por \$2 uma caneta que escreve perfeitamente



Figura 3.7 – Desenolvimento de uma caneta-tinteiro

Desenolvimento de uma caneta-tinteiro que mostra os princípios de funcionamento e o leiaute.

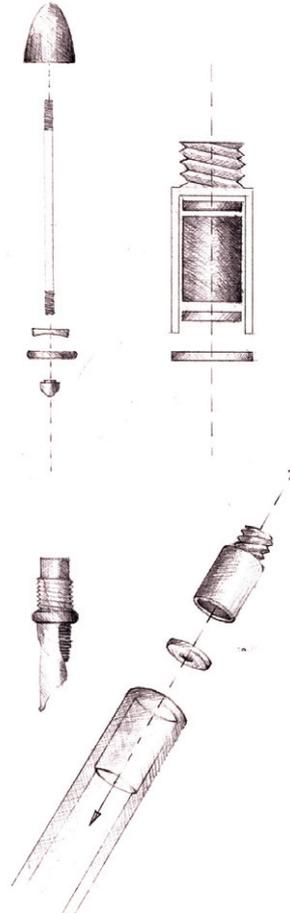


Figura 3.8 – Detalhe de uma caneta-tinteiro

Projeto detalhado: materiais, processos e dimensões são especificados para cada componente.

Todos esses métodos poderiam adquirir o pigmento mergulhando o bico ou a ponta em um recipiente com a tinta. Porém, para ser prática nos dias de hoje, uma caneta tem de ser capaz de escrever continuamente durante horas sem recarga, deve tolerar mudanças de temperatura e (pequenas) variações na pressão sem vazar tinta onde ela não é desejada.

Iteração e desenvolvimento

A Figura 3.7 mostra o desenvolvimento do conceito (b): é uma caneta alimentada por um reservatório de tinta. O diagrama é em grande parte

autoexplicativo. Um pistão bombeia a tinta para dentro do reservatório (funciona como uma bomba de encher pneu de bicicleta), que está ligado à parte de trás da caneta. Depois de cheio, o reservatório é fechado sobre o corpo da caneta por uma tampa rosqueada. A tinta chega ao bico (pena) da caneta por capilaridade e passa pelos canais recortados no tampão, encaixado na parte inferior da caneta (não mostrado).

Detalhes do projeto

Para projetar a caneta, é preciso fazer muitas especificações. A Figura

3.8 mostra parte das informações desenvolvidas durante o estágio do projeto detalhado: a análise de tensões onde necessário, a otimização de peso e equilíbrio, o dimensionamento preciso, a determinação do custo e, é claro, a escolha de materiais.

A invenção da ebonite (1841) — borracha vulcanizada com alto teor de enxofre — coincidiu com a invenção da caneta-tinteiro e provou ser um material quase ideal para o corpo, e que ainda hoje é ocasionalmente utilizado. A ebonite pode ser usinada, moldada e polida — sua bela cor negra faz dela uma base sofisticada para ornamentação em ouro e prata. A desvantagem é que é difícil conseguir outras cores, exceto a negra. Novas entrantes no mercado, que passou a ser competitivo de 1880 em diante, começaram a adotar o celuloide (composto de nitrocelulose e cânfora), que pode ser tingido com facilidade, é flexível e resistente, e permite efeitos especiais que imitam marfim, madrepérola e outros acabamentos. A baquelita (1910) mostrou ser muito frágil para a confecção de canetas, e só depois de 1950 é que houve uma mudança significativa. Porém, desde então, termoplásticos sintéticos que podem ser tingidos, padronizados e modelados com rapidez — notavelmente o acrílico — dominam o projeto de canetas. Podem ser feitas edições especiais com corpo de metal (aço inoxidável, titânio, prata), mas mesmo estas têm inserção de polímeros.

A predominância do ouro para penas de canetas surgiu porque as tintas antigas eram ácidas e atacavam a maioria dos outros metais. Mas o ouro, ainda que ligado, é relativamente macio e sofre desgaste em decor-

rência do atrito com o papel, que contém em sua composição materiais cerâmicos abrasivos. Isso resultou na inclusão de grânulos de ósmio e irídio — ambos muito mais duros do que o ouro — na ponta da pena, prática que se mantém até hoje. Em dias atuais, o desenvolvimento de tintas neutras permite a utilização de outros materiais, em particular o aço, ligado ou revestido, para evitar ferrugem.

Por que pagar \$2 mil por uma caneta quando você pode comprar uma que funciona muito bem por \$2 — que seja... por \$5? (Este livro foi escrito com uma caneta de \$5.) A história da escrita desperta diversas correntes de associações. Citaremos algumas: Escrever › ler › amor aos livros (“um lar sem livros é como uma casa sem janelas”). Escrever › aprender › sabedoria, liderança (“saber é poder”). Escrever › criatividade › reconhecimento artístico (“um homem de letras”). Escrever › convicções políticas › eminência política (“a caneta é mais poderosa do que a espada”). Escrever › livros e bibliotecas › riqueza pessoal (bibliotecas públicas são uma inovação comparativamente recente). Escrever › cartas › amizade, amor (“cartas — o elixir do amor!”).

Temos aqui uma mistura inusitadamente rica. As correntes de palavras interligadas despertam aspirações de grandes e diversos grupos de pessoas. Para quem as associações são aparentes, uma caneta que sugere discretamente a individualidade de seu proprietário vale muito mais do que \$5. Os fabricantes de canetas usaram e usam esse raciocínio (ou a própria versão dele) com ótimos resultados. A caneta como afirmação intelectual, ou como indicador de riqueza, ou bom gosto,



Figura 3.9 – Publicidade da caneta Bic

A mensagem publicitária é clara e se apoia na materialidade da caneta em si e no que o logo da Bic significa para as pessoas (fonte: www.adsoftheworld.com).

ou individualidade, ou jovialidade, ou diversão: são tentativas deliberadas de atrair consumidores por meio da personalidade do produto.

Agora podemos observar uma espécie de método em funcionamento, que envolve a seguinte cadeia de raciocínio. O produto tem uma função. Aqui: escrever. Quais são as associações que essa função transmite? Aqui: criatividade, talento artístico, refinamento, poder, riqueza, sofisticação. Quais dessas associações são vistas como atributos desejáveis de um indivíduo? Aqui: refinamento intelectual, realização artística, gosto sofisticado, liderança, riqueza. Quais aspectos — visuais, sugestões, referências estilísticas — podem ser aplicados ao produto para sugerir uma ou outra dessas associações? Materiais caros, ornamentação discretamente notável em prata, ouro ou esmalte, forma clássica, desenhos e cores que sugerem movimentos artísticos reconhecíveis, forma e superfície que lembram juventude, vigor físico e visão. O mesmo raciocínio motiva a

propaganda: a caneta vista na mão do papa ou de um ator famoso; a caneta em ambientes opulentos, cercada por objetos ornamentados como joias; a caneta pousada sobre uma partitura de música clássica. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram um exemplo, a caneta Bic, com mais detalhes.

O design de produtos no século XXI deve apresentar um misto de função, utilidade e personalidade. A primeira requer bom projeto técnico — os produtos devem funcionar adequadamente. A segunda é uma questão de fatores humanos ou ergonômicos — combinar o produto com as capacidades física e mental do usuário. A última é um composto de ambas e algo mais — o prazer oferecido pelo bom design industrial.



Figura 3.10 – A caneta e sua utilidade

Ladislav Biro, um húngaro, patenteou a caneta esferográfica em 1935. Mas ficou sem dinheiro e vendeu a ideia a Marcel Bich, que, em 1950, lançou a caneta Bic. Embora barata, sua forma, cor e textura foram muito bem elaboradas. O tubo transparente permite que se veja quanto ainda há de tinta; o formato hexagonal evita que a caneta role de cima da mesa; e a cor da tampa é igual à cor da tinta. Hoje a Bic Pen Company vende mais de 3 milhões de canetas por dia.

É papel dos designers cunhar essa personalidade de múltiplas facetas. Mas de onde eles tiram suas ideias?

Fontes de inspiração

Dizem que jornalistas nunca relaxam. Metade da mente deles está sempre alerta à possibilidade de surgir uma notícia logo ali na esquina. Se relaxarem, perderão a notícia — e, o que é pior, um outro jornalista pode consegui-la antes. Conversas com designers revelam uma síndrome semelhante: estão sempre alertas às possibilidades oferecidas por uma forma, uma textura, um material, uma

superfície, uma imagem que poderia ser apropriada em prol de um design inovador. É uma característica que não está restrita a designers de produto: designers de moda e arquitetos também usam o que observaram e a capacidade de manipular o que observaram como ferramenta criativa.

Designers industriais e engenheiros, assim como designers de moda e arquitetos, descrevem seu trabalho como “criativo”, dando a entender que suas melhores ideias foram geradas por eles mesmos, resultado de um tipo de inspiração. Porém, mesmo a inspiração tem suas fontes e métodos.⁶ Discussões com designers trazem à tona vários deles e enfatizam o papel central dos

6. “De onde arquitetos, projetistas e designers tiram suas ideias? A resposta, claro, é: principalmente de outros arquitetos, projetistas e designers.”

Quadro 3.1 – Museus de design e artes aplicadas

Museus de design são uma rica fonte de inspiração para designers.

País	Museu de design
Austrália	The Powerhouse Museum, Sidnei
Grã-Bretanha	The Design Museum, Londres The Victoria and Albert Museum, Londres The Science Museum, Londres
República Tcheca	Musée National des Techniques, Praga
Dinamarca	The Danish Museum of Decorative Art, Copenhagen Danish Design Centre, Copenhagen
França	Musée Nationale des Techniques, Paris Musée des Arts Décoratifs, Paris Musée National d'Art Modern, Paris The Musée d'Orsay, Paris Fondation National d'Art Contemporain, Paris
Alemanha	Das Deutsche Museum, Munique Vitra Design Museum, Weil am Rhein
Holanda	The Stedijk Museum, Amsterdã The Booymans van Beumijzen Museum, Roterdã
Itália	Sandretto's Plastics Museum, Pont Canavese
Suécia	The Form Design Center, Malmo
Suíça	Design Collection, Museum für Gestaltung, Zurique
Estados Unidos	The Smithsonian Museum, Washington, D.C. Museum of Modern Art (Moma), Nova York The National Academy of Design, Nova York Cooper-Hewitt, Nova York

materiais e processos de produção em cada um. Apresentaremos alguns.

Revistas de design, relatórios anuais, exposições em museus e feiras comerciais

Revistas de design⁷ e relatórios anuais⁸ ilustram produtos inovadores, acompanhados de uma breve descrição que cita o nome do designer e — às vezes — os materiais. Anuários de design⁹ fazem mais ou menos a mesma coisa, mas dedicam mais espaço ao histórico e aos antecedentes do design, à motivação e à descrição de características, muitas vezes aprofundadas por entrevistas com os próprios projetistas ou designers. Folhear essas publicações pode despertar a inspiração, mas a natureza das informações que contém, em grande parte não estruturadas, dificulta sua utilização de modo eficiente. A maioria dos designers também busca ideias em uma faixa mais ampla de fontes que abrange revistas de moda, arquitetura e design como *Vogue*, *Domus* e *Wallpaper*. Exposições de design¹⁰ apresentam aos visitantes ricas fontes de ideias extraídas de vários setores de produtos, que muitas vezes sugerem a utilização de materiais em um produto para obter impressão tátil, textura, cor ou associação particulares. Museus de

design e artes aplicadas (Quadro 3.1) registram a história e a inovação do design, combinando exposições permanentes com temporárias e programas educacionais. Por fim, há feiras comerciais, como a Hanover Trade Fair, a Polymer Tradeshow — K — em Düsseldorf e a Feira de Móveis de Milão; cada uma age como uma vitrine para materiais e design contemporâneos.

Coleções de amostras de materiais

Muitos decoradores e designers montam coleções de materiais — não apenas metais, plásticos e cerâmicas, mas também tecidos, acabamentos, revestimentos e peças — que foram produzidos de diferentes modos (Quadro 3.2). A natureza física das amostras é o ponto fundamental: novas ideias — inspiração — podem surgir com mais rapidez pelo manuseio (e não apenas visualização) de um material. Materiais conhecidos transmitem associações que derivam de seu uso tradicional: madeira polida — a atmosfera de calor, civilização, luxo discreto; alumínio escovado — o senso de clara precisão mecânica, e assim por diante.

Mas a utilização de materiais conhecidos de um modo não conhecido também é uma etapa criati-

7. A ID Magazine é um bom exemplo.

8. Veja, por exemplo, Byars (1995, 1997a, 1997b, 1998).

9. The International Design Year Book (1998, 1999); The ID Magazine Annual Design Review (1998, 1999, 2000).

10. Veja, por exemplo, o catálogo da exposição do Moma, *Mutant Materials* (Antonelli, 1995), ou a que foi montada pela Material Connexion, denominada *Materials and Ideas for the Future* (Arredo, 2000).

Quadro 3.2 – Coleções de materiais

Coleções vêm e vão. As apresentadas nesta lista estavam em vigor na época da redação deste livro.

Coleção de materiais	Base	Endereço
Material ConneXion	Nova York	www.materialconnexion.com
Materials library	Londres, Reino Unido	www.materialslibrary.org.uk
Central Saint Martins College	Londres, Reino Unido	www.arts.ac.uk
Mátério	Paris, França	www.materio.fr
Rematerialise	Kingston, Reino Unido	www.kingston.ac.uk
Materia	Holanda	www.materia.nl
Modulor	Alemanha	www.modulor.de



Figura 3.11 – Painel semântico

Painel semântico para caneta à prova d'água — projetada para ser usada na praia, tem forte associação com o estilo de vida do surfe.

va. Em particular, novos materiais agem como gatilhos do pensamento inventivo, oferecendo potencial para o design inovador. É nesse caso que manter uma coleção de materiais torna-se um desafio. Grande parte do desenvolvimento de materiais é impulsionada pela necessidade técnica e não por motivos de design industrial, e o resultado é que as informações não chegam com rapidez ao designer. Existem serviços de informações de materiais¹¹ que mantêm grandes coleções de amostras e oferecem acesso a imagens e fornecedores pela web, mas não muito mais do que isso (Quadro 3.2). Há necessidade de uma coleção de amostras acessível com links da imagem e do fornecedor para um arquivo mais amplo de dados estéticos e técnicos. Voltaremos a essa questão mais adiante neste livro.

Histórias visuais

Designers contam histórias para se inspirar, inspirar outros designers, clientes e pessoas que poderiam comprar seja qual for o produto que estejam desenvolvendo. Essas

histórias normalmente são representadas por uma coleção personalizada e focada de imagens, vídeos ou símbolos, realçados por uma coleção de amostras de cores, texturas ou materiais. Amostras de materiais, cores e texturas são escolhidas porque têm características — capacidade de serem formadas, de aceitarem acabamento, de evocarem uma associação ou emoção — que podem contribuir para o design. Imagens de produtos que têm características como as que o designer procura, e imagens do ambiente e do contexto no qual o produto será usado, agem como gatilhos do pensamento criativo. Não é incomum que um designer, confrontado pelo desafio de moldar o caráter de um produto, primeiro compre e disseque exemplos de qualquer produto que tenha uma característica — um acabamento de superfície, uma associação, um estilo — passível de ser explorada de uma nova maneira. Visualmente, esses exemplos são montados como uma colagem, ou painel semântico (Figura 3.11), que age como um acionador de ideias na escolha de materiais, bem como na sua justaposição. Também nesse caso, o ponto de partida é o material e o modo como é usado; a etapa criativa é a de transformá-lo no contexto do novo produto.

Recursos para inspirar a criatividade

Existem técnicas para inspirar criatividade, embora seja bom dizer que há opiniões divergentes sobre seu valor. O *brainstorming* (livre associação de ideias) recorre à dinâmica de grupo que surge quando os participantes expressam seus pensamentos, por mais malucos que sejam, e deixam qual-

11. Um exemplo é o serviço oferecido pela Material Connexion, www.materialconnexion.com

quer julgamento de valor para o final do processo. A ideia maluca de uma pessoa pode estimular uma solução prática em outra: “tacos de golfe são feitos de titânio; tacos de golfe são balançados; será que balanços de parques infantis poderiam ser feitos de titânio?”

O humor também desempenha um papel significativo. Uma piada que seja boa depende de um salto criativo, um resultado inesperado, que se desvia do raciocínio normal. Ela troca os pontos, por assim dizer, e desvia o pensamento dos trilhos usuais rumo a uma nova trilha. É a criatividade de uma boa piada que dá prazer, que provoca o riso. Contar uma piada cria um ambiente apropriado para o pensamento criativo. Para funcionar, as seções de *brainstorming* devem ser divertidas e curtas — a experiência sugere que, se durarem mais do que 20 minutos, deixam de ser produtivas.

A técnica da sinética toma um problema de design conhecido e o transforma em algo estranho, colocando-o em outro contexto; então procuram-se soluções para essa situação e algumas delas são transferidas para o problema original: “precisamos de uma solução de material que seja forte, flexível e leve — como o bambu que cresce e se torna forte, flexível e leve. Podemos imitar esses atributos?”.

O mapa mental é um tipo de *brainstorming* personalizado no qual as ideias são escritas em uma página e associadas conforme for adequado; essas associações são usadas para estimular mais pensamentos: “madeira... células... sólidos porosos... espumas... espumas de metal... espuma de titânio...?”.

E, por fim, a improvisação, uma técnica de teatro, pode ser usada para inspirar novas ideias; no estágio de

projeto, uma associação aleatória de materiais e produtos às vezes pode dar um resultado inovador.

Esboços e CAD****

A forma de um novo produto se materializa em primeiro lugar pelo esboço — desenho à mão livre, com anotações livres, que permitem ao designer explorar alternativas e registrar ideias à medida que ocorram. O esboço é um tipo de discussão, consigo mesmo ou com outras pessoas, baseada em imagens — um modo de lançar ideias, rearranjá-las e refiná-las. Apenas em um estágio mais adiantado é que o esboço é dimensionado, desenhado com precisão e codificado em uma embalagem de modelagem de superfície. Softwares de modelagem¹² permitem a apresentação de projeções do produto e experimentação com aspectos de cor e textura. Mas os designers enfatizam que não é isso, e sim o ato de produzir um esboço, que estimula a criatividade.

Modelos e protótipos

Um projeto se desenvolve por meio de modelos; esses modelos são um meio de comunicação importante entre designers industriais e projetistas técnicos, e entre os designers e o cliente para o qual o produto deverá ser feito. Modelos preliminares, muitas vezes feitos de espuma de polímero, gesso, madeira ou argila, capturam a forma do produto; modelos posteriores mostram forma, cor, textura, mecanismos e pesos. Os modelos permitem que o produto seja manipulado (se pequeno) e visto de vários ângulos (particularmente importante quando são grandes). A prototipagem rápida transformou os

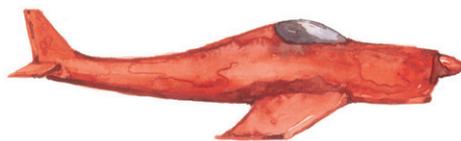
**** Computer Aided Design ou desenho assistido por computador. [N.R. T.]

12. *Pro-engineer's SolidWorks 2001 é um exemplo de programa de modelagem de sólidos para engenheiros e projetistas mecânicos que tem a capacidade de fazer download de arquivos para prototipagem rápida.*



Figura 3.12 – Elementos da natureza

Ao longo da História, a natureza proporcionou uma rica fonte de inspiração para designers.



estágios posteriores da confecção de modelos, já que permite o *download* de um arquivo CAD de um pacote de modelagem e posterior conversão em modelo de cera ou polímero.¹³

A natureza como inspiração

“Inspirar” é estimular o pensamento criativo. A inspiração pode vir de muitas fontes. A inspiração para o design de produto vem, é evidente, de outros produtos e de materiais e processos, em particular dos novos. Depois desses, a natureza é, talvez, a fonte mais rica. Os mecanismos de plantas ou animais — as coisas que eles podem fazer e o modo como as fazem — continuam a intrigar, iluminar e inspirar o projeto técnico: velcro, sapatos antiderrapantes, canecas de sucção e até o sonar têm origem na observação da natureza (Figura 3.12). A natureza como estímulo para o design industrial é igualmente poderosa: formas orgânicas, acabamentos naturais, o uso de formas que sugerem (às vezes vagamente, às vezes de forma mais explícita) plantas e animais: todos são

meios de criar associações e o caráter percebido e emocional do produto. Projetos que são diretamente inspirados na natureza têm um ponto de vista bastante exclusivo (Figura 3.13) e muitas vezes comportamentos surpreendentes (como os superadesivos, mas não muito grudentos, que imitam as patas de uma espécie de lagartixa).

Métodos mais formais: raciocínio indutivo e analogia

O raciocínio indutivo tem seus fundamentos na experiência anterior. Nesse caso, os insumos são requisitos de processo expressos como uma série de aspectos do problema; a função de transferência explora o conhecimento de outros problemas resolvidos que têm uma ou mais características em comum com o novo problema, permitindo que potenciais novas soluções (“hipóteses”) sejam sintetizadas e testadas quanto à capacidade de cumprir os requisitos do projeto ou design.

Um aspecto central aqui é a biblioteca de problemas ou “casos” re-

13. Os perfis de sistemas de prototipagem rápida podem ser encontrados no guia de referência, no final deste livro.



Figura 3.13 – Cadeiras inspiradas em osso

Joris Laarman criou esta cadeira inspirada na natureza (foto à esquerda) usando um software que imita o modo como um osso se reconfigura quando submetido a uma carga; a Go Chair de Ross Lovegrove, inspirada nas curvas da caveira de um urso (foto à direita).

solvidos anteriormente — um “caso” é um problema, uma análise de suas características, a solução e a avaliação do grau de sucesso dessa solução. O desafio de montar a biblioteca está em fazer uma indexação adequada — associar a cada caso um conjunto de palavras indexadoras que expressem suas características. Se as palavras (índices) forem demasiadamente específicas, o caso só será recuperado se for encontrada uma combinação exata; se forem demasiadamente abstratas, nada significarão para qualquer pessoa que não seja quem fez a indexação.

Considere, como exemplo, o “caso” do novo desenho de um plugue de tomada elétrica que torna mais fácil para uma pessoa idosa, cujas mãos são fracas, pegá-lo, inseri-lo e retirá-lo. Indexá-lo como “plugue elétrico” é específico; o caso será recuperado somente se o “plugue” for especificado. Indexá-lo como “design para idosos” é mais abstrato e bem mais útil. Plugues não são os únicos itens que idosos acham difícil de usar. Facas, tesouras, torneiras, bengalas e muitos outros produtos são também adaptados para idosos. Examinar formas e materiais e processos usados para fabricá-los podem sugerir novas soluções para a peça.

Como exemplo, a TRIZ (abreviatura de teoria da resolução inovadora de problemas em russo) é produto da genialidade do especialista russo em patentes, Genrich Altshuller. Ele destilou de seu estudo de patentes 40 princípios e oito padrões de evolução para criar produtos de engenharia. Há quem siga seus métodos e há também os descrentes. Seja como for, uma das técnicas, o método das nove janelas, conhecido como parte da caixa de ferramentas da TRIZ, encontra ampla utilização como estímulo para o pensamento criativo. O obstáculo para a inovação muitas vezes é a preocupação com o sistema tal como ele é agora.

Estudos de caso da IDEO

Para apresentar expressões reais da combinação de materiais e design, incluímos alguns estudos de caso da IDEO (www.ideo.com) como parte deste capítulo. Esses estudos de caso não seguem a estrutura que apresentaremos mais adiante no Capítulo 8, mas a intenção é que proporcionem inspiração para se refletir sobre materiais e design como parte dos produtos que pretendemos desenhar ou redesenhar. A filosofia, o processo e as equipes



**Figura 3.14 –
Estrutura em tecido
de trama 3D**

*Cadeira que se move com
você e com novas maneiras
de se trabalhar (imagem por
cortesia da IDEO).*

de design da IDEO são organizados em uma espécie de caos estruturado, de modo que se consigam equilibrar muitos elementos para inspiração e solução de problemas. Nos estudos de caso que apresentaremos a seguir, focaremos nos detalhes a respeito de materiais e processos de fabricação bem como na ideia de materialidade que cada designer pretende criar.

Cadeira i2i da Steelcase

Em 2008, a Steelcase e a IDEO colaboraram na estratégia e no design de mobiliário para escritórios, com o auxílio da experiência de usuários, para desenvolver ambientes de trabalho. Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que conectam a superfície e a estrutura de modo a

permitir uma variedade de opções para sentar, se movimentar e trabalhar em uma cadeira.

A equipe de projeto construiu uma estrutura aberta flexível, em náilon moldado e injetado, e a revestiu com um tecido de trama tridimensional de fibras de poliéster (Figura 3.14). A superfície do assento é mais larga do que a da maioria das cadeiras e o plástico e o tecido flexionam quando você se move. A combinação desses dois materiais substituiu o tradicional estofamento de espuma revestida e criou uma maneira inteiramente única de se conceber o conforto dinâmico.

Lata de lixo da OXO

Em 2006, a OXO fez uma parceria com a IDEO para desenvolver uma linha de latas de lixo. Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que expressassem durabilidade e simplicidade. A equipe de design moldou a superfície externa de uma série de produtos em melamina. A forma dessas latas de lixo é facilmente moldada por injeção, tem ângulos bem abertos, paredes grossas e uma alça simples (Figura 3.15). A superfície dessas latas de lixo é mais dura

**Figura 3.15 –
Melamina moldada**

*Estrutura simples para
qualquer lata de lixo
utilizada em cozinha ou
banheiro (imagem por cortesia
da IDEO).*





Figura 3.16 – Polpa de papel moldada e cortada

Embalagem como expressão de marca e dos ingredientes (imagem por cortesia da IDEO).

do que o plástico tradicional, de modo que resistem à exposição a risco e têm uma exclusiva qualidade cerâmica, adequada para a cozinha e o lar.

Sabonete orgânico da Pangea

Em 2006, a Pangea Organics, empresa com sede em Boulder, Colorado, que vende sabonetes, loções e produtos para o cuidado do rosto cem por cento orgânicos, chegava à marca dos quatro anos quando o fundador e diretor-presidente Joshua Onysko entrou em contato com a IDEO para ajudá-lo a redefinir a expressão de sua marca. Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que expressariam a conexão da marca com sustentabilidade e ingredientes orgânicos. A equipe de projeto estudou a utilização de polpa de papel moldada, vista mais comumente em embalagens de ovos. A embalagem final foi uma caixa de sabonete compostável, com sementes embebidas no próprio material, de modo que daria origem a uma nova planta se deixada para se decompor no quintal ou em qualquer outro lugar (Figura 3.16). A embalagem serviu como caixa de proteção para os sabonetes, como amostra no ponto de venda e como plataforma para detalhes de comunicação.

Botões personalizados da Levi's

Em 2009, a IDEO trabalhou com a Levi's no desenvolvimento de um botão de braguilha personalizado como parte de uma iniciativa mais ampla da empresa, a campanha Live Unbuttoned (Viva desabotoado), para o relançamento da marca 501, que visava aos jovens e antenados. Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que se conectavam com um elemento fundamental da marca Levi's e poderiam ser usados com os botões existentes. A equipe de design considerou um revestimento para o botão feito de duas peças de aço inoxidável que, encaixadas, cobrem os botões existentes na braguilha do modelo 501. Esses botões proporcionariam uma tela em branco para trabalho de arte que expressasse uma identidade pessoal ou a moda do dia a dia (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Aço inoxidável por injeção de metal moldado (Metal Injection Molded — MIM)

Botão que permite a customização de calças Levi's modelo 501 (imagem por cortesia da IDEO).





Figura 3.18 – Teclas de alumínio estampado

Agenda portátil para organização fácil e visualmente agradável (imagem por cortesia da IDEO).

Agenda da Handspring

Em 2000, a nova adição da Handspring à sua popular linha Visor de agendas eletrônicas portáteis foi a Visor Edge, um dispositivo elegante com espessura de apenas 11,1mm (Figura 3.18). Como parte desse projeto, a IDEO explorou elementos de materialidade que criariam uma nova forma e definiriam uma identidade visual que expressasse a pequena espessura do produto. A equipe de design explorou componentes de alumínio estampado para o corpo e as teclas; o alumínio poderia ser anodizado em três cores diferentes e

uma dobradiça integrada permitiria que a tampa fechasse, protegendo o visor e facilitando o armazenamento. O produto final era portátil, confortável, atraente, rígido e robusto.

Centrífuga para verduras e legumes da Zyliss

Em 2004, a IDEO trabalhou com a Zyliss USA para projetar uma grande faixa de utensílios de cozinha. Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que realçassem o aspecto visual dos legumes e verduras que estivessem sendo centrifugadas e guardadas no recipiente (Figura 3.19). A equipe de design explorou a moldagem por injeção de um tipo de polímero tingido, designado SAN (estireno acrilonitrilo). A tampa e o recipiente são ambos transparentes e moldados sem nenhum elemento estrutural na parte interna, para facilitar a limpeza; na superfície superior, uma tampa perfeitamente plana, projetada para facilitar o empilhamento e moldada em plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno) branco, esconde os componentes do motor — um mecanismo assombrosamente eficiente que permite fácil centrifugação e desligamento imediato.

Figura 3.19 – SAN moldado por injeção

Centrífuga para verduras e legumes que permite visualização e fácil armazenamento (imagem por cortesia da IDEO).

Controle remoto sem fio da Lufthansa

Em 2003, a IDEO colaborou com a Lufthansa Technik AG para produzir o primeiro controle remoto manual sem fio da indústria, no intuito de





Figura 3.20 – Plástico revestido com material cerâmico usinado (“Corian”)

Controle remoto sem fio para uma experiência de viagem aérea superluxuosa (imagem por cortesia da IDEO).

controlar filmes exibidos durante o voo e sistemas de administração da cabine (Figura 3.20). Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que sugerissem uma estética única, exclusiva, produzida artesanalmente. A equipe de design incluiu detalhes que remetem à superfície semelhante a da cerâmica no que refere a sua inerente translucidez; LEDs que emitem brilho suave servem para localizar o equipamento em ambientes escuros e a carcaça de metal destaca e dá suporte mecânico à superfície branca.

Manopla para servir cerveja da Adams Beer

Em 2004, a IDEO trabalhou com a The Boston Beer Company a fim de projetar uma nova manopla para servir a cerveja Samuel Adams (Figura 3.21). Como parte desse projeto, a IDEO desenvolveu elementos de materialidade que associassem a função da manopla (servir cerveja) às qualidades icônicas da marca (autenticidade, confiabilidade). A equipe de design explorou uma estética contemporânea que pudesse



Figura 3.21 – Acrílico moldado por injeção

Manopla para servir cerveja que se destaca a distância e comunica a marca (imagem por cortesia da IDEO).

ser identificada facilmente a distância. O acrílico moldado translúcido na cor azul proporciona grande superfície para a comunicação da marca, através da inserção do logo, e um aspecto luxuoso; sua forma é ao mesmo tempo ergonômica e expressiva.

Conclusões: estrutura criativa

A imagem que emerge é o da mente do designer como uma espécie de caldeirão de ideias. Não há um caminho sistemático para o bom design; o designer procura capturar e manter um mar de ideias e reações a materiais, formas, texturas e cores, rearranjando-as e recombinando-as para encontrar uma solução que satisfaça as diretrizes iniciais do projeto e uma visão particular para cumpri-las. Revistas e anuários, coleções de materiais, exposições em museus, feiras comerciais e a própria experiência do designer fornecem os ingredientes mais rudimentares; o designer os permuta, modifica e combina, estimulado por *brainstorming* ou discussões livres e astuta observação daquilo que outros designers estão fazendo. Isso envolve aproveitar com liberdade memórias ou imagens, combinar aspectos de cada uma, imaginar e examinar criticamente novas soluções — um tipo de realidade virtual autoinduzida. O cérebro é bom para armazenar enorme quantidade de imagens, mas é ruim para recordá-las com detalhes sem sugestões ou gatilhos específicos.

Essas sugestões podem ser criadas com a utilização de imagens e informações visuais armazenadas a respei-

to de materiais e produtos, desde que estejam indexados de modo a permitir rápida recuperação. Portanto, indexar é fundamental para ordenar materiais e processar informações de maneira a obter uma ferramenta de projeto. Para fazê-lo com efetividade, a indexação deve ser suficientemente abstrata para estabelecer relações, porém suficientemente concreta para ser entendida com facilidade por um usuário iniciante. Se conseguirmos isso, poderemos obter uma estrutura que organize e manipule os atributos de materiais e o papel que desempenham no projeto técnico e no design industrial. Os propósitos finais dessa estrutura criativa poderiam ser:

- Recolher e armazenar informações sobre materiais e processos do tipo encontrado em revistas, anuários e publicações baseadas em exposições.
- Apresentar informações sobre materiais e processos em um formato criativo relevante para o design do produto.
- Permitir o exame de materiais ou processos potenciais por meio de links com hipertextos ou busca livre em textos.
- Permitir a recuperação de “pitadas” de informações sobre os atributos técnicos e percebidos de materiais, processos, e dos produtos que criam.

Tudo isso se encontra dentro do escopo da engenharia de software de hoje, mas exige que se pense mais sobre o melhor meio de organizar informações para designers. Veremos esse assunto com mais cuidado no Capítulo 7.

Leitura adicional

Altshuller, H. *The Art of Inventing (And Suddenly the Inventor Appeared)*, traduzido por Lev Shulyak. Worcester, MA: Technical Innovation Center, 1994. (Abordagem TRIZ, por seu criador.)

Antonelli, P. *Mutant Materials in Contemporary Design*, Museum of Modern Art, Nova York, 1995. (Publicação do Moma que acompanha a resenha extensiva de materiais e produtos feita pelo museu em 1995.)

Arredo, F. *Materials and Ideas for the Future*, Material Connexion, 4, Columbus Circle, Nova York, 2000. (Catálogo de uma exposição no Salon Internazionale del Mobile, Milão, 2000.)

Ashby, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. (Texto que complementa este livro com a apresentação de métodos para selecionar materiais e processos para atender aos requisitos técnicos de projeto. Apresenta também uma grande quantidade de diagramas de propriedades de materiais.)

Beyleyrian, G. M. e Osborne, J. J. *Mondo Materialis*. Woodstock e Nova York: Overlook Press, 2001. (Uso criativo de materiais por 125 arquitetos e designers, apresentados como colagens, em formato grande e várias cores. A coleção original foi criada para uma exposição em 1990.)

Byars, M. *Innovations in Design and Materials: 50 Chairs* (1995); *50 Lights* (1997a) e *50 Tables* (1997b); *50 Products* (1998). RotoVision S.A., Suíça. (Ilustração em ricas cores com minúsculo texto de catalogação do designer; materiais e processos referentes a 50 produtos contemporâneos.)

Dragoni, G. e Fichera, G. (eds.). *Fountain Pens, History and Design*. Antique Collectors' Club, 5, Church Street, Woodbridge, Suffolk, Reino Unido, 1998. (Compilação ricamente ilustrada da história e características das canetas e dos grandes fabricantes de canetas: Parker, Sheaffer, Montblanc, Waterman, Pelikan.)

Ferguson, E. S. *Engineering and the Mind's Eye*. Cambridge: MIT Press, 1992. (Panorama da história do design desde 1700. Destaca deficiências passadas e presentes, enfatizando a imaginação visual acima da pura análise no ato de projetar.)

Kolodner J. L. *Case Based Reasoning*. Califórnia: Morgan Kaufmann Pub. 1993. (Introdução de fácil leitura à solução de problemas pelo método indutivo baseado em casos.)

McKim, R. H. *Experiences in Visual Thinking*. 2ª ed. Boston: PWS Publishing Company, 1980. (Introdução de leitura muito fácil ao pensamento e ao design criativos.)

Pahl, G. e Beitz, W. *Engineering Design*. 2ª ed. Traduzido por K. Wallace e L. Blessing. Londres/Berlim: The Design Council/Springer-Verlag, 1997. (A “Bíblia” — ou, talvez, mais exatamente, o “Antigo Testamento” — da área do projeto técnico, com desenvolvimento de métodos formais, conforme a rigorosa tradição germânica.)

Pearlman, C. (ed.). *ID Magazine*, Nova York, 1998, 1999. (A *International Design Magazine* apresenta resenhas de produtos e gráficos contemporâneos e experimentais.)

Rantanen, K. e Domb, E. *Simplified STIZ: New Problem-Solving Applications for Engineers and Manufacturing Specialists*. Boca Raton: St. Lucie Press, CRC Press, 2002. (Os autores, defensores do método TRIZ para o pensamento criativo, apresentam a utilização do método na indústria.)

Sapper, R. e Morrison, J. (eds.). *The International Design Yearbook*. Londres: Laurence King, 1998, 1999. (Resenha anual de design de produtos inovadores.)

Tufte, E. R. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press: Conneticut, 1983. (“Bíblia” dos métodos gráficos para representar — ou deixar de representar — informações. O livro defende o ponto de vista de que, na melhor das hipóteses, os gráficos são instrumentos para raciocinar a respeito de informações. O livro em si é uma obra-prima do design gráfico.)



Capítulo 4

De que é feito o design... materiais multidimensionais

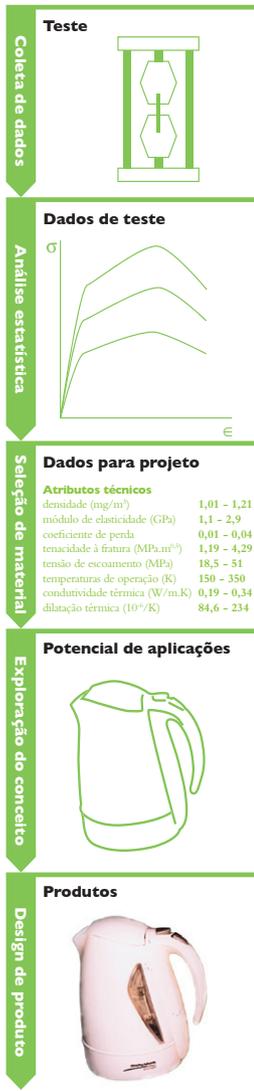
Materiais são a matéria de que é feito o design de produto. Quando falamos de “informações” sobre materiais, o que isso quer dizer? O Quadro 4.1 ilustra as etapas envolvidas na passagem de um material do laboratório para um produto bem-sucedido. Testes rendem dados brutos. Esses dados, depois de destilados por análises estatísticas adequadas, resultam em dados denominados “propriedades do material”: valores para propriedades que podem servir de base segura para o projeto (normalmente, três desvios padrões abaixo da média). Um material pode ter “propriedades de material” atraentes, mas transformá-lo em um produto requer que ele seja moldado, conformado e acabado. A caracterização do material é resumida em um quadro com tais informações (Quadro 4.1, parte central). Esse processo permite um projeto técnico e seguro do produto, focado na dimensão da engenharia, por assim dizer.

E é apenas o começo. Uma vez fabricado, o produto será utilizado — a escolha do material é influenciada pela natureza do usuário: crianças, viajantes ou idosos. O produto está de acordo com os requisitos legais que ele tem de cumprir (aprovação do FDA, talvez, ou requisitos que limitam a inflamabilidade, o ruído, a vibração ou a biocompatibilidade)? Sobreviverá ao uso e ao mau uso que enfrentará em serviço? É tóxico? Informações a respeito — a dimensão do uso — também são importantes para guiar a seleção. Logo no início do processo de design de produto precisamos considerar as necessidades dos usuários finais. Existem necessidades humanas além das que mencio-

namos aqui, mas serão consideradas mais adiante, neste capítulo.

Há mais. Fabricantes e seus clientes estão à procura de soluções sustentáveis e que não prejudiquem a natureza. No mundo fabril, tal é comprovado pela qualificação de uma fábrica como ISO 9000 ou 14000 — o que significa que a fábrica estabeleceu padrões de qualidade e procedimentos de auditoria e responsabilidade ambiental. Essa dimensão, a ambiental, requer ainda uma outra camada de informações sobre materiais relacionada a fabricação, utilização e descarte do produto. E isso ainda não é o final.

O design industrial de um produto faz parte de sua criação tanto quanto qualquer outro. As caracterís-



Quadro 4.1 – Segurança em novos materiais

Etapas que levam um material de laboratório a um produto bem-sucedido.

1. Cardwell et al. (1997), por exemplo, sugerem uma classificação radicalmente diferente – baseada na familiaridade em vez de em atributos físicos: não familiar, familiar, desprezível (!), desconhecido e impossível de conhecer.

ticas de um material que contribuem para o design industrial, embora mais difíceis de documentar, são tão importantes quanto as propriedades mais técnicas. Isso — criar conexão emocional e fazer um bom design — requer uma quarta dimensão de informações de materiais: as relacionadas com estética e personalidade.

Dados esses cinco atributos, o design racional e emocional com materiais se torna possível. Passar do projeto à produção depende — como dissemos no Capítulo 2 — de investimento, atraído por um caso de negócio bem-sucedido. Mas temos o suficiente para discutir sem isso. A seguir, exploraremos as cinco dimensões de informações de materiais: engenharia, utilização do produto, meio ambiente, estética e emoção.

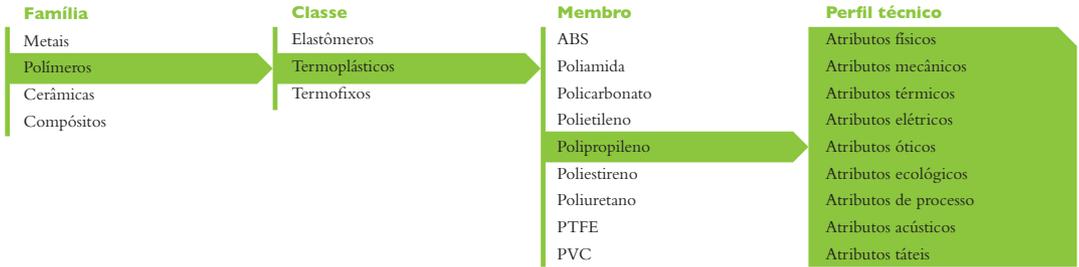
Dimensão da engenharia: atributos técnicos

O estudo científico de materiais — a ciência dos materiais — procura entender as origens fundamentais das propriedades do material e, por fim, manipulá-las. O sucesso alcançado nesses dois aspectos é notável. A origem de muitas propriedades dos materiais deriva diretamente da estrutura atômica e eletrônica do material: entre elas estão densidade, rigidez, condutividade térmica e elétrica, transparência ótica e muitas outras. Na atualidade, essas propriedades são bem-entendidas e, dentro dos limites impostos pelas leis da física,

podem ser manipuladas. Compósitos, um dos grandes avanços técnicos dos últimos 50 anos, combinam as propriedades de dois materiais bastante diferentes: polímeros e fibras de carbono em equipamentos esportivos, elastômeros e aço em pneus de automóveis, e metais e fibras cerâmicas em componentes aeroespaciais. Também nesse caso o conhecimento científico é profundo e a capacidade de “projetar” materiais é considerável.

A ciência dos materiais desenvolveu uma classificação baseada nas propriedades físicas da matéria (Quadro 4.2). Não é a única — arquitetos, por exemplo, pensam em materiais de outro modo.¹ A classificação baseada na ciência surge do entendimento dos tipos de ligações entre átomos e (no caso dos compósitos) de como se comportam misturas de dois materiais diferentes, cada um com os próprios atributos. Mas ciência é uma coisa; design, outra. A classificação baseada na ciência é útil para o projetista técnico? Para explorar mais esse assunto, em primeiro lugar temos de examinar os atributos técnicos dos materiais. A classificação do Quadro 4.2 — Família, Classe, Membro — é baseada, no primeiro nível, na natureza dos átomos do material e na ligação entre eles (por exemplo, “polímero”); no segundo nível, em suas variantes (por exemplo, “termoplástico”); e, nos níveis subsequentes, nos detalhes de sua composição. Cada membro tem um conjunto de atributos que quantifica seu comportamento físico, mecânico, térmico, elétrico e ótico — o que denominaremos perfil técnico.

Abra um manual ou consulte a web em busca de um material por seu nome e encontrará dados técni-



cos. Essas informações são em grande parte numéricas: valores para módulos de elasticidade, resistência, tenacidade, dureza, condutividade térmica e coeficiente de expansão, resistência elétrica e assim por diante (Tabela 4.1), acompanhadas por um pequeno texto com informações sobre resistência a corrosão e desgaste. Esses são os dados necessários para o projeto técnico — para o cálculo de cargas de segurança, temperaturas, fluxos de calor e vida útil em operação. A classificação mais útil de materiais para projeto técnico é a que agrupa materiais que têm perfis similares de atributos técnicos. Mas o que significa “similar”?

Mapeamento de atributos técnicos

Quando alguém pergunta se duas cores são “similares”, podemos responder comparando os respectivos comprimentos de onda. Porém, se “similar” quer englobar um conjunto maior de propriedades, a pergunta é mais difícil: trata-se do reconhecimento de um padrão de comportamento. O cérebro é melhor no reconhecimento de padrões quando o insumo é visual em vez de baseado em texto. Portanto: como tornar os atributos técnicos visíveis? Um modo é apresentá-los aos pares em uma espécie de mapa gráfico que indica onde eles se encontram. A Figura 4.1

é um exemplo. Nela, os dois primeiros atributos do Quadro 4.3 — módulo de elasticidade, E , que mede rigidez, e densidade, ρ , que mede peso — estão mapeados e revelam a disposição do cenário E - ρ . As dimensões das pequenas bolhas mostram a faixa de módulos de elasticidade e a densidade de classes de materiais individuais; as envoltórias maiores delimitam membros de uma família. Metais aglomeram-se em uma parte do mapa; polímeros em outra; cerâmicas, madeiras, espumas, elastômeros em outras. Assim como os mapas de tipo mais convencional, esse condensa um grande volume de informações em uma única imagem fácil de ler.²

O que aprendemos? Que os membros de cada uma das famílias do Quadro 4.2 se aglomeram de modo surpreendente. Quando julgados por essas duas propriedades de engenharia, apresentam similaridades distintivas que permitem que sejam agrupados e distinguidos de outras famílias que se agrupam em outro local. Todavia, há sobreposição — os metais mais leves e mais rígidos se sobrepõem às cerâmicas técnicas e compósitos; elastômeros se sobrepõem a polímeros — e nesses casos a separação é ambígua.

Mas esses são apenas dois atributos técnicos. Materiais têm muitos mais. Quando os representamos em um gráfico,³ verificamos os mesmos agrupa-

Quadro 4.2 – Classificação de materiais

Classificação de materiais baseada em entendimento científico da natureza dos átomos que eles contêm e das ligações entre esses átomos. A última coluna mostra uma lista de possíveis atributos para um material específico.

2. As identificações usadas nesses mapas são abreviadas por questão de espaço: fPU é espuma de poliuretano flexível; rPU é rígido, ocPU vem de células (espuma) abertas, ccPU de células fechadas, tfPoliéster é poliéster termofixo e tpPoliéster é termoplástico.

3. Há mapas como o Quadro 4.2 para muitas outras propriedades de engenharia de materiais. Eles podem ser copiados sem restrições de Ashby (1999), ou obtidos gratuitamente em www.grantadesign.com.

Tabela 4.1 – Perfis técnicos

Atributos técnicos selecionados para o polipropileno.

Atributos físicos	
Densidade, kg/m ³	900-910
Atributos mecânicos	
Módulo de elasticidade, GPa	1,14–1,55
Tensão de escoamento, MPa	31–35
Tensão de tração, MPa	33–36
Tensão de compressão, MPa	37–45
Alongamento, %	100–350
Tenacidade, kJ/m ²	10–11
Limite de fadiga, MPa	11–15
Dureza, Vickers	9,2–11
Atributos térmicos	
Temp. máxima de utilização, °C	90–105
Condutividade térmica, W/m·°C	0,11–0,12
Dilatação térmica, /°C · 10 ⁻⁶	145–180
Temperatura de fusão, °C	210–250
Atributos elétricos	
Constante dielétrica	2,2–2,3
Perda dielétrica, %	0,05–0,08
Resistividade, ohm·cm	3·10 ²² –3·10 ²³

mentos, mas não as mesmas sobreposições. Se a classificação que você quer é a baseada em atributos técnicos, de “engenharia”, então parece que a certa é a que os cientistas propõem.

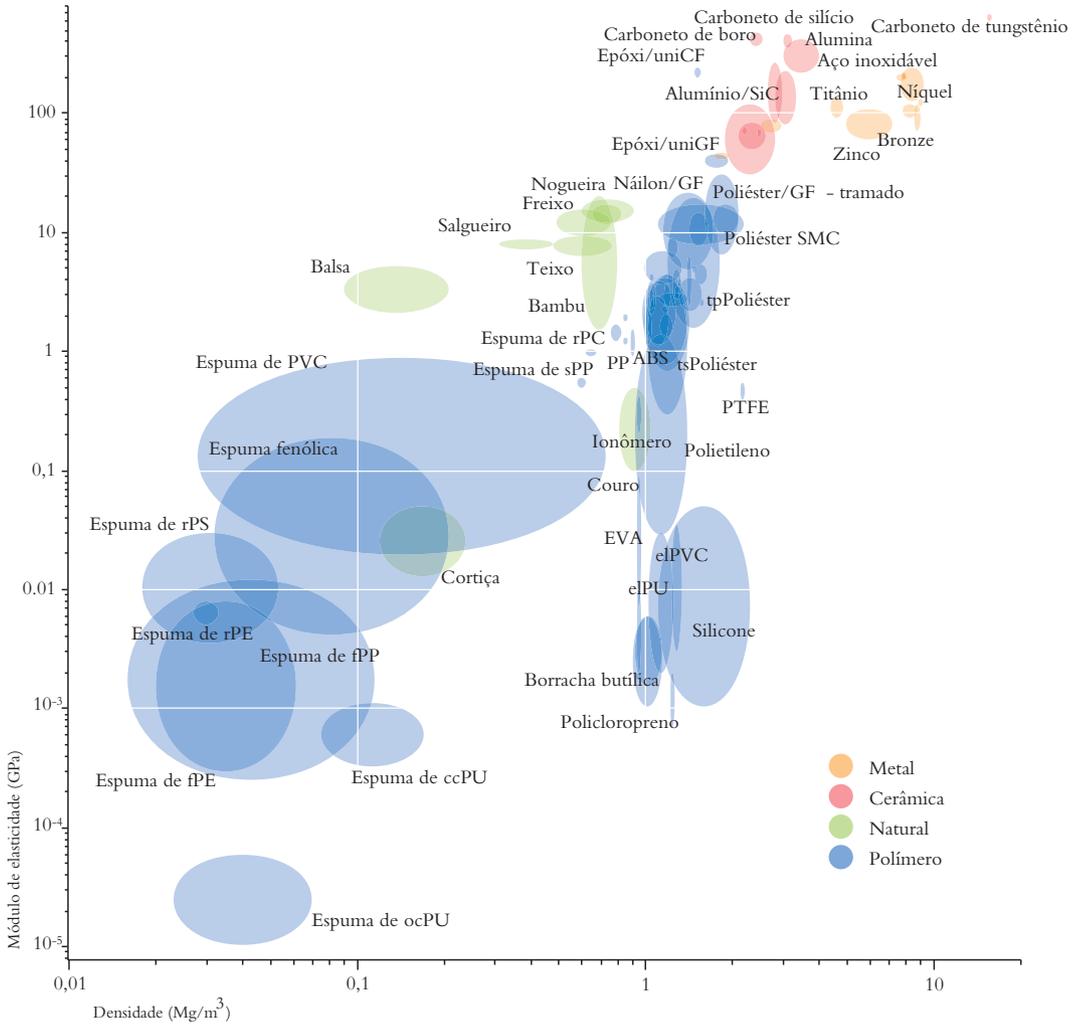
O Gráfico 4.1 pode sugerir compósitos e misturas de dois materiais. Os compósitos mais comuns são polímeros reforçados com fibras ou partículas. A fibra de vidro é mais rígida e mais densa do que o náilon; acrescentar fibras de vidro ao náilon resulta em um material com rigidez e densidade que se encontra em algum lugar entre os dois. De modo semelhante, mesclas de polímeros têm propriedades intermediárias entre as do par de polímeros que foram mesclados. Os mapas permitem que isso seja visualizado e sugerem combinações que poderiam atender a uma necessidade específica.

Portanto, a representação visual de dados pode revelar similaridades que são difíceis de ver de outra maneira. E isso faz você imaginar se poderia avançar e, em vez de mapear muitos pares de atributos separados, encontrar um modo de combinar todos eles e montar um único supermapa — uma visão global. Bom, sim e não. Sim, há um modo de fazer isso. Mas o que ele revela não é tão claro. Ainda assim, vale a pena examiná-lo. Esse método é denominado escala multidimensional, ou MDS.⁴

MDS é um modo de revelar semelhanças e diferenças entre membros de um grupo usando informações sobre muitos atributos, e não apenas dois. Aplicado a materiais, funciona da seguinte maneira. Em primeiro lugar, calcule a “distância” entre cada material e cada um dos outros membros do grupo, tomados aos pares. “Distância” é uma medida de dissimilaridade: se todos os atributos de dois materiais são idênticos, a distância entre eles é zero. Se todos menos um são idênticos, e a diferença entre o diferente e os outros é de dez unidades, poderíamos dar a essa distância o valor 10. Se todos são diferentes, e em vários graus, atribuímos um valor a cada diferença e todos os valores são agregados para dar um único número: a “distância” global entre os dois materiais. O resultado dessa etapa é uma tabela que mostra as distâncias entre cada material e cada um dos outros.

Podemos aprender algo consultando essa tabela e escolhendo grupos de materiais separados pelas menores distâncias. Mas, quando o número de materiais é grande, essa tarefa dificilmente será inspiradora. Portanto, há uma segunda etapa

4. Os métodos da escala multidimensional são bem descritos no livro de Kruskal e Wish (1987).



— a de manipular essa tabela para produzir um “mapa de distâncias”. Isso envolve uma espécie de técnica de otimização mais bem-explicada da seguinte maneira. Suponha que você tinha somente três materiais e calculou as três distâncias entre eles para quantos atributos desejou. Então você poderia produzir um quadro no qual situaria um ponto e o deno-

minaria “material 1”, e um segundo ponto a um comprimento igual à distância material 1 — que você denominou “material 2”, e um ponto para o material 3, formando um triângulo posicionado de modo tal que está à mesma distância de 1 e 2.

Muito bem. Mas agora acrescente um quarto material. Em geral, você não consegue encontrar um lugar

Gráfico 4.1 – Módulos de elasticidade e densidade

Diagrama de módulos de elasticidade e densidade para materiais que mostra os agrupamentos de metais, polímeros, cerâmicas, espumas, madeiras etc. (CES Edu, 2009).

5. Há muitas decisões arbitrárias envolvidas. “Distâncias” podem ser medidas e agregadas em mais de um modo. Um exemplo: normalize todos os dados para uma determinada faixa – digamos, -10 a 10 –, calcule as distâncias individuais para cada atributo de um material, em seguida agregue-os calculando a raiz quadrada da média dos quadrados entre eles (agregação euclidiana). Também a minimização do esticamento e compressão permite muitas alternativas. Um exemplo: minimize a raiz quadrada das médias dos desvios das distâncias comprimidas ou esticadas em relação aos valores que de preferência deveriam ter. Parece sensato, mas ambos os exemplos contêm premissas implícitas sobre os “pesos” relativos de pequenas e grandes diferenças, e sobre a extensão da distorção aceitável. Se quiser usar o método, leia antes Kruskal e Wish (1987).

6. Fornecedores de materiais confeccionam planilhas de dados para seus produtos, embora muitas vezes o conteúdo seja limitado. Dados mais abrangentes são tabulados em manuais como o publicado pela ASM International, Butterworth-Heinemann e McGraw-Hill, alguns agora disponíveis em formato de CD pesquisável. Sistemas de software como os da Grant Design (CES Edu, 2009) oferecem acesso rápido a alguns milhares de planilhas de dados técnicos em formato padrão, compiladas de diversas fontes. Cada vez mais dados técnicos podem ser encontrados em sites da web, como em www.matweb.com.

onde ele caiba exatamente — onde suas distâncias em relação a 1, 2 e 3 são todas corretas; é uma consequência da bidimensionalidade do quadro. Mas suponha que você pudesse esticar algumas das distâncias e comprimir outras, e continuar assim até encontrar uma posição na qual o quarto material caberia — embora agora o mapa já esteja distorcido, uma aproximação, e não mais uma visualização exata das distâncias. E você poderia continuar acrescentando mais e mais materiais, toda vez fazendo um pouco mais de esticamento e compressão. É muito natural pensar que isso resultaria em um mapa cada vez mais disforme, mas, se você tivesse um algoritmo que minimizasse, em cada etapa, o total do esticamento e compressão, poderia manter a distorção em um mínimo. E é isso, exatamente, o que a escala multidimensional faz.⁵

Os mapas obtidos dessa maneira devem ser interpretados com cautela — são aproximações. A medida “distância” da qual eles dependem engloba muitos atributos em um único número, e por isso joga fora uma grande quantidade de informações (“uma distância de 20 significa que todos os atributos são um pouco diferentes, ou que a maioria era idêntica e uma era muito diferente?”). Porém, na realidade, o método produz figuras interessantes, nas quais a aglomeração é claramente evidente.

A Figura 4.1 é um exemplo. É um mapa MDS para materiais de engenharia baseado em 15 de seus atributos mecânicos e térmicos. Cerâmicas, metais e polímeros caem em grupos separados; e dentro de polímeros, os termoplásticos e os elastômeros formam grupos que se

sobrepõem. A análise resultou em agrupamentos que se assemelham de muitos modos às famílias e classes da ciência dos materiais.

Portanto, para atributos técnicos, a classificação do Quadro 4.2 é o que queremos. Classificação é a base da indexação — uma etapa essencial na catalogação de informações de materiais. Voltaremos à indexação no Capítulo 7. Aqui, observaremos apenas que, para atributos técnicos, temos uma boa base, e nos debruçaremos brevemente às utilizações de atributos técnicos no design de produto.

Utilização de atributos técnicos

Já dissemos que o sucesso de um produto no mercado depende muito de seu design — de seu apelo, visual e emocional, ao consumidor. Mas isso pressupõe que ele funciona — que desempenha suas funções técnicas bem, com segurança e a um custo aceitável. A responsabilidade disso cabe ao projeto técnico, o qual depende de dados de materiais confiáveis.

A caracterização de materiais para o projeto técnico — a metade superior do Quadro 4.1 — é bem-desenvolvida. Planilhas de dados como as do Quadro 4.3 estão amplamente disponíveis.⁶ As informações que elas contêm fornecem os insumos necessários para o projeto técnico, usando os métodos padrões de engenharia: análise de tensões, análise térmica, métodos de otimização e simulação. Todos são apoiados por sofisticadas ferramentas de software. Parece tranquilizador — e é — mas ainda resta um desafio real. Você consegue encontrar dados técnicos para um material se souber qual material quer. Mas como fazer essa escolha? E como ter certeza de

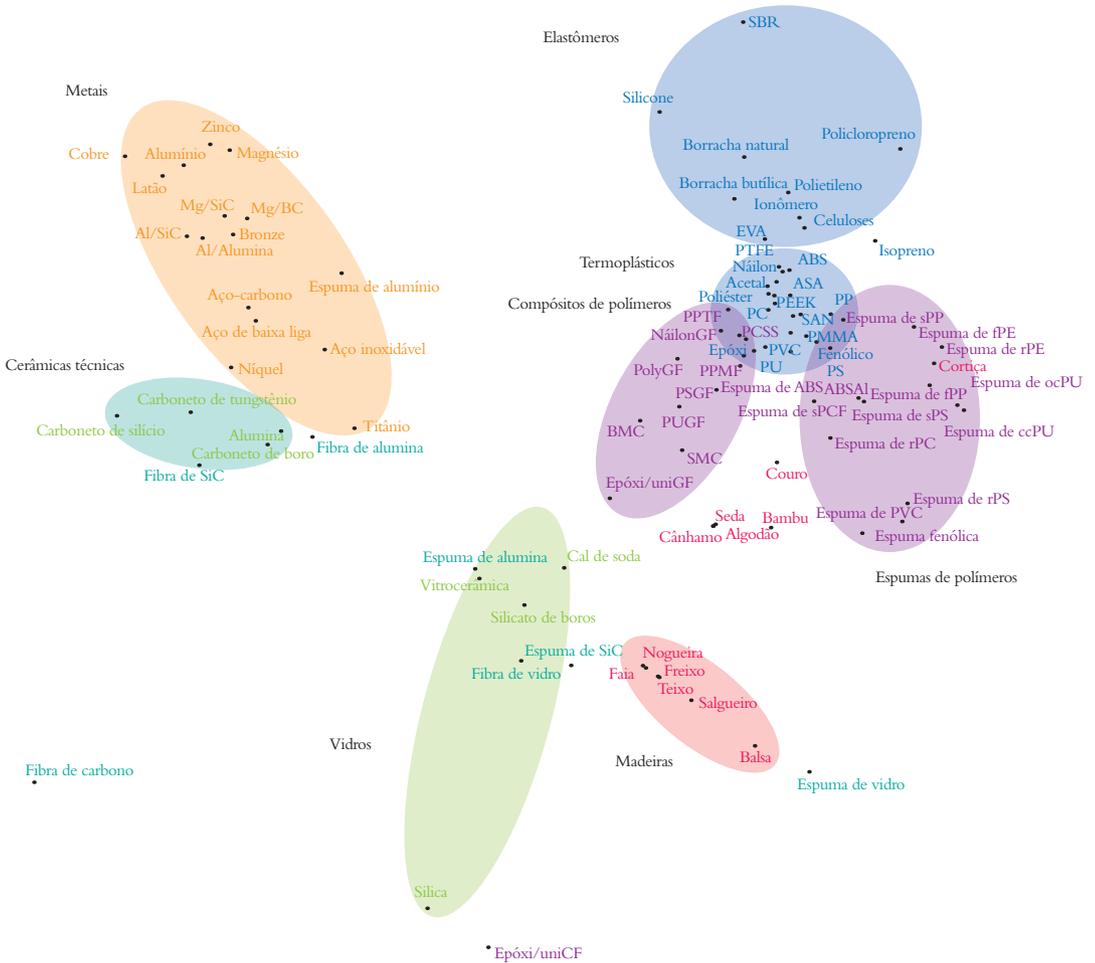


Figura 4.1 – Mapas multidimensionais: atributos mecânicos

Este mapa mostra a semelhança entre materiais baseada em seus atributos mecânicos (Dados de CES Edu, 2009.)

que ela é compatível com as outras “dimensões” com as quais esse capítulo começou? Voltaremos a esse assunto no Capítulo 7. Mas antes vamos examinar as outras dimensões e as informações de materiais necessárias para abordá-las.

Usabilidade: ergonomia e interfaces

Todos conhecemos aquele aparelho de televisão cuja tecla de ligar

e desligar está tão inteligentemente integrada ao estilo que não conseguimos encontrá-la no escuro, aquela torneira tão lisinha que dedos ensaboados não conseguem abrir, aquele secador de cabelos tão barulhento que, quando ligado, não nos deixa ouvir o telefone tocar... bem, a lista é longa. Cada um desses produtos funciona, mas o projeto de sua interface é ruim — ela é difícil de *usar*. Produtos bem-projetados não apenas funcionam, mas também são convenientes,

Tabela 4.2 – Medidas do ser humano

Atributos médios de homens e mulheres europeus e norte-americanos em idade produtiva.

Característica	Homem (18-40)	Mulher (18-40)
Altura quando em pé, m	1,63–1,85	1,54–1,76
Altura acima do assento quando sentado, m	0,84–0,96	0,79–0,91
Largura do assento, m	0,33–0,40	0,35–0,43
Alcance do braço à frente, m	0,77–0,92	0,60–0,75
Largura do ombro, m	0,42–0,50	0,38–0,46
Altura dos olhos, em pé, m	1,52–1,74	1,44–1,65
Massa do corpo, kg	60–94	44–80
Massa da cabeça, kg	1,4–1,7	1,25–1,6

seguros, e é fácil interagir com eles — são amigáveis ao usuário.

O design da interface de um produto tem três aspectos gerais: o primeiro refere-se à adequação do produto às capacidades do corpo humano; o segundo, à adequação ao poder de raciocínio da mente humana; e o último, à adequação ao ambiente no qual o ser humano vive e trabalha. Esses atributos, tomados coletivamente, são conhecidos como fatores humanos e seu estudo é denominado ergonomia, projeto de interface ou engenharia do fator humano, que examinaremos agora.

Antropomorfia e biomecânica

Durante a Segunda Guerra Mundial ficou aparente que a efetividade dos homens em serviço dependia fortemente da facilidade de utilização dos equipamentos cada vez mais complexos dos quais eles tinham de depender. Isso levou ao estudo da *antropomorfia* — a medição do tamanho e da forma do corpo humano — e da *biomecânica humana* — a análise do movimento, forças, potência e vigor de que o corpo é capaz.

A Tabela 4.2 apresenta uma lista com algumas dessas capacidades para populações europeias e norte-americanas. Em termos físicos, as pessoas variam no tamanho e na força.

Os projetos costumam usar como instrumento de medida faixas que abrangem 90% da população madura na idade produtiva, e é essa faixa que aparece nessas tabelas. Tais dados definem aquele indivíduo que poderia ser denominado Pessoa Padrão de Projeto. No design dirigido à usabilidade, essas características são tratadas como restrições: o produto deve servir para qualquer pessoa que tenha dimensões e capacidades físicas que estejam dentro dessas faixas. No ambiente de trabalho, cada vez mais essas restrições têm de atender à legislação que procura evitar fadiga indevida ou esforço muscular excessivo e os acidentes que provocam.

Mas há uma história, relevante neste ponto, do homem que inventou uma máquina de barbear. É só prender a máquina ao rosto, apertar um botão e — abracadabra! — você estava barbeado. Quando perguntaram ao inventor a qual rosto a máquina se adaptava, ele respondeu que ela se adaptava ao rosto padrão. Mas o que aconteceria se alguém que usasse a máquina não tivesse um rosto padrão? Depois de usarem a minha máquina, terão, disse ele.

Portanto, a ideia de uma pessoa padrão é um pouco ridícula. Para a verdadeira usabilidade, o equipamento deve se adaptar às capacidades

do indivíduo (Figura 4.2), e não a alguma média. Em nenhuma área essa adaptação é mais evidente do que na do design e comercialização de equipamentos esportivos. Nessa área os produtos são cuidadosamente ajustados às características biométricas e biomecânicas do atleta ou esportista individual, e isso se transformou em um negócio muito grande e lucrativo. Contudo, esses não são os únicos grupos que exigem atenção especial. Entre os que não têm corpos que se ajustam aos padrões de design (o que quer dizer que estão fora — e às vezes muito fora — das faixas das tabelas anteriores) citamos as crianças, os deficientes físicos e os idosos. Suas necessidades, muitas vezes negligenciadas no passado, agora são mais amplamente reconhecidas e o design para atendê-las é visto como prioridade.

E aqui os materiais têm um papel a desempenhar. Objetos pesados, frequentemente uma fonte de esforço físico excessivo quando levantados ou movimentados, podem ficar mais leves com a utilização de ligas de metais leves, polímeros e estruturas de sanduíches preenchidos com espuma. Elastômeros podem facilitar a empunhadura onde necessário, géis e espumas de polímeros permitem superfícies macias ao toque, e tecidos tramados e não tramados se ajustam à forma do corpo. Formas moldadas que se ajustam bem às mãos e têm cantos arredondados e lisos que não se prendem à roupa reduzem o risco de acidentes. Diferenças de tamanho podem ser resolvidas com a utilização de materiais ajustáveis — Velcro®, adesivos desmontáveis, elastômeros.

Tudo isso é simples. Mas produtos interagem com seus operadores



Figura 4.2 – Design ergonômico

Central de controle da empilhadeira, projetada para tornar manobras complexas tão intuitivas quanto possível (imagem por cortesia da Ergonomic Systems Inc.)

de outros modos — modos que exigem a comunicação de informações específicas.

Gerenciamento de informações

Os produtos com os quais interagimos hoje são mais complexos e têm muito mais funções do que em qualquer época no passado. Grande parte da funcionalidade atualmente deriva da eletrônica ou é controlada por ela. Elétrons, diferentemente de

Figura 4.3 – Ícones e emoticons

Acionadores visuais de direção, presentes em nossa vida diária, e de emoção, expressados nos textos eletrônicos.



coisas mecânicas, são invisíveis e dão poucas pistas do que estão tramando ou se estão respondendo aos desejos do usuário. Assim, há dois tipos de comunicação que devem estar embutidas no design universal — a passiva, que indica a função, e a ativa, que indica a resposta a um insumo.

A primeira necessidade é cumprida por uma clara identificação pictográfica ou por ícones. Ícones (Figura 4.3a) são fáceis de entender; em um mundo de comércio e viagens internacionais, têm a considerável vantagem de independermos do idioma.⁷ *Emoticons* (Figura 4.3b) — ícones adaptados para sistemas de mensagens eletrônicas — são baseados em combinações específicas de teclas e podem ser interpretados como emoções. Quando é preciso imprimir palavras inteiras na superfície

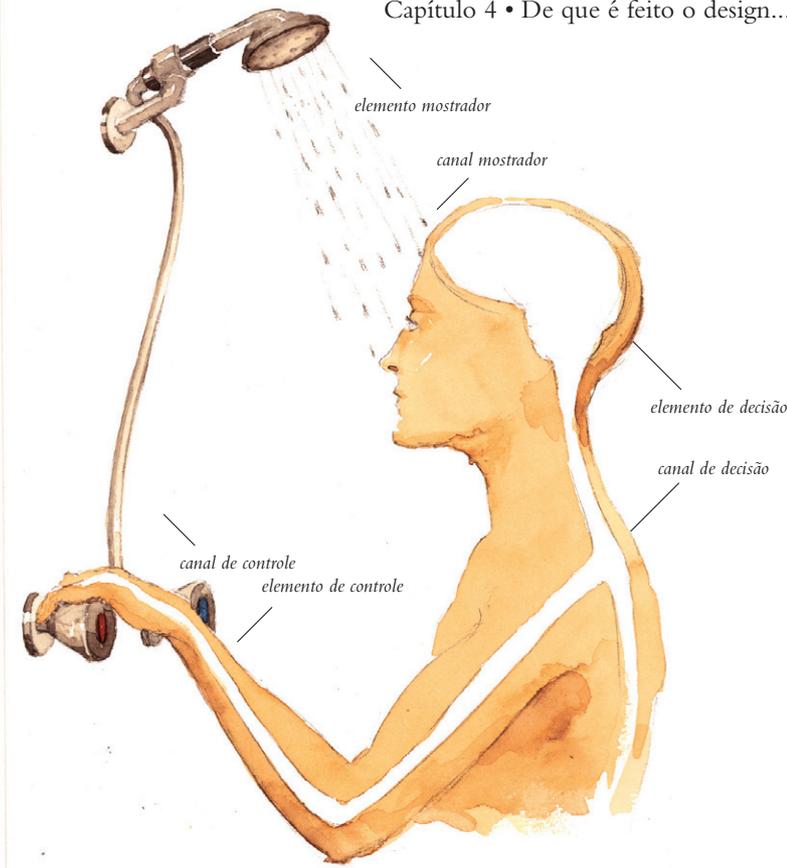
de um produto, experimentos mostram que a melhor legibilidade é dada por alguma fonte sem serifa como, por exemplo, Helvetica ou Arial, pela utilização de letras minúsculas exceto a inicial, e por alto contraste.⁸

Uma pessoa que está utilizando um equipamento é parte de um circuito de controle fechado (Figura 4.4). Tal circuito fechado requer, em primeiro lugar, um ou mais *mostradores* que documentam seu estado no momento em questão. Recursos visuais são o modo mais eficiente de transmitir essa informação com precisão, se bem que para avisos urgentes o som é melhor. Em segundo lugar, o circuito fechado requer *elementos de controle* ou métodos de entrada. Interruptores de pressão, maçanetas e alavancas foram substituídas em grande parte por teclados, mouses, ponteiros de laser, telas sensíveis ao toque e sistemas de reconhecimento de voz. As entradas são interpretadas pelo equipamento, que então reage a elas. O terceiro requisito é um *indicador* — visual, tátil, ou acústico — que informa que a entrada foi recebida (*feedback*); sem ele o operador não tem confirmação imediata da aceitação e pode repetir ou cancelar erroneamente a operação. O elemento restante do circuito — o da *decisão* — é dado pelo operador.

É aqui que materiais para sensores, acionadores e mostradores são importantes. Normalmente os sensores são baseados em materiais piezelétricos, materiais sensíveis ao calor e materiais sensíveis à luz (fotodiodos). Materiais acionadores incluem músculo (o velho modo de ativar qualquer coisa), materiais bimetálicos, ligas de memória de forma, materiais piezelétricos, ele-

7. Aqui é preciso ter cuidado — a interpretação de um ícone pode depender da cultura. Um ícone de garfo e faca que indica “restaurante” pode não ter nenhum sentido para quem come com hashis.

8. O mesmo não vale para o texto de um livro. Uma fonte como a Times, com serifas — pequenos traços terminais horizontais das hastes — conduz o olhar com mais facilidade ao longo das linhas, favorecendo a legibilidade.



torrestritivos e magnetorrestritivos e géis de polímeros. Materiais termocrômicos mudam de cor quando aquecidos; materiais eletrocrômicos fazem o mesmo quando é aplicado um campo elétrico. Materiais flexíveis podem ter uma forma adequada para dar uma resposta biestável, confirmando entradas por teclado rígido ou flexível, por meio de toque. Perfis de superfícies dão retorno tátil sobre a localização de teclas importantes. Mostradores são baseados em diodos fosforescentes, de cristais líquidos, emissores de luz e, mais recentemente, polímeros emissores de luz. Técnicas de impressão em superfícies permitem a aplicação de ícones, códigos de cores, códigos de barras e texto.

Comunicação é um modo desejável de interação de produtos com pessoas. Nem todas as interações são tão desejáveis.

Gerenciamento de ruído

O som é causado por vibração; o tom do som (grave ou agudo) depende de sua frequência. O ouvido humano (jovem) reage a frequências de aproximadamente 20 Hz a cerca de 20.000 Hz, correspondentes aos comprimentos de onda de 17 m a 17 mm. A nota mais grave de um piano tem 28 Hz, a mais aguda, 4.186 Hz. A faixa mais importante, do ponto de vista do projeto acústico é aproximadamente 500–4.000 Hz. A pressão do som é medida em Pascals (Pa) porém, como

Figura 4.4 – Controle e feedback

Produtos e usuários para sistemas de circuito fechado de controle e feedback.

Tabela 4.3 – Quanto o alto é alto?

Níveis de som em decibéis.

Fonte de som	dB
Patamar de audição	0
Ruído de fundo de um escritório	50
Tráfego em rodovia	80
Discoteca	100
Furadeira pneumática a 1 m	110
Decolagem de jato a 100 m	120

Tabela 4.4 – Como absorver o som

Coefficientes de absorção do som.

Material em	500–4.000 Hz
Azulejos	0,01–0,02
Concreto bruto	0,02–0,04
Madeira	0,15–0,80
Placas de cortiça	0,20–0,55
Tapete espesso	0,30–0,80
Poliestireno expandido	0,35–0,55
Gesso acústico pulverizado	0,50–0,60
Lã de vidro	0,50–0,99

a pressão do som audível tem uma faixa de aproximadamente 10^6 , é mais conveniente usar uma escala logarítmica de decibéis (dB). A Tabela 4.3 mostra níveis, medidos em decibéis. Sons acima do nível de 50 dB podem prejudicar a concentração. Sons ininterruptos acima de 90 dB podem prejudicar a audição.

A vibração, como o ruído, torna-se prejudicial acima de um patamar crítico. O nível de vibração é caracterizado pela aceleração (unidades, m/s^2) associada a ela; a prática segura requer níveis abaixo de $1 m/s^2$ (0,1 g, onde g é a aceleração da gravidade). Também a frequência é importante: menos do que 1 Hz provoca enjoo; 1–100 Hz provoca dificuldades respiratórias e dores de cabeça; 10–1.000 Hz causa perda do sentido do tato ou “dedo branco”. A duração também é importante — quanto mais longa, mais baixo deve ser o nível do som.

O mecanismo para redução de níveis de som e vibração em espaços fechados (uma sala, por exemplo)

depende de sua origem. Se é gerado dentro da sala, procura-se *absorver* o som. Se vem de fora, procura-se *isolar* o espaço para mantê-lo fora. E se é transmitido pela própria estrutura (proveniente de uma ferramenta de máquina ou do tráfego), procura-se *isolar* a estrutura da fonte de vibração.

No projeto de produto, normalmente é necessário absorver o som. Materiais macios, porosos, absorvem ondas de som incidentes, transmitidas pelo ar, e as convertem em calor (a potência do som, mesmo a de um ruído muito alto, é pequena, de modo que o aumento de temperatura é desprezível). Materiais porosos ou de alta flexibilidade como polímeros de baixa densidade e espumas cerâmicas, gesso e fibra de vidro absorvem bem; o mesmo ocorre com polímeros tramados, como carpetes e cortina. A proporção de som absorvida por uma superfície é denominada “coeficiente de absorção de som”. Um material com um coeficiente de 0,8 absorve 80% do som que chega até ele e reflete 20%; um material com coeficiente de 0,03 absorve somente 3% do som e reflete 97%. A Tabela 4.4 mostra coeficientes de absorção do som para vários materiais.

A vibração é amortecida isolando-se a fonte de vibração do restante da estrutura com suportes de borracha de alto amortecimento, espumas, alças de elastômero etc. Um compósito de borracha com recheio de partículas de cortiça é uma boa opção nesse caso. O baixo módulo de cisalhamento da borracha isola ondas de cisalhamento, e a compressibilidade da cortiça acrescenta alta impedância às ondas de compressão.

Gerenciamento térmico

Todos os produtos que consomem potência geram calor, criando assim duas classes de problema no gerenciamento térmico. Na primeira, o desafio é isolar partes que são sensíveis ao calor ou que serão tocadas pelo operador, de modo que não fiquem demasiadamente quentes: o secador de cabelos cujo corpo deve estar isolado do elemento de aquecimento. Na segunda, o desafio é o oposto: transmitir ou propagar calor, o que requer materiais condutores: caçarolas de qualidade usam materiais de alta condutividade para propagar o calor lateralmente e obter cozimento por igual.

Polímeros, com condutividades térmicas próximas de 0,25 W/mK, são bons isolantes. O ar parado ($\lambda = 0,025$) é muito melhor; CO_2 ($\lambda = 0,016$) e CFCs como o triclorofluorometano, CCl_3F ($\lambda = 0,008$) são ainda melhores. Os melhores materiais isolantes são espumas que prendem um desses gases em poros fechados, ou materiais fibrosos como a lã de vidro ou fibra mineral que segure o ar parado. Se a temperatura da fonte de calor é baixa ($< 150^\circ\text{C}$) e não for necessária resistência, espumas de polímeros são uma boa escolha. Se a temperatura da fonte é alta, lã ou espuma de vidro, fibras minerais e espumas cerâmicas são uma opção melhor. E, se além disso for necessária alta resistência, mica compactada ou cerâmica porosa podem ser mais adequadas.

Quando o objetivo é a condução, os melhores materiais são prata, ouro ou diamante sólidos (!), mas estes, por razões óbvias, talvez não sejam escolhas viáveis. Cobre sólido e alumínio sólido

chegam perto e são baratos e fáceis de formar: a maioria dos sistemas de propagação de calor os usam. Ocasionalmente, exigem-se materiais que conduzem bem calor, mas não conduzem eletricidade (são isolantes elétricos): nesse caso a melhor escolha é o nitreto de alumínio, AlN , ou o óxido de berílio, BeO . A Tabela 4.5 apresenta uma lista de condutividades de condutores e isolantes representativos.

Gerenciamento da luz

Poucos produtos geram intensidade luminosa excessiva, mas muitos refletem a luz de modos que interferem na visão do operador. A refletividade de uma superfície mede a fração da intensidade luminosa, incidente a um ângulo de 60° em relação à superfície, que é refletida até um observador que está a 120° (isto é, a um ângulo igual do outro lado). Uma superfície negra e fosca reflete menos de 1%; uma superfície de alto brilho reflete 80% ou mais; um espelho reflete toda a luz incidente. Uma lista de refletividades é apresentada na Tabela 4.6.

A refletividade de uma superfície depende do material de que ela é feita ou com o qual é revestida, e da lisura dessa superfície: ambas, cor e textura são importantes. A refletividade

Tabela 4.5 – Gerenciamento de calor

Condutividades térmicas de materiais selecionados.

Material	W/mK
Cobre	384
Alumínio	230
Vidro	1,1
Polímeros sólidos	0,15–0,35
Pinho	0,112
Balsa	0,055
Cortiça	0,045
Espuma de vidro	0,050
Fibra mineral	0,046
Lã de vidro	0,042
Espumas de polímeros	0,02–0,10

Tabela 4.6 – Espelhado ou fosco?

Refletividade de materiais e superfícies.

Material	%
Alumínio	60
Berílio	49
Aço-carbono	57
Invar	41
Magnésio	72
Aço inoxidável	70
Titânio	56

Textura da superfície	%
Fosco mortijo	< 1
Fosco	1–10
Casca de ovo	15–20
Semibrilho	40–50
Brilhante	> 80
Espelhado	> 95

de é controlada com a utilização de revestimentos de baixa refletividade e telas que absorvem a luz.

Ambiente: design “verde” e sustentabilidade

O que você jogou fora ultimamente e que ainda estava funcionando, ou se não estava, poderia ter sido consertado? Tendências que mudam, apoiadas por propaganda sedutora, reforçam o desejo pelo que é novo e incitam a substituição de objetos ainda úteis. Aqui o design industrial tem grande responsabilidade — houve um período em que designers encamparam a tendência da obsolescência planejada: projetar produtos que são desejáveis só se forem novos, e incitar o consumidor a comprar os modelos mais recentes, usando técnicas de marketing que dão a entender que adquiri-los é uma necessidade social e psicológica. E, como dissemos no Capítulo 2, esse consumo acelerado cria problemas que são uma fonte crescente de preocupação.

Mas isso é apenas metade do quadro. Um produto bem-projetado pode ultrapassar a sua vida útil de projeto por séculos, e — longe de se tornar indesejável — pode adquirir valor com a idade. Os leiloeiros e antiquários de Nova York, Londres e Paris prosperam com a venda de produtos que muitas vezes foram projetados para finalidades práticas, mas agora são muito mais valorizados por sua estética, associações e qualidades percebidas. Há pessoas que não jogam fora produtos com os quais têm um apego emocional. Então, o que temos? O design industrial como vilão e

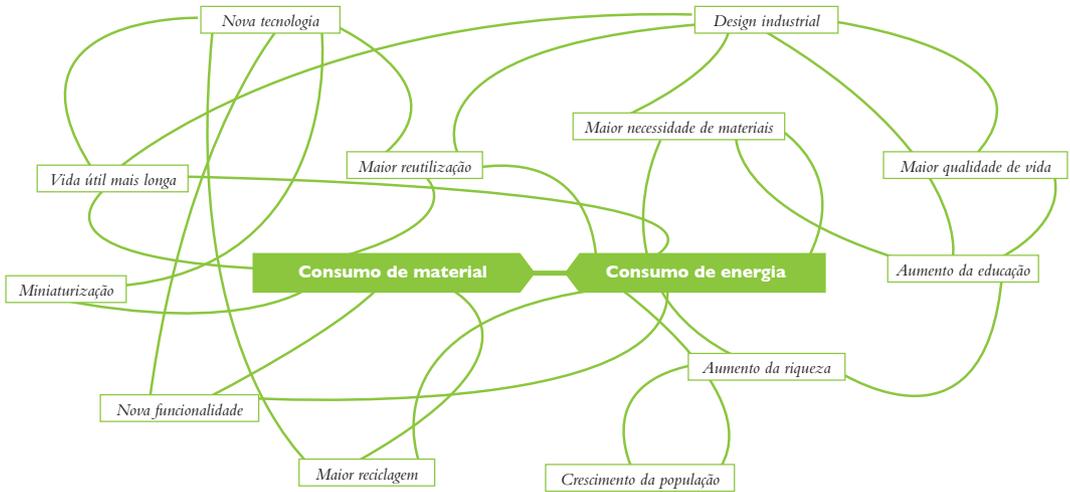
como herói. Vamos examinar isso com um pouco mais de detalhes porque é um labirinto complexo, com potencial para muitas idas e vindas erradas.

Materiais como recursos

Será que realmente vamos esgotar materiais ou petróleo e gás? Hoje, o desperdício desses recursos sugere que sim; há relatórios escritos, começando com o famoso relatório do Clube de Roma⁹ em 1972, que sugerem que vamos ficar sem eles. Uma economia de mercado pode ter muitas falhas, mas também contém mecanismos de retorno de natureza restritiva. À medida que os recursos naturais de materiais são consumidos e os minérios de alto teor diminuem, os preços aumentam; a utilização de minérios de teores mais baixos torna-se economicamente insustentável e o consumo cai. Uma visão mais equilibrada é que nunca “esgotaremos” nada, mas poderá ser muito desconfortável viver com os ajustes impostos pelo aumento do custo, o que dá razão suficiente para insistir em uma política de restrição e conservação.

Uma preocupação mais imediata é o impacto das atividades industriais sobre o ambiente. Como já mencionamos no Capítulo 2, há quem, ao observar o atual nível de consumo e a taxa de seu crescimento, argumente que somente sua redução maciça pode diminuir o impacto sobre o ambiente a um nível aceitável. Essas transformações poderiam ocorrer sem uma mudança no estilo de vida que poucos aceitariam? Poderiam, embora isso esteja longe de ser certeza. Tome o exemplo do automóvel. Vinte e cinco anos atrás, o carro médio fazia 4,7 km/l; hoje podemos comprar um

9. Os Limites do Crescimento — 1º Relatório do Clube de Roma, por Meadows et al. (1972), provocou forte reação quando publicado, mas provou, de certa forma, ser visionário.



carro para a família que faz 14 km/l — isto é, consome três vezes menos. A vida média de um pneu, 25 anos atrás, era de aproximadamente 30 km; agora está próxima de 80 km — quase três vezes mais. No entanto, grandes mudanças são possíveis, mas não suficientes. O número de proprietários de carros e a distância média percorrida por ano também aumentaram, no mesmo período, aproximadamente seis vezes, o que supera até mesmo mudanças maciças.

Equilíbrio entre material e consumo de energia

Os modos mais óbvios de conservar material são fazer produtos menores, fazê-los durar mais e reciclá-los quando enfim chegam ao final da vida útil. Mas o que parece óbvio às vezes pode ser enganador. Materiais e energia são parte de um sistema complexo e altamente interativo, esboçado na Figura 4.5. Aqui, catalisadores primários de consumo como o crescimento da população, o crescimento da riqueza e nova tecnologia parecem acelerar o consumo de materiais e energia e dos

subprodutos que produzem. Mas — só para dar um exemplo — riqueza também traz educação e, com ela, maior conscientização dos problemas que esses subprodutos criam, o que restringe o consumo.

As interações entre influências são complexas. Nova tecnologia, por exemplo, oferece produtos mais eficientes no consumo de materiais e energia, ainda que, por também oferecer mais funcionalidade, crie obsolescência e o desejo de substituir um produto para o qual ainda resta vida útil. Produtos eletrônicos são exemplos primordiais disso: 80% são descartados quando ainda funcionais. E observe, mesmo nesse nível simples, as consequências de uma vida útil mais longa para o produto — uma medida aparentemente óbvia. É claro que conservar artefatos pode ajudar; porém, em uma era na qual nova tecnologia produz produtos mais limpos e mais econômicos (válido particularmente para carros, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos), ampliar a vida útil de produtos antigos pode ter uma influência negativa sobre o ambiente.

Figura 4.5
– Interação complicada com o meio ambiente
Natureza interativa das influências sobre o consumo de materiais e energia.

E, como exemplo final, considere a influência bivalente do design industrial. Os designs duradouros do passado são evidência de sua capacidade de criar produtos valorizados e bem-conservados. Mas hoje, muitas vezes o design é usado como uma poderosa ferramenta para estimular o consumo, criando a percepção que “novo” é desejável e que até o que é ligeiramente “velho” não tem mais graça. Como o design pode ser usado para apoiar e realçar o meio ambiente, em vez de ameaçá-lo?

Ecodesign

Quando sua casa não lhe serve mais, você tem duas opções: pode comprar uma nova ou adaptar a que você tem e, ao adaptá-la, torná-la mais pessoalmente sua. Casas permitem isso. A maioria dos outros produtos não; e muitas vezes a percepção que temos do valor de um produto velho (diferentemente de uma casa velha) é tão baixa que simplesmente o descartamos. E isso destaca um desafio do design: criar produtos que podem ser adaptados e personalizados de modo que adquiram, como uma casa, um caráter próprio exclusivo e transmitam a mensagem “me guarde, eu sou parte de sua vida”. Isso sugere uma união do projeto técnico com o design industrial para criar produtos que podem aceitar desenvolvimento tecnológico, mas ao mesmo tempo são feitos com tal qualidade de material, design e adaptabilidade que criam

um caráter duradouro e individual, algo para deixar para seus filhos.

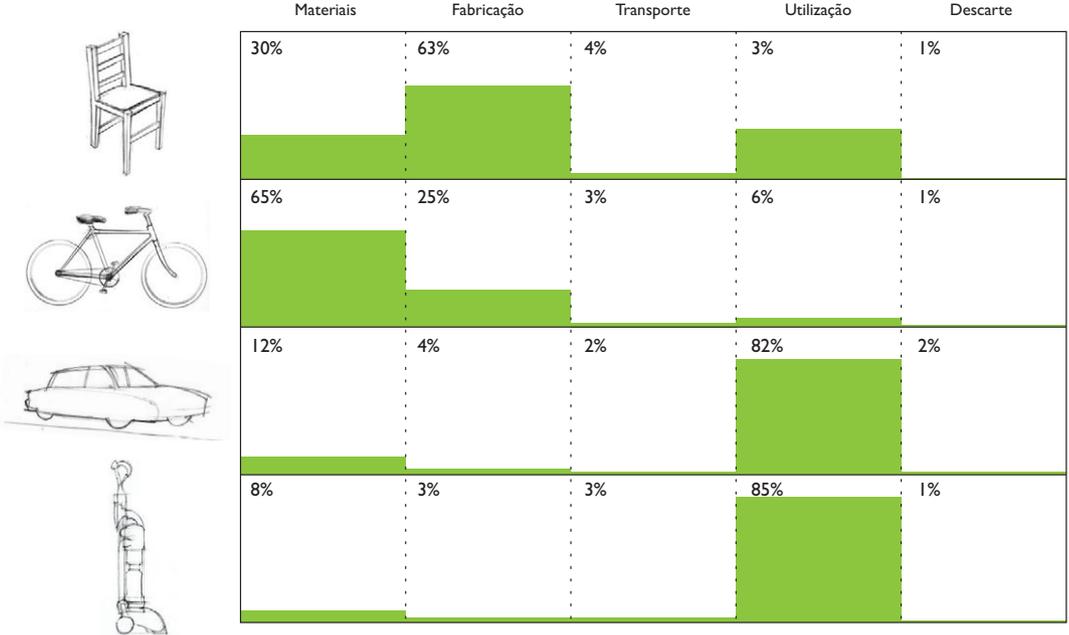
Bem, isso talvez seja um ideal e um ideal que depende tanto de mudança cultural quanto do design. Para abordar o problema em um nível mais prático e identificar com maior clareza o papel dos materiais, é necessário reconhecer dois aspectos fundamentais. O primeiro é o que afirmamos na Figura 4.5: o consumo de materiais e energia é parte de um sistema interativo e de alta complexidade. Soluções simples (“proibam a utilização do chumbo”, “não use plástico porque sua fabricação requer muita energia”) podem ter efeito oposto ao desejado. O segundo decorre do conceito do ciclo de vida do material mostrado na Figura 2.3. A questão é que há quatro estágios significativos. Minérios e insumos primários são consumidos para criar materiais; os materiais são utilizados para fabricar produtos que, quase sempre, consomem energia durante toda a sua vida útil; e, ao final de sua vida útil, são descartados ou reciclados. Produtos passivos são os que não requerem muita energia para cumprir sua função primária (móveis, carpetes e acessórios, pontes, edifícios sem calefação); para esses, as fases de produção e manufatura dominam o consumo de energia e materiais (Figura 4.6). Nesse caso, ampliar a vida útil do produto faz sentido; dobrar a vida útil de qualquer deles reduz quase à metade o consumo de recursos. Já vimos que um móvel bem-desenhado, feito com materiais de qualidade, pode adquirir valor e desejabilidade com o tempo, e sua vida útil ilimitada não tem consequências negativas para o sistema da Figura 4.5.

Ao contrário, produtos consumidores de energia (eletrodomésticos,

Figura 4.6 – Vaso de flores ecológico

Esse vaso de flores ecológico, projetado para apartamentos pequenos, é feito de polipropileno reciclável e transforma em adubo a embalagem em que foi entregue (imagem por cortesia de Cynthia Garden Design).





veículos, edifícios com sistemas de calefação ou ar-condicionado) consomem mais recursos — acima de tudo, mais energia — na fase de utilização de sua vida útil do que todos os outros juntos (Tabela 4.7). Então, o maior potencial de melhoria encontra-se no exame da utilização e do descarte, e não da fabricação. Aumentar a vida útil de produtos que consomem energia, em particular daqueles que utilizam tecnologia que está mudando rapidamente, pode ser contraprodutivo por razões que já citamos. Em vez disso, o foco está em materiais leves para reduzir o consumo de combustíveis em sistemas de transporte, equipamentos eletrônicos mais eficientes, dotados de modos “stand-by” e “dormir” que interrompem o consumo de energia elétrica quando o produto está inativo, e materiais com melhor isolamento térmico para reduzir o desperdício de energia em geladeiras, freezers e

sistemas de calefação. E, se a vida útil do produto é curta, reutilizá-los ou reciclá-los oferece ganhos particularmente grandes.

Legislação internacional; padrões, diretrizes, impostos, comércio

A legislação, tipificada pelos decretos da US Environmental Agency ou pelas Diretivas Ambientais (Ambiental Directives) da União Europeia, exerce pressão sobre os fabricantes para que avaliem o impacto ambiental dos produtos e tomem providências para minimizá-lo. A legislação segue quatro formas amplas:

- Estabelecer padrões.
- Negociar acordos voluntários com a indústria.
- Decretar legislação vinculadora que impõe requisitos que previnem multas se não forem cumpridos.

Tabela 4.7 – Energia em produtos
 Valores aproximados para a energia consumida na produção, fabricação, utilização e descarte de quatro classes de produtos.

- Estabelecer instrumentos econômicos que procuram usar as forças do mercado para induzir mudanças; esses instrumentos tomam a forma de impostos, subsídios e esquemas de comércio.

Padrões

O padrão ISO 14000 da International Standards Organization define a família de padrões para sistemas de gerenciamento ambiental.¹⁰ Contém o conjunto ISO 14040, 14041, 14042 e 14043, publicado entre 1997 e 2000, que determina procedimentos amplos, porém vagos para a avaliação do ciclo de vida e sua interpretação. O ISO 14025 é um padrão adicional que orienta o relatório de dados da Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment — LCA) como uma Declaração de Produto Ambiental (Environmental Product Declaration — EPD) ou uma Declaração de Clima (Climate Declaration — CD).¹¹

Acordos voluntários e legislação vinculadora

A legislação atual visa à internalização de custos¹² e à conservação de materiais por meio do aumento das responsabilidades dos fabricantes, atribuindo-lhes a carga do custo do dano ambiental e do descarte. Citaremos alguns exemplos.

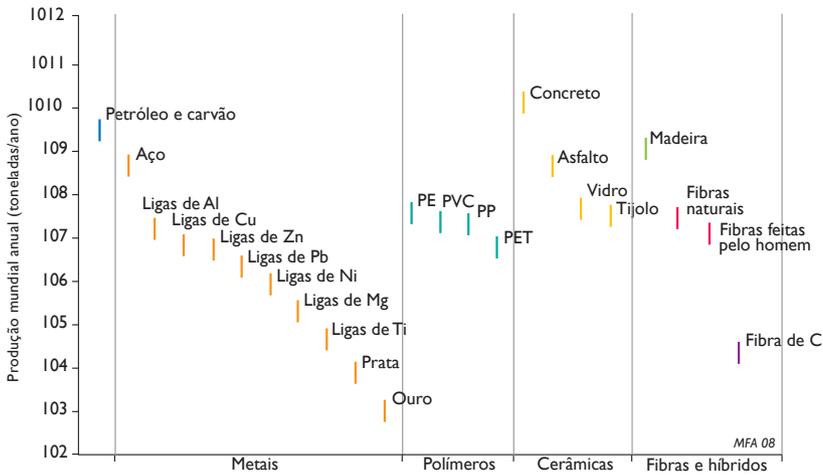
- O Decreto de Conservação e Recuperação de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act — RCRA) dos Estados Unidos é uma lei federal, que visa proteger o povo dos danos causados pelo descarte de resíduos e incentivar a reutilização, redução e reciclagem.

- O Código de Regulação Federal (Code of Federal Regulation — CFR) e Proteção do Ambiente (Protection of the Environment — CFR Parte 302) da Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency — EPA) dos Estados Unidos trata da proteção do ambiente e da saúde humana, impondo restrições a produtos químicos liberados no ambiente durante a fabricação, vida útil e o descarte.
- A Diretiva Europeia para Compostos Orgânicos Voláteis (European Volatile Organic Compounds — VOCS, 1999) limita a emissão de VOCS de solventes e suportes orgânicos como os existentes em tintas de base orgânica e fluidos de limpeza industrial. O cumprimento dessas diretivas tornou-se obrigatório em 2007.
- A Diretiva Europeia para Veículos em Fim de Linha (European End-of-Life Vehicles Directive — ELV, 2000) estabelece normas para a recuperação de materiais de carros usados. O alvo inicial, uma taxa de reutilização e reciclagem de 80% por peso do veículo e o descarte seguro de materiais prejudiciais, foi estabelecido em 2006. Até 2015, o alvo da reciclagem subirá para 85%.
- A Diretiva Europeia para Resíduos de Materiais Elétricos e Equipamentos Eletrônicos (European Waste Electric and Electronic Equipment Directive — WEEE, 2002) busca aumentar a recuperação, reciclagem e reutilização de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos. Requer que os produtores financiem a coleta, recuperação e descarte seguro de seus produtos e que cumpram certas metas de reciclagem.

10. Consulte um resumo em www.iso-14001.org.uk/ISO-14040.

11. Consulte www.environdec.com se quiser mais detalhes.

12. O princípio “quem polui paga”.



**Gráfico 4.2 –
Matérias-primas**
Produção mundial dos
materiais que utilizamos em
maiores quantidades.

- A Diretiva Europeia para Produtos que utilizam Energia (European Energy-using Products Directive — EUP, 2003) estabelece uma estrutura de requisitos de ecodesign para essa categoria de produtos — eletrodomésticos, equipamentos eletrônicos, bombas, motores e semelhantes. Requer que os fabricantes de qualquer um desses produtos “demonstrem que consideraram a utilização de energia em seu produto no que diz respeito a materiais, fabricação, embalagem, transporte e distribuição, utilização e final da vida útil. Para cada um desses itens o consumo de energia deve ser avaliado e providências para minimizá-lo devem ser identificadas”.
- A Diretiva Europeia para Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Substâncias Químicas (The European Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemical Substances — REACH, 2006) atribui aos fabricantes a responsabilidade de gerenciar os riscos de produtos químicos e encontrar substitutos para os mais nocivos.

Fabricantes na Europa e importadores para a Europa têm de registrar as substâncias controladas que usam sob a forma de um dossiê técnico, para cada uma, no qual são apresentadas suas propriedades, uma avaliação dos impactos sobre o ambiente e a saúde humana e as medidas de redução de risco que adotaram. A ausência desse registro torna ilegal a colocação dessas substâncias no mercado por fabricantes e importadores.

A carga que essa legislação impõe aos materiais e ao parque fabril é considerável. Todas essas restrições significam custo adicional para os fabricantes, que podem ser minimizados com a utilização de ferramentas de software bem-projetadas. Um levantamento dessas ferramentas e uma discussão mais aprofundada da legislação ambiental podem ser encontrados em vários livros lançados recentemente.¹³

Energia incorporada

Cerca de 20% de toda a energia que consumimos do CO₂ que liberamos na atmosfera provém da fabri-

13. Consulte Guidice et al. (2006), Vezzoli e Manzini (2008), e Ashby (2009). 1 MJ (megajoule) é aproximadamente 0,3 kWh.

Gráfico 4.3 – Níveis de CO₂

Dióxido de carbono liberado na atmosfera como consequência da fabricação dos 11 materiais apresentados em cada módulo.

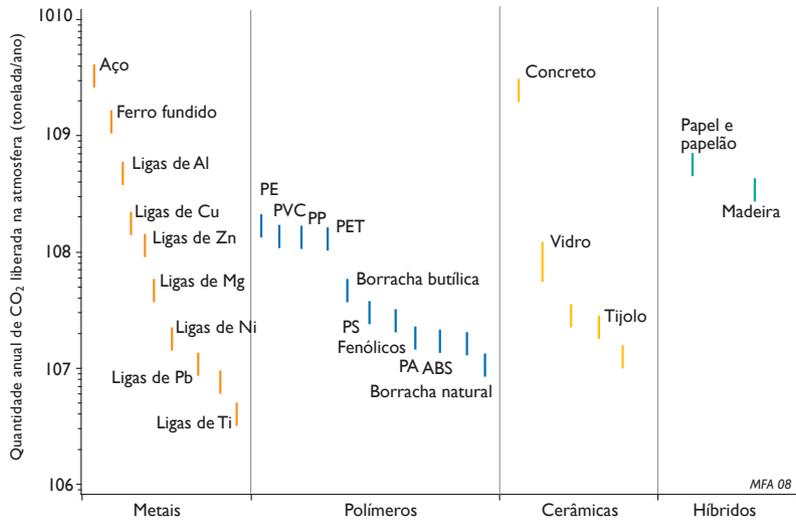
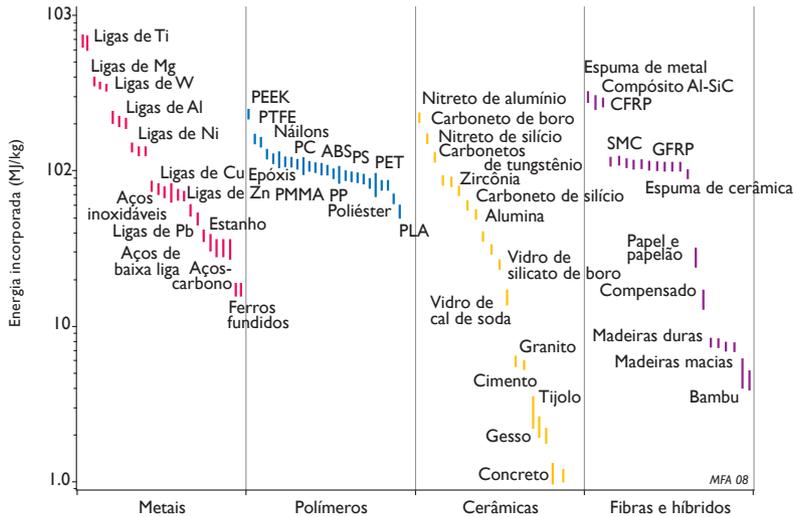


Gráfico 4.4 – Energias incorporadas de materiais por unidade de massa



ção de materiais para manufatura (Gráficos 4.2 e 4.3). Grande parte da energia vem da fabricação dos 11 materiais, que usamos nas maiores quantidades. A energia incorporada é a energia que deve ser dedicada à criação de 1 kg de material usável — 1 kg de aço, ou de grânulos de PET, ou de cimento em pó, por exem-

plo — medida em MJ/kg.¹⁴ Inclui a energia gasta na extração, transporte e refino de minérios e insumos primários exigidos para produzir o material, e inclui a energia gasta para converter o minério refinado em metal ou os produtos químicos derivados do petróleo em plásticos. A expressão “energia incorporada” é enganadora,

14. As energias incorporadas normalmente são de cerca de 100 MJ/kg — aproximadamente a energia contida em 3 litros de gasolina.

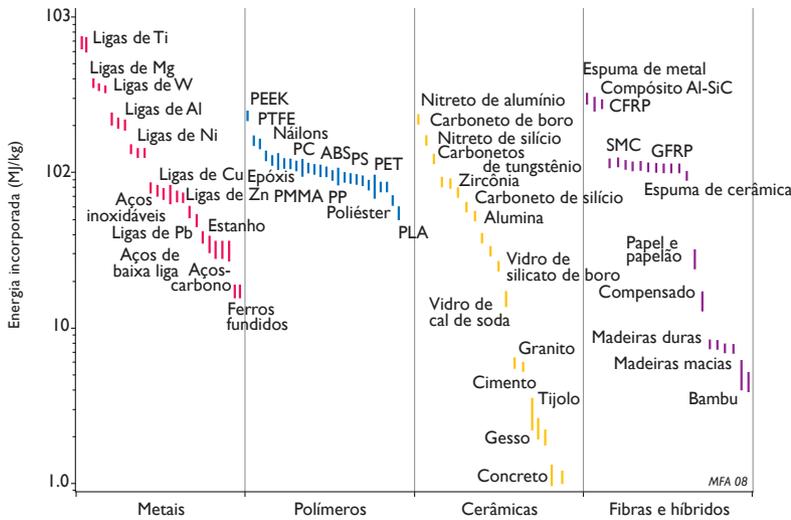


Gráfico 4.5 – Energias embutidas de materiais por unidade de volume

já que sugere que essa energia está de certa forma contida dentro do material, e portanto poderia ser recuperada. Um pouco está — e é por isso que a reciclagem é atraente —, mas toda, de jeito nenhum.

Energias embutidas por unidade de massa (unidades: MJ/kg) são comparadas no Gráfico 4.4. Entre os metais comuns, as ligas leves baseadas em alumínio, magnésio e titânio têm os valores mais altos, próximos de 1.000 MJ/kg para o titânio (metais preciosos têm valores ainda mais altos). Todos os polímeros se agrupam ao redor de 100 MJ/kg, menos do que as ligas leves, porém consideravelmente mais do que aços e ferros fundidos, com energias entre 20 e 40 MJ/kg. Cerâmicas técnicas como a alumina de grau eletrônico (Al_2O_3) têm altas energias; as do vidro, cimento, tijolo e concreto são muito mais baixas. Também os compósitos apresentam ampla dispersão. Compósitos de alto desempenho — aqui pensamos em CFRP (polímeros reforçados com

fibra de carbono) — encontram-se na parte superior, bem acima da maioria dos metais. No outro extremo, papel, compensado e madeira são comparáveis com os demais materiais da indústria da construção.

Mas a energia incorporada por unidade de massa é a base de comparação adequada? Em vez disso, suponha que a comparação é feita por unidade de volume (Gráfico 4.5). O quadro muda. Agora os metais, como uma família, encontram-se acima dos outros. Polímeros se agrupam em torno de um valor mais baixo do que o da maioria dos metais — por essa medida, eles não são aqueles materiais famintos de energia como às vezes são representados. Os materiais de construção não metálicos — concreto, tijolo, madeira — estão bem abaixo de todos eles. Agora o CFRP é comparável com o alumínio.

Isso levanta uma questão: se temos de escolher materiais para minimizar a energia incorporada, que base de comparação deveríamos usar? Uma escolha

Quadro 4.3 – Ao alcance dos sentidos

Atributos táteis, visuais e acústicos de materiais.

Sentido	Atributo
Tato	Quente
	Frio
	Macio
	Duro
	Flexível
Rígido	
Visão	Oticamente claro
	Transparente
	Translúcido
	Opaco
	Refletivo
	Brilhante
Fosco	
Texturizado	
Audição	Abafado
	Mortiço
	Agudo
	Ressonante
	Campainha
	Tom grave
Tom agudo	
Paladar/olfato	Amargo
	Doce

errônea invalida a comparação, como acabamos de ver. A resposta certa é comparar energia por unidade de função.

Estética: os cinco sentidos e mais

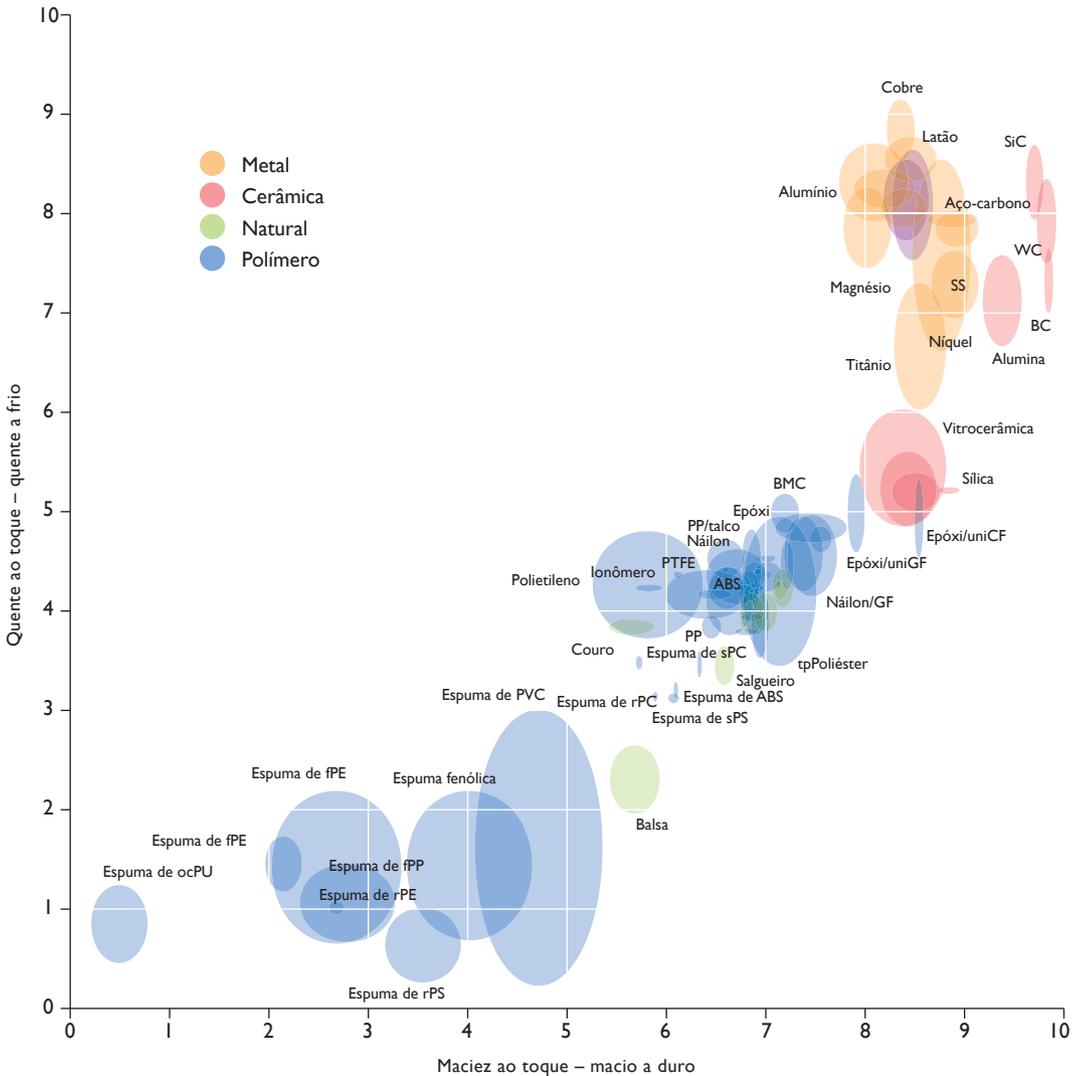
Atributos estéticos são os que estão relacionados com os sentidos: visão, tato, audição, olfato e paladar (Quadro 4.3). Focalizaremos os três primeiros neste capítulo, embora com certeza poderia ser igualmente necessário e inspirador considerar os dois últimos — olfato e paladar. Quase todos concordariam que o toque dos metais é “frio”; que o toque da cortiça é “quente”; que o som de uma taça de vinho quando batemos nela de leve é “como o de uma campainha”, que o som de uma caneca de peltre é “abafado”, até mesmo “mortiço”. À distância, um copo de plástico pode ser visualmente indistinguível de um copo de vidro, mas quando o pegamos, sentimos que ele é mais leve, mais quente, menos rígido; bata de leve nele e o som obtido é bem diferente. A impressão que ele deixa é tão diferente da deixada por um copo de vidro que, em um restaurante caro ele seria completamente inaceitável. Essas são

as mais simples das distinções estéticas e, de um modo aproximado, podem ser quantificadas. Ainda que as limitações sejam óbvias, dentro delas vale uma tentativa, visto que isso poderia permitir uma triagem de primeiro nível para verificar se os materiais cumprem requisitos estéticos especificados. Então, vamos lá.

Tato: os atributos táteis

Aço é “duro”; vidro também; diamante é mais duro do que qualquer um dos dois. Materiais duros não são arranhados com facilidade; na verdade, podem ser usados para arranhar outros materiais. Em geral aceitam alto polimento, resistem à distorção e são duráveis. A impressão de que um material é duro está diretamente relacionada à propriedade de “dureza” do material, medida por engenheiros de materiais e tabulada em manuais. Esse é um exemplo de atributo sensorial relacionado diretamente com um atributo técnico.

“Macio” parece ser o oposto de “duro”, mas, em termos de engenharia, não é — não há nenhuma propriedade de engenharia denominada “maciez”. Um material macio deflete quando manuseado, cede um pouco, é molenga, mas, quando liberado, retorna à sua forma original. Isso é comportamento elástico (ou viscoelástico), e a propriedade de material que mais o influencia é o módulo de elasticidade, e não a dureza. Elastômeros (borrachas) têm toque macio; as espumas de polímeros também: ambas as classes de material têm módulos de elasticidade de 100 a 10.000 mais baixos do que os dos sólidos ordinariamente “duros”; é isso que lhes dá o toque macio. Materiais duros podem se transformar em “macios”



se lhes forem dadas formas nas quais podem ser vergados ou torcidos: aços duros sob a forma de molas macias; vidro estirado em fibras e tramado em tecidos. Para comparar a maciez intrínseca de materiais (em oposição à maciez adquirida pela forma) eles devem ser equiparados sob a mesma forma, e então o módulo de elasticidade é a propriedade fundamental.

Uma medida adequada de dureza e maciez é discutida no Apêndice deste capítulo. Ela é usada como um dos eixos do Gráfico 4.6.

Um material é “frio” ao tato se conduz o calor para longe do dedo rapidamente; é “quente” se não o fizer. Isso tem algo a ver com o atributo técnico “condutividade térmica”, porém é mais do que isso — depende

Gráfico 4.6 – Atributos táteis de materiais

Alguns materiais são macios e quentes ao toque; outros são duros e frios. Aqui, esses atributos são apresentados em um diagrama que revela uma notável correlação entre os dois (CES Edu, 2009).

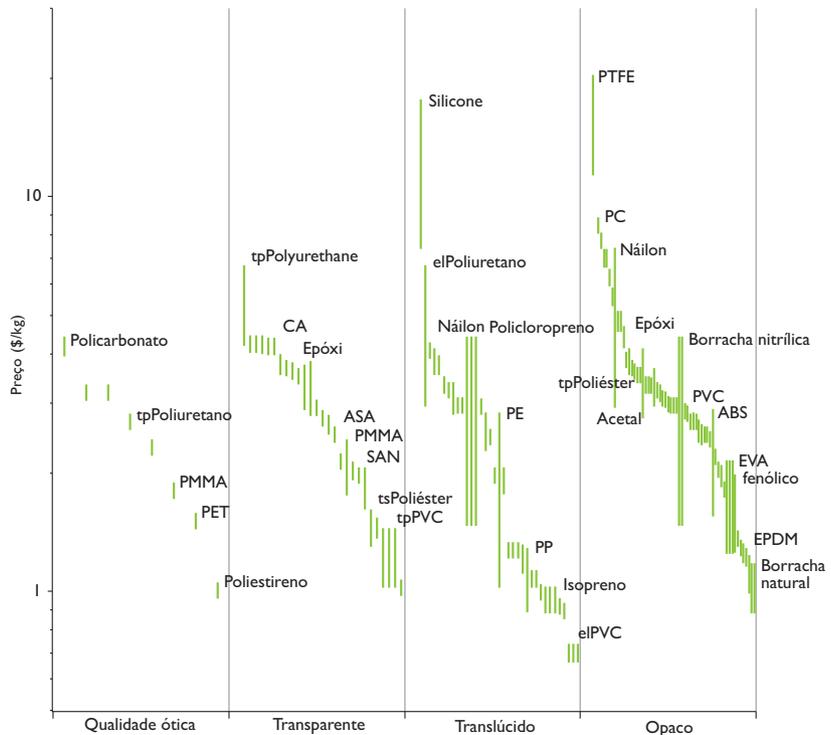
também do calor específico. Uma medida da frieza ou calor percebido de um material (no sentido do calor, e não da cor) é desenvolvida no Apêndice. Ela é mostrada no outro eixo do Gráfico 4.7. A figura apresenta as propriedades táteis dos materiais de um modo muito interessante. Espumas de polímeros e madeiras de baixa densidade são quentes e macias; a balsa e a cortiça também. Cerâmicas, pedras e metais são frios e duros; o vidro também. Polímeros e compostos encontram-se entre os dois.

Visão: os atributos visuais

Metais são opacos. A maioria das cerâmicas, porque são policristalinas e os cristais dispersam a luz, é opaca ou translúcida. Vidros e monocristais

de algumas cerâmicas são transparentes. Polímeros têm a maior diversidade de transparência, que varia da transparência de qualidade ótica a completamente opaca. A transparência é comumente descrita por uma classificação de quatro níveis: opaco, translúcido, transparente e claro como água ou de qualidade ótica. É fácil entender essas palavras comuns no dia a dia; por isso são usadas nos perfis de materiais mais adiante neste livro. A Figura 4.14 dá a classificação por transparência de polímeros comuns. Para maior utilidade, os dados são representados em módulos gráficos em relação ao custo. Os polímeros mais baratos que oferecem transparência ótica são PET, PS e PMMA. Epóxios podem ser transpa-

Gráfico 4.7 – Preço e transmissão de luz
Atributos óticos de polímeros mostrados em ordem decrescente de custo em cada categoria (CES Edu, 2009).



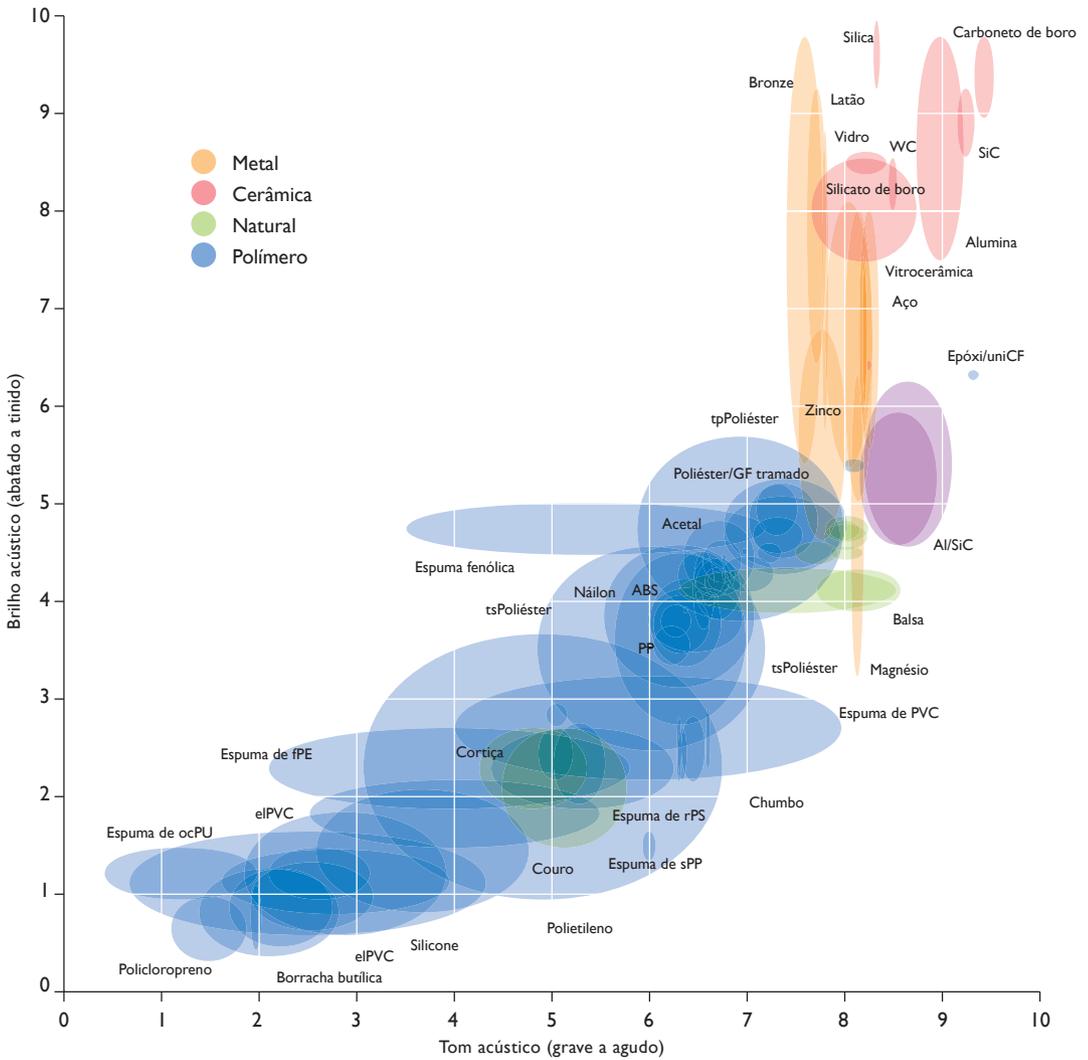


Gráfico 4.8 – Tom e brilho acústico
Atributos acústicos de materiais (CES Edu, 2009).

rentes, mas não com qualidade ótica. Náilon são, na melhor das hipóteses, translúcidos. Fenólicos, a maioria dos ABS, e todos os polímeros recheados ou reforçados com carbono são translúcidos ou opacos.

Cores podem ser quantificadas por análise espectral, mas isso — do ponto de vista do design — não ajuda muito. Um método mais efetivo é o da paridade de cores, que utiliza perfis

de cores como os fornecidos pela Pantone;¹⁵ uma vez que uma paridade foi encontrada, pode ser descrita pelo código que cada cor carrega. Por fim, há a refletividade, um atributo que depende em parte do material e em parte dos detalhes da superfície. Como a transparência, é comumente descrita por uma classificação: fosco morticho, casca de ovo, semibrilho, brilho, espelhado (Tabela 4.6).

15. A Pantone (www.pantone.com) dá conselhos detalhados sobre seleção por cor, incluindo perfis de cores e boas descrições das associações e percepções de cor.



Figura 4.7 – Mapas multidimensionais: atributos estéticos
 Mapa MDS de materiais por atributos estéticos (Dados de CES Edu, 2009).

Audição: os atributos acústicos

A frequência do som (tom — agudo ou grave) emitido quando percutimos um objeto está relacionada com duas propriedades do material: módulo de elasticidade e densidade. A medida desse tom, detalhada no Apêndice, é usada como um dos eixos da Figura 4.15. A frequência não é o único aspecto da resposta acústica — um outro tem a ver com o amortecimento. O som emitido por um material muito amortecido é surdo e abafado; o som de um material pouco amortecido é

um tinido como o de uma campainha. O brilho acústico — o inverso do amortecimento (ver Apêndice) — é usado como o outro eixo do Gráfico 4.8. Agrupa materiais que têm o mesmo comportamento acústico.

Bronze, vidro e aço tinem quando percutidos, e o som que emitem tem — em uma escala relativa — um tom alto; são usados para fabricar sinos. A alumina, nessa classificação, tem essa mesma qualidade de soar como um sino. O som da borracha, espumas e muitos polímeros é surdo e, em relação

aos metais, vibra em baixas frequências; esses materiais são usados para abafar o som. O chumbo também tem um som surdo e de tom grave; é usado como revestimento para isolamento acústico.

O que acontece se todos esses atributos forem combinados? A Figura 4.7 mostra o resultado. É um mapa MDS que combina os atributos que acabamos de descrever. Como ocorre com o outro mapa MDS que apresentamos, há aglomeração pronunciada de um tipo que é amplamente coerente com a experiência — o couro fica próximo do PVC, cerâmicas perto de metais, madeiras perto de fenólicos. O mapa não deve ser superinterpretado, pelas razões já apresentadas; mas realmente tem poder de sugestão.

Personalidade: conexões emocionais

Interagimos com materiais por intermédio de produtos. A interação envolve seus atributos técnicos e estéticos, mas isso não é tudo. Um produto tem atributos e associações percebidos — e são esses, em parte, que lhe dão sua personalidade, algo que os designers se esforçam muito para criar. Mas podemos dizer que um *material* tem atributos percebidos ou associações indiscutíveis? Uma personalidade? À primeira vista, não — ele os adquire somente quando usado em um produto. Como um ator, pode incorporar muitas personalidades diferentes, dependendo do papel que queremos que ele represente.

Apesar disso... pense na madeira. É um material natural cujas fibras dão a uma superfície textura, padrão e toque que outros materiais não

têm. Ela é tátil — é percebida como mais quente do que muitos outros materiais, e aparentemente mais macia. É associada com sons e cheiros característicos. Tem tradição; desperta associações de artesanato. E envelhece bem, adquirindo caráter adicional com o tempo. Coisas feitas de madeira são mais valorizadas quando velhas do que quando novas. Isso é mais do que apenas estética; são traços que definem uma personalidade, que deve ser revelada pelo designer, certamente, mas que não é o mais importante.

E metais... Metais parecem frios, limpos, precisos. Produzem um tinido quando percutidos. Podem refletir luz — particularmente quando polidos. São aceitos e confiáveis: metal usinado parece forte, sua própria natureza sugere que passou por um processo de engenharia. A resistência dos metais permite estruturas delgadas — o espaço de estações ferroviárias semelhantes ao de uma catedral ou o vão de pontes. Podem ser trabalhados e adquirir formas fluidas como rendas intrincadas ou fundidos em formas sólidas com detalhe e complexidade integrais. E — como a madeira — metais podem envelhecer bem, adquirindo uma pátina que os torna mais atraentes do que quando acabaram de ser polidos — pense no bronze das esculturas, no peltre das canecas, no chumbo e no cobre dos telhados.

E a cerâmica ou o vidro? Esses têm uma longa tradição: pense na cerâmica grega e no vidro romano. Aceitam praticamente qualquer cor; isso e sua resistência total a arranhões, abrasão, descoloração e corrosão lhes dão uma certa imortalidade, ameaçada somente por sua fragilidade. São — ou foram — os materiais

Quadro 4.4 – Percepções

Lista dos atributos percebidos nos produtos, organizada em pares opostos.

16. Há vários desse estudos. A leitura deles é fascinante. Manzini (1989) ilustra como a combinação de material e forma é usada para obter atributos de produtos e respostas humanas específicos. Harni (1996) explora as experiências e associações sensoriais de objetos usando como protótipos 12 estilos diferentes: folclórico, luxuoso, kitsch, pornô, brinquedo, desenho animado, esportivo, pseudoecológico, militar, profissional, espacial e “branco”, cada um aplicado a cinco produtos: uma torradeira, um ferro de passar, um secador de cabelos, um mixer e um barbeador elétrico. O trabalho demonstra dramaticamente o modo como materiais, tratamentos de superfícies e formas podem ser usados para criar atributos de percepção. Em um nível mais formal há a área da semiótica de produtos – o estudo de sinais e do papel que desempenham no comportamento sociocultural. Um produto transmite sinais que são interpretados de maneiras diferentes, dependendo do observador e do contexto. Monö e Søndergaard (1997) usam os termos “ícone”, “índice” e “símbolo” como um vocabulário básico para descrever a semiótica de produtos. Um ícone é um protótipo, uma abstração idealizada dos atributos do produto (um desenho de uma moldura que representa um quadro); um índice está ligado ao que ele significa por uma causa (rastros na neve indicam que alguém passou por ali); e um símbolo representa um reconhecimento de acordo entre pessoas (uma coroa simboliza realeza). Podem ser usados para agregar significado a produtos.

Percepção	Oposto
Agressivo	· Passivo
Barato	· Caro
Clássico	· Da moda
Clínico	· Amigável
Esperto	· Tolo
Comum	· Exclusivo
Decorado	· Sem enfeites
Delicado	· Grossoiro
Descartável	· Duradouro
Sem graça	· Sensual
Elegante	· Desajeitado
Extravagante	· Discreto
Feminino	· Masculino
Formal	· Informal
Feito à mão	· Produzido industrialmente
Honesto	· Enganador
Engraçado	· Sério
Irritante	· Adorável
Maduro	· Jovem
Nostálgico	· Futurista

de grandes corporações de officio: vidro veneziano, porcelana de Meissen, cerâmica Wedgwood, cujo valor às vezes é tão alto quanto o da prata. E hoje a cerâmica tem uma associação adicional — a da tecnologia avançada: fogões, válvulas de alta pressão/alta temperatura, revestimento de ônibus espaciais... materiais para condições extremas.

E, enfim, os polímeros. “Uma imitação barata do plástico” era uma frase comum — e é difícil sobreviver a uma reputação como essa. Ela surgiu das primeiras utilizações do plástico: simular a cor e o brilho da cerâmica japonesa feita à mão, muito valorizada na Europa. Como mercadoria, polímeros são baratos. São fáceis de colorir e moldar (é por isso que são denominados “plásticos”), o que facilita a imitação. Diferentemente das cerâmicas, sua superfície brilhante é fácil de arranhar, e suas cores desbotam — eles não envelhecem

graciosamente. Dá para perceber de onde vem a reputação. Mas ela é justificada? Nenhuma outra classe de material pode adotar tantas características quanto os polímeros; coloridos, parecem cerâmica; estampados, podem parecer madeira ou têxteis; metalizados, parecem exatamente um metal. Podem ser tão transparentes quanto o vidro ou tão opacos quanto o chumbo, tão flexíveis quanto a borracha ou tão rígidos — quando reforçados — quanto o alumínio. Porém, apesar desse comportamento camaleônico, eles têm uma certa personalidade: são quentes — muito mais quentes do que metal ou vidro; são adaptáveis — isso é parte do seu caráter especial; e se prestam, particularmente, a um design de cores brilhantes, despreocupado e até engraçado.

Portanto, há um caráter oculto em um material, antes mesmo de ele adotar uma forma reconhecível — um tipo de personalidade embutida, tímida que seja, nem sempre visível, fácil de ocultar ou disfarçar, mas que, quando adequadamente manipulada, pode contribuir para o bom design. Os atributos que discutimos aqui são qualitativos, às vezes subjetivos — muito distantes da precisão afiada dos atributos técnicos com os quais começamos este capítulo. Porém, dada a sua importância no design de produtos, vale a pena explorá-los ainda mais. E aqui temos de fazer uma ligeira digressão, voltando de materiais para produtos, para explorar a questão mais fácil: como podemos caracterizar os atributos percebidos de produtos? Precisamos de uma linguagem — um meio para expressar essas coisas em palavras.

Vocabulário de percepção

Existem pesquisas que exploram os atributos estéticos e percebidos de produtos.¹⁶ Elas sugerem que se pode chegar a um acordo, até certo ponto, na descrição de percepções. Claro que tentar expressar atributos percebidos em palavras é arriscado — nem todos os percebem do mesmo modo. São subjetivos; dependem do produto em si e, o que é importante, do contexto e da cultura em que são usados. Às vezes são ambíguos e seu significado muda com o tempo: um produto que parece agressivo ou luxuoso hoje pode parecer engraçado e retrô ou apenas sem graça amanhã (pense no estilo dos carros). Mas estamos limitados pela linguagem — o modo mais importante pelo qual nos comunicamos. Portanto, vale uma tentativa.

Um modo de reunir um vocabulário para percepções é fazer o que faria qualquer linguista que estivesse estudando uma nova linguagem — ouvir as palavras que os falantes nativos usam e observar os objetos dos quais estão falando. Jornais, revistas, catálogos de exposições e livros sobre design publicam resenhas de produtos.¹⁷ Essas resenhas incluem fotos do produto, um perfil do designer e, normalmente, o que diz um crítico — o “falante nativo” — sobre as percepções que tem do produto. Um levantamento de tudo isso resulta na lista do Quadro 4.4 — palavras utilizadas regularmente para descrever produtos e seus atributos, cada uma delas apresentada com uma oposta para afiar o significado. A lista foi simplificada e seu comprimento foi reduzido pela substituição de palavras quase equivalentes por uma única palavra (por exemplo, cômico,

engraçado = humorístico; durável, de uso prolongado = duradouro).

Até que ponto tal vocabulário é útil? Os críticos o usam para se comunicar com seus leitores e, dada a popularidade das publicações, fica claro que a linguagem que falam tem significado para eles. Mas é uma linguagem que os não especializados podem usar? Experimentos nos quais grupos de teste têm de atribuir palavras da lista a produtos que lhes são entregues (e que podem manusear), mostram que, no mínimo dentro de um dado grupo sociocultural, a concordância é, em termos estatísticos, significativa — aproximadamente 80% do grupo atribuem uma ou mais palavras iguais ao mesmo produto. O motivo de tais estudos é entender a percepção e comunicá-la — a capacidade de ligar palavras da lista de percepções dada na Figura 4.13 (ou alguma expansão dessa palavra) a produtos, de modo que os que têm atributos percebidos semelhantes possam ser comparados. É uma ideia útil e voltaremos a ela no Capítulo 7.

E — caso essa ideia de percepções ainda pareça intelectualmente dúbia — pense nos estilos de design históricos (Quadro 4.5). Dizer que um produto tem elementos de “*art nouveau*” ou “*streamform*” ou “*pop*” transmite, em uma única palavra ou frase, um aglomerado de ideias, algumas concretas, algumas abstratas. Cada estilo está associado a certos materiais — *art nouveau* à madeira esculpida, bronze fundido e ferro forjado; *streamform* a aço e alumínio; *pop* a plásticos. Cada um transmite associações de forma,

17. Os exemplos são da ID Magazine, “International Design Year Book” (1998, 1999), “ID Magazine Annual Design Review” (1998, 1999), dos livros de Byars (1995, 1997a, 1997b, 1998) e dos catálogos da exposição do MoMa denominada *Mutant Materials* (Antonelli, 1995), bem como da montagem pela ConneXion, denominada *Materials and Ideas for the Future* (Arredo, 2000).

Quadro 4.5 – Estilos de design

Cronologia de alguns movimentos de design, às vezes associados a inovações de materiais.

1900 e antes	
<i>Art nouveau</i>	1890
Artes e ofícios	1890
Funcional	1900
1900 a 1950	
Modernista	1900
Futurista	1910
<i>Art déco</i>	1920
<i>Streamform</i>	1930
Contemporâneo	1945
1950 e após	
<i>Pop</i>	1960
Retrô	1960
Clássico	1970
Pós-modernista	1970
Mênfis	1980

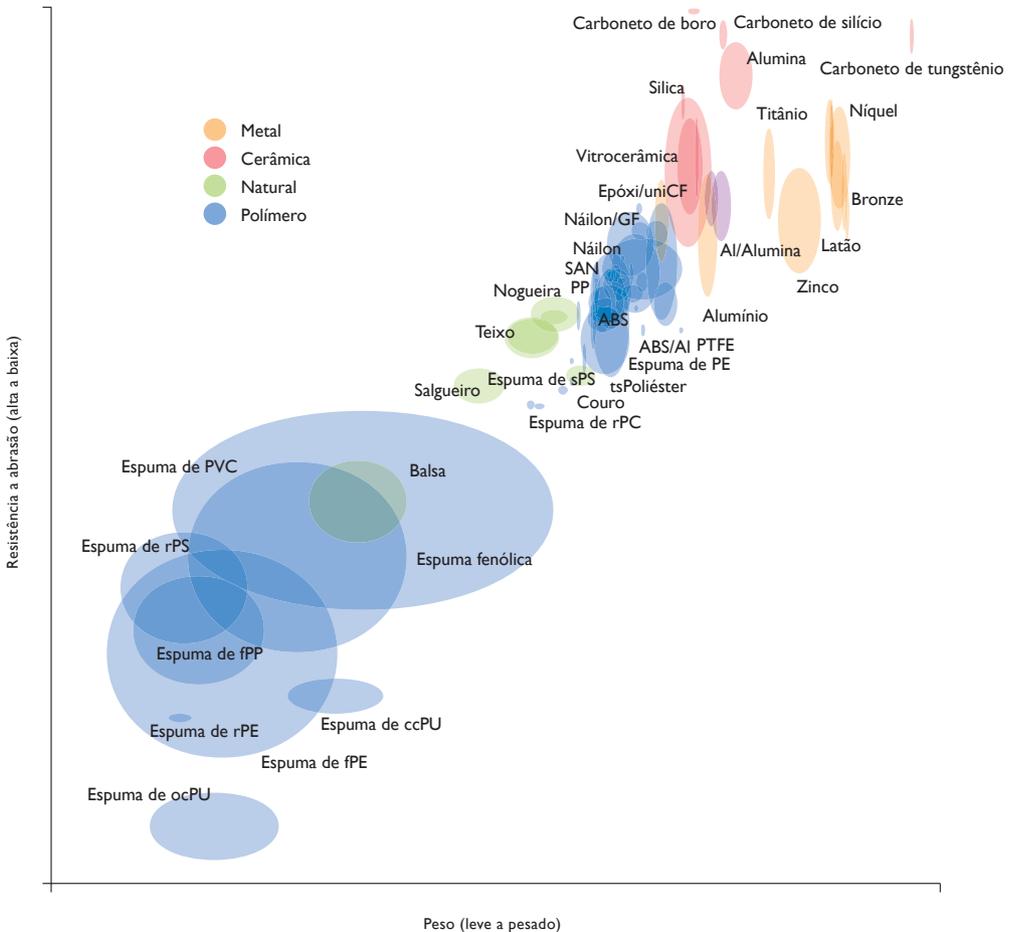
decoreção e cor. Porém, acima de tudo está a associação a uma era — *art nouveau* à Europa Central no final do século XIX; *streamform* aos Estados Unidos na década de 1930 e *pop* aos Estados Unidos na década de 1950 — e ao caráter cultural, econômico e intelectual daquela era, à sua *personalidade*.

Assim, um vocabulário para descrever os atributos percebidos de produtos é possível. Se as palavras são colocadas em contexto com imagens que as ilustram, proporcionam um

canal de comunicação — um canal que é útil para o design, e frequentemente usado (e mal-usado) em publicidade. Como acontece com todas as linguagens, as palavras e seus significados evoluem com o tempo. Aqui, a diferença é que a taxa de evolução é mais rápida do que a da linguagem como um todo, e por isso requer reescrever o léxico. Como todas as palavras, estas não têm significado universal — mas é com elas que temos de conviver. A alternativa é nenhuma comunicação.

Gráfico 4.9 – Resistência a abrasão e peso

Materiais com alta dureza resistem à abrasão; os que têm alta densidade são pesados. Há uma forte correlação entre os dois (CES Edu, 2009).



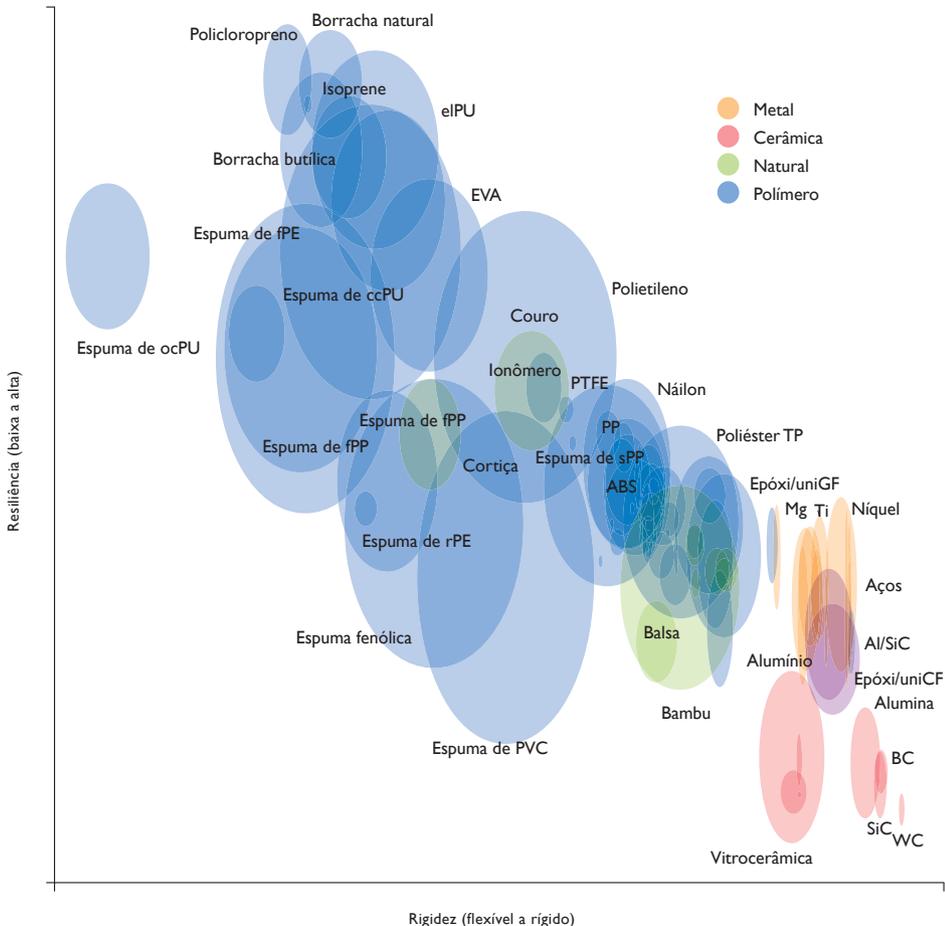
Portanto, produtos têm atributos de percepção e podem ser associados a certo estilo, e as pessoas podem amar o objeto em si, a experiência que ele proporciona e/ou a história que ele conta. Mas podemos dizer o mesmo dos materiais?

Percepção de atributos técnicos

Você não precisa ser formado em engenharia para saber que alguns materiais são mais rijos do que outros (alguns alimentos também); alguns são mais resilientes (algumas pessoas tam-

bém); alguns, mais flexíveis (como a sua conta de poupança); alguns menos resistentes à abrasão (como as crianças). Esses termos — rijos, resilientes, flexíveis, resistentes à abrasão — são palavras da vida diária utilizadas para descrever os aspectos de um material. São percepções de comportamento técnico, com certeza, e nesse sentido diferentes das citadas na lista da Figura 4.13. E, como muitas vezes são baseadas em atributos técnicos, podem, até certo ponto, ser quantificadas ou medidas, o que permite que os

Gráfico 4.10 – Resiliência e rigidez
 Materiais resilientes podem ser flexionados sem quebrar. Materiais rígidos não podem ser dobrados com facilidade (CES Edu, 2009).



**Figura 4.8 –
Expressão por
intermédio de
materiais**

A escolha do material em cada um desses produtos expressa, em parte, a funcionalidade e, em parte, a estética desejada: (a) PTFE, (b) acrílico, (c) alumínio (imagem da bicicleta por cortesia de MAS Design).



materiais sejam classificados por esses termos familiares.

Para uma determinada forma, a massa de um objeto depende da densidade, ρ , do material de que ele é feito. A resistência à abrasão é mais complexa — sua ligação mais próxima é com a dureza, H . Essas duas propriedades estão mapeadas no Gráfico 4.9. Há uma notável correlação entre elas: como regra geral, os materiais que são difíceis de arranhar também são rígidos.

A resiliência e a rigidez são um pouco mais complicadas. Resiliência é a capacidade de absorver deflexão sem danos — um pneu de automóvel é resiliente; pode subir um meio-fio e sobreviver. Rigidez é resistência à deflexão, medida — para uma forma dada — pelo módulo de elasticidade do material. Esses comportamentos também podem ser expressos em termos de atributos técnicos. Eles estão

mapeados no Gráfico 4.10. Observe que o aço e outros metais são rígidos, mas não muito resilientes. Borracha e vários polímeros são resilientes, mas nem um pouco rígidos.

**Conclusões:
expressão por
intermédio do material**

Há uma escola de *design thinking* cujo dogma central é que os materiais devem ser usados “honestamente”. Significa que a fraude e a dissimulação são inaceitáveis — cada material deve ser usado de maneira que sua força, sua aparência natural e as qualidades intrínsecas a ele sejam expostas. A ideia tem suas raízes na tradição do artesanato — a utilização de argilas e glasuras por oleiros, o uso de madeira por carpinteiros, as habilidades dos ourives de prata na criação de lindos

objetos, cada um explorando as qualidades únicas dos materiais com os quais trabalham — uma integridade em relação ao ofício e ao material.

Essa é uma visão a ser respeitada. Mas não é a única. A integridade do design é uma qualidade que os consumidores valorizam, mas eles também valorizam outras: humor, simpatia, surpresa, provocação, até mesmo choque. Não é preciso procurar muito para encontrar um produto que tem um desses atributos, e muitas vezes esse atributo é conseguido por meio da utilização de materiais de modos que enganam ou inspiram. Polímeros, como já dissemos, são frequentemente usados dessa maneira — sua adaptabilidade convida a isso. E, é claro, é parcialmente uma questão de definição — se você disser que um atributo que caracteriza os polímeros é a sua habilidade de imitar outros materiais, então usá-los desse modo é honesto.

Honestidade e autenticidade são uma parte importante do design, mas a invenção e a expressão também são. Há momentos no processo de design em que precisamos usar materiais para criar estrutura e superfícies simples e puras. Mas também há momentos em que precisamos usar materiais para criar comportamentos icônicos e logos corporativos. Ambos são uma parte necessária do bom design, e são esses elementos de materialidade que tornam um produto bem-sucedido no mercado e um clássico aos olhos e mentes da história do design.

Portanto, terminamos esse capítulo com a pergunta: até que ponto

os atributos de materiais — técnicos, estéticos, percebidos — podem ser usados para expressão? Há alguns exemplos óbvios. Ouro, prata, platina, diamante e safira têm associações de riqueza, sucesso, sofisticação e valor duradouro; usados em um produto, passam para ele as mesmas associações. Madeira entalhada ou polida sugere artesanato; cerâmicas sugerem elementos de luxo ou requisitos de desempenho extremo. Em geral, metais são reconhecidos como metais; um produto feito de metal adquire os atributos de indústria e resistência como parte de sua personalidade quase imediatamente. Mas os polímeros podem — ao menos na aparência — adotar o caráter de praticamente qualquer material; em particular, podemos fazer com que fiquem parecidos com metal, ou com madeira, ou até mesmo com vidro. Alguns exemplos de produtos são mostrados na Figura 4.8: Gortex (ou PTFE) em tênis de corrida; acrílico em lanternas traseiras de veículos; náilon e alumínio na bicicleta dobrável. A beleza que os designers precisam encontrar nos plásticos é a capacidade de fazer algo com eles que é impossível de qualquer outro modo. E, como ocorre com todos os materiais, precisamos ser cuidadosos e pensar no modo como podem ser e serão reciclados. O design e a expressão não pretendem ser frívolos; há um significado em cada etapa do processo, e é preciso pensar sempre em ideias que são sustentáveis e não apenas interessantes ou novas.

Leitura adicional

Antonelli, P. *Mutant Materials in Contemporary Design*, Museum of Modern Art, Nova York, 1995. (Publicação do MoMa [1995] para acompanhar sua extensiva resenha de materiais em produtos.)

Arredo, F. *Materials and Ideas for the Future*, Material Connexion, 4, Columbus Circle, Nova York, 2000. (Catálogo de uma exposição no Salon Internationale del Mobile, Milão, 2000.)

Ashby, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 2ª ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. (Texto que complementa este livro, apresentando métodos para selecionar materiais e processos de modo a cumprir requisitos de projeto técnico e uma grande quantidade de diagramas de propriedades de materiais.)

Ashby, M. F. *Materials and the Environment*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009. (Livro-texto que oferece os recursos — fundamentos, métodos, dados — que permitem a introdução de questões ambientais em cursos de materiais.)

Byars, M. *Innovations in Design and Materials: 50 Chairs* (1995); *50 Lights* (1997a) e *50 Tables* (1997b); *50 Products* (1998). RotoVision SA, Switzerland. (Byars reúne fotos de produtos contemporâneos e listas de designers e materiais principais.)

Cardwell, S.; Cather, R. e Groák, S. “New Materials for Construction”, *The Arup Journal*, v. 3, pp. 18–20, 1997, Ove Arup Partnership, 13 Fitzroy Street, Londres W1P 6BQ. (Os autores inventaram uma classificação intrigante para materiais, baseada em níveis de familiaridade.)

CES 4. *The Cambridge Engineering Selector*, versão 4, Granta Design, Cambridge, 2002, www.granta.co.uk. (Software para seleção de materiais e processos que contém planilhas de dados para mais de dois mil materiais e 150 processos.)

Charles, J. A.; Crane, F. A. A. e Furness, J. A. G. *Selection and Use of Engineering Materials*. 3ª ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997. (Abordagem baseada na Ciência de Materiais para a seleção de materiais — nada sobre estética.)

Dieter, G. E. *Engineering Design, a Materials and Processing Approach*. 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1991. (Texto bem-equilibrado e respeitado que focaliza o lugar de materiais e processamentos no projeto técnico. Nada significativo sobre design industrial.)

Dul, J. e Weerdneester, B. *Ergonomics for Beginners*. Londres: Taylor e Francis, 1993. (Breve, porém abrangente introdução à engenharia de fator humano.)

Farag, M. M. *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989. (Abordagem baseada na Ciência dos Materiais para a seleção de materiais — nada sobre estética.)

Flurschein, C. H. *Industrial Design in Engineering*. Londres: The Design Council and Springer-Verlag, 1983. (Coletânea de ensaios por vários autores que trata de aspectos da engenharia de fator humano e da estética.)

Guidice, F.; La Rosa, G. e Risitano, A. *Product Design for the Environment*. Londres: CRC/Taylor and Francis, 2006. (Resenha bem-equilibrada sobre o pensamento atual do ecodesign.)

Harper, C. A. (ed.). *Handbook of Materials for Product Design*. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2001. (Conjunto de artigos por diferentes autores, que detalham propriedades de aços, ligas de alumínio e titânio, polímeros comuns, compósitos, cerâmicas e vidros. Heterogêneo em estilo e conteúdo, mas fonte de referência útil em um único volume.)

Hawkes, B. e Abinett, R. *The Engineering Design Process*. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1984. (Introdução elementar aos aspectos técnicos do design de produto.)

ID Magazine, 440 Park Avenue South, 14º andar, Nova York, 1998, 1999. (A *International Design Magazine* apresenta resenhas e gráficos de produtos contemporâneos e experimentais.)

International Design Yearbook. Abbeville Press/Laurence King, Londres, 1998/1999. (Resenha anual de designs de produtos inovadores.)

Koodi Book. *The Koodi Code, 12 Styles, 5 Products*, The University of Art and Design Helsinque, Finlândia, 1996. (Pequeno e extraordinário livro que ilustra um exercício de design no qual cinco produtos – uma torradeira, um ferro de passar, um secador de cabelos, um mixer e um barbeador elétrico — foram redesenhados em três de 12 estilos — folclórico, luxuoso, kitsch, pornô, brinquedo, desenho animado, esportivo, pseudoecológico, militar, profissional, espacial e “branco” — como parte do Industrial Design Program em Helsinque.)

Kruskal, J. B. e Wish, M. “Multidimensional Scaling”, *Sage Publication N. 11*, Sage Publications Inc., 275 South Beverly Drive, Beverly Hills, ca 90212, 1987. (Tratado breve e claro sobre os métodos e a aplicação da escala multidimensional — um método para visualizar a estrutura oculta de um banco de dados, em particular os que têm dados imprecisos.)

Lewis, G. *Selection of Engineering Materials*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990. (Texto sobre seleção de materiais para projeto técnico baseado, em grande parte, em estudos de casos.)

Manzini, E. *The Material of Invention*. The Design Council, Londres, 1989. (Descrições intrigantes do papel do material em design e em invenções. A tradução do italiano para o inglês proporciona comentários e vocabulário interessantes — e muitas vezes inspiradores — que raramente são usados em textos tradicionais sobre materiais.)

Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J. e Behrens, W. W. *The Limits to Growth — 1st Report of the Club of Rome*, Universe Books, Nova York, 1972. (Publicação transgressora, que alerta o mundo para a possibilidade do esgotamento de recursos, minada pela qualidade questionável dos dados usados para a análise. Porém, apesar disso, catalisadora para estudos subsequentes e visões que agora gozam de aceitação mais ampla.)

Norman, D. A. *The Design of Everyday Things*. Nova York: Doubleday, 1988. (Livro que dá uma introdução ao design de produto com ênfase particular na ergonomia e na facilidade de utilização.)

Pantone. www.pantone.com, 2001. (A Pantone oferece conselhos detalhados para seleção de cores, incluindo perfis de cores e boas descrições das associações e percepções de cor.)

Vezzoli, C. e Manzini, E. *Design for Environmental Sustainability*, Springer-Verlag, London Ltd., 2008. (Livro em coautoria com o escritor de *The Materials of Invention*, que descreve ferramentas e estratégias para integrar requisitos ambientais ao desenvolvimento de produtos.)

Apêndice: modelagem de atributos e características estéticas

Maciez (ao tato)

Dureza é a resistência ao entalhe e a arranhões. Está diretamente relacionada à propriedade de dureza do material, H . Maciez tem a ver com rigidez — ou melhor, com a falta de rigidez. A rigidez de um material em uma forma determinada é proporcional a seu módulo de elasticidade, E , uma outra propriedade do material. É conveniente ter uma única medida que permita a classificação dos materiais ao longo de um único eixo. Uma que funciona é a medida

$$S = EH$$

Se S é pequena, o toque do material é macio; à medida que S aumenta, o toque é mais duro.

Calor (ao tato)

O toque de um material é “frio” ao tato se conduzir o calor para longe do dedo rapidamente; é “quente” se não o fizer. O calor flui do dedo para dentro da superfície de um modo tal que, após o tempo, t , uma profundidade, x , do material foi significativamente aquecida, enquanto sua parte mais remota não. As soluções de todos os problemas de fluxo de calor transiente dessa classe têm um termo

$$x = \sqrt{at}$$

onde a é a difusividade térmica do material.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Aqui, λ é a condutividade térmica, C_p é o calor específico e ρ é a densidade. A quantidade de calor que saiu de cada unidade área do dedo no tempo, t , é

$$Q = X\rho C_p = \sqrt{\rho\lambda C_p} \cdot \sqrt{t}$$

Se Q é pequeno, o toque do material é quente; se grande, o toque é frio. Assim, $\sqrt{\rho\lambda C_p}$ é uma medida da “frieza” do material. Maciez e calor são usados como eixos do Gráfico 4.6.

Tom (do som)

A frequência do som (tom) quando um objeto é percutido está relacionada com o módulo de elasticidade, E , e com a densidade, ρ , do material de que é feito. Usamos a quantidade

$$P = \sqrt{E/\rho}$$

como uma medida relativa da frequência de vibração natural e, portanto, do tom. Se P é pequeno, o tom do material é baixo; à medida que P aumenta, o tom do material torna-se mais alto.

Brilho (do som)

A atenuação do som (amortecimento ou abafamento) em um material depende de seu coeficiente de perda, η . Usamos a quantidade

$$L = \frac{1}{\eta}$$

como medida para classificar materiais pelo brilho acústico. Se L é pequeno, o som do material é abafado; à medida que L aumenta, o som fica cada vez mais como um tinido. Tom e brilho são usados como eixos do Gráfico 4.8.

Resistência à abrasão

A resistência à abrasão depende de muitas propriedades, mas uma — a dureza, H — é de particular importância. Um material é arranhado por outro que é mais duro e, por sua vez, pode riscar os que são menos duros. Portanto, usamos a dureza, H , como uma medida relativa da resistência à abrasão.

Rigidez

Rigidez, para uma determinada forma, está diretamente relacionada com a propriedade “módulo de elasticidade”, E , do material.

Resiliência

Resiliência é a capacidade de aceitar grande deflexão sem dano. A deflexão é limitada por escoamento (deformação permanente) ou por fratura, isto é, por aquela que for mais limitadora das duas quantidades

$$\frac{\sigma_y}{E} \text{ e } \frac{K_{IC}}{E}$$

onde σ_y é a tensão de escoamento e K_{IC} é a tenacidade à fratura. Usamos a quantidade

$$R = \frac{\sqrt{\sigma_y K_{IC}}}{E}$$

como medida da resiliência. Resiliência e rigidez são usadas como eixos do Gráfico 4.10.

Capítulo 5

Outras coisas de que é feito o design... conformação, junção e superfícies



Se você quiser fazer alguma coisa com um material vai precisar de um processo de produção. Processos criam formas, permitem a junção de partes e conferem texturas, acabamentos ou revestimentos que protegem e decoram. Os processos têm de ser adequados aos materiais — processos que podem conformar ou unir polímeros são diferentes dos que podem fazer o mesmo com cerâmicas, vidros ou metais; e, mesmo dentro da família dos polímeros, ele deve ser adequado ao tipo de polímero. Neste capítulo, faremos uma revisão de atributos técnicos de processos e estudaremos as características que possuem e que contribuem para o design industrial de um produto.

A dimensão da engenharia: atributos técnicos

Classificar processos não é tão fácil quanto classificar materiais. No caso dos materiais, foi possível gerar uma classificação sem ambiguidade, tendo como base o conhecimento científico da ligação entre átomos ou moléculas. Mas processos são inventados pelo ser humano, e não ditados pela natureza — a ciência não ajuda muito nesse caso. A melhor aborda-

gem é a classificação de acordo com as finalidades para as quais o processo será usado, apesar das ambiguidades inevitáveis. Um processo adaptado à sua utilização no projeto técnico é mostrado na Figura 5.1. No nível mais alto, os processos são segregados nas três famílias que sugerimos, e que resumiremos com os termos *conformação*, *junção* e *superfície*. Cada uma dessas famílias é desenvolvida como mostrado na Figura 5.1 e parcialmente expandida para indicar classes e membros.



Figura 5.1 – Classificação de processos

Baseada em agrupamentos conhecidos pelos engenheiros. A última coluna mostra uma lista de possíveis atributos para um processo específico. Na parte superior, classificação de processos de conformação; na central, classificação de processos de junção; na parte inferior, classificação de processos de superfície.

No caso da conformação, a primeira pergunta é: “Como posso conformar esse material?” As classes de conformação são organizadas, até onde possível, pelas famílias de materiais as quais podem ser aplicadas e pelas semelhanças subjacentes entre os próprios processos. Cada uma tem diversos membros (Figura 5.1, linha superior). Os dados técnicos para cada membro definem seus atributos — os detalhes das formas que ele pode fazer e as restrições que impõe ao tamanho, precisão e custo, como indicado na última coluna da figura.

A escolha do processo é determinada pelos materiais que serão conformados, pela forma em si e pelos aspectos econômicos do processo. Quando o material é um termoplástico e a forma é complexa, com superfícies de curvas duplas, os aspectos econômicos favorecem a moldagem por injeção (Figura 5.2). Moldes de aço são muito caros; portanto, para lotes muito pequenos (cerca de dez), usa-se molde de epóxi; para 100, um molde de epóxi revestido com metal é suficiente; para 100 mil, é necessário um molde de aço-ferramenta; e, acima desse número, somente moldes

de Stellite (liga baseada em cobalto, tungstênio e cromo) suportam.

Os metais competem diretamente com polímeros para desempenhar esses papéis. A fundição sob pressão (Figura 5.3) de ligas de alumínio e magnésio permite a produção econômica de formas complexas com curvatura dupla. Para lotes maiores, a fundição por injeção sob pressão é mais rápida — e portanto mais barata — do que a fundição por gravidade. Como ocorre com a moldagem por injeção, as matrizes são caras. O alumínio é pouco solúvel em ferro, o que limita a vida útil dos moldes de aço a aproximadamente 100 mil peças. O magnésio não é solúvel em ferro, o que resulta em vida útil quase ilimitada.

O alto custo da mão de obra e o baixo custo dos materiais criaram uma sociedade que descarta diversos produtos frequentemente após uma única e trivial utilização. É óbvio que o custo do processo de fabricação nesses casos tem de ser muito baixo. Potes de iogurte, potes de manteiga, garrafas de refrigerantes e produtos semelhantes são feitos por moldagem sob pressão ou por sopro. Os moldes são baratos, o processo é rápido e não raro etiquetas decorativas podem ser



Figura 5.2 – Moldagem por injeção e por fundição sob pressão

Plástico moldado por injeção (à esquerda) e metal moldado por fundição sob pressão (à direita).

1. Alguns textos dão um amplo levantamento de processos; outros se especializam em uma das classes elencadas na Figura 5.1. Lesko (1999) e Swift e Booker (1998) dão boas introduções, mas a bíblia a respeito é de Bralla (1998), livro abrangente, mas que você poderia ler só por prazer. Dentre os textos mais especializados, Houldcroft (1990) dá um bom levantamento de processos de soldagem; Wise (1999) apresenta informações mais especializadas para a junção de polímeros; e Grainger e Blunt (1998) detalham processos para revestimentos de superfícies em aplicações técnicas. Não conseguimos encontrar nenhum texto que tratasse de processos de superfície com uma função predominantemente estética — embora uma parte mais ao final deste livro dê um grande passo para corrigir essa falha.

2. A ASM (Sociedade internacional de informações sobre materiais) oferece os 20 volumes de seu Metals Handbook e as edições de mesa (Desk Editions) para o Metals Handbook e o Engineered Materials Handbook em CD e pela internet, o que permite pesquisa rápida de textos sobre todos os tipos de processos. O Cambridge Materials Selector, CES 4 (2002) contém planilhas de dados para aproximadamente 120 processos de todos os tipos, combinadas com um mecanismo de busca avançado.

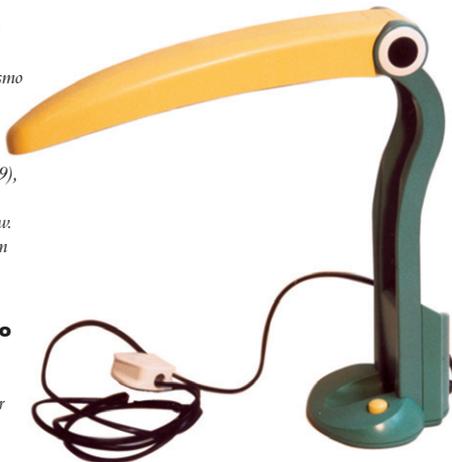
3. Um exemplo pode ser encontrado em Poeton (1999), The Poeton Guide to Surface Engineering, www.poeton.co.uk/w1/surface.htm

Figura 5.3 – Expressão por meio de conformação
O abajur em forma de pássaro expressa seu humor por meio da forma.

moldadas ao mesmo tempo. A prensagem de chapas de metais também pode ser rápida e barata, e a chapa pode ser decorada em processo contínuo (pense nas latas de refrigerante).

Processos de junção são classificados de modo semelhante (linha central da Figura 5.1). A primeira distinção, dadas as classes, é o modo como a junção é realizada — por adesivos, solda ou elementos de fixação. Depois das classes vêm os membros. A última coluna sugere a natureza dos dados técnicos que os caracterizam.

A linha inferior da Figura 5.1 mostra uma classificação por processos de superfície. Quase todas as peças fabricadas recebem um tratamento de superfície de algum tipo. As razões são diversas: tornar a superfície mais dura ou mais resistente a arranhões, protegê-la contra corrosão ou desgaste ou realçar as qualidades visuais e táteis do produto acabado. Há muitos modos diferentes de fazer cada uma delas, mostrados no segundo nível da Figura 5.1: polimento, impressão, revestimento, endurecimento e assim por diante, e cada um tem muitos membros. A última coluna novamente sugere a natureza dos dados técnicos para determinado membro.



Dados técnicos para os membros da Figura 5.1 podem ser encontrados em textos sobre processamento,¹ em softwares² e em planilhas de dados de fornecedores.³ Perfis para os 65 mais importantes são mostrados na segunda parte deste livro.

Outras dimensões

Processos influenciam a ergonomia, a estética e a percepção dos produtos e dos materiais de que são feitos. A conformação dá a forma. As formas que um processo é capaz de produzir são claramente importantes nesse caso: a extrusão, por exemplo, permite somente formas prismáticas, ao passo que a fundição de metais sob pressão e a moldagem por injeção de polímeros permitem formas de grande complexidade. Os processos de junção — passos essenciais da montagem de um produto — também podem criar contrastes e outras características expressivas: alguns processos proporcionam junções quase invisíveis, outros permitem que sejam proeminentes. Processos de superfície, particularmente, influenciam a estética e as percepções por meio de cor, refletividade, textura e toque, e também são importantes por razões ergonômicas, por criarem comunicação tátil e visual com o usuário. Nós os exploramos examinando a expressão por meio do processamento.

Expressão por meio da conformação

Criar formas é um dos modos mais antigos da expressão humana: figuras entalhadas em pedra e moldadas em cerâmica, ornamentos de metal batido e joias fundidas vieram



antes de qualquer habilidade documentada de escrever ou desenhar. A escultura, os utensílios de cerâmica e a arquitetura de hoje são descendentes evolucionários desses antecessores pré-históricos e ainda usam muitos de seus processos: moldagem (a princípio com argila, atualmente com polímeros), entalhe (atualmente um subconjunto da usinagem) e fundição por cera perdida (atualmente fundição de precisão). Nesse caso, a conformação é um canal para a autoexpressão.

A Figura 5.3 mostra o modo pelo qual forma e materiais tem sido usados para criar estéticas e percepções diferentes. O abajur usa ABS e acrílico conformados por modelação térmica e moldagem por injeção; em ambos os estados, dobrado ou não dobrado, é percebido como engraçado, simpático, atrativamente irreverente e, ainda assim, funcional por completo. O rolo de fita adesiva expressa um senso de humor e surpresa tanto em sua forma biomórfica quanto na cor bizarra.

Expressão por meio de junção

A junção alcança um patamar artístico na encadernação de livros, no encaixe do tipo rabo de andorinha de peças de madeira e na costura decorativa de vestimentas. Também no design de produto, a junção pode ser usada como modo de expressão (Figura 5.4). A tampa do tanque de combustível do Audi TT, usinada em aço inoxidável e presa por oito parafusos Allen, é uma expressão de tecnologia de precisão que implica o mesmo sobre o resto

do carro. As soldas proeminentes no quadro de uma *mountain bike* expressam a robustez do design. Junções deliberadamente realçadas são usadas como motivos decorativos, muitas vezes para enfatizar a função do produto. Unir dois polímeros contrastantes para conformar a escova de dentes decora e realça as diferentes funções de ambos (um estrutural, o outro para facilitar o manuseio da peça).

Expressão por meio de superfícies

Poderíamos descrever quadros e gravuras dos maiores museus do mundo como tratamento de superfície elevado ao patamar de excelência em termos de arte. Ambas as técnicas foram adaptadas para a tarefa mais singela do design de produto. Essas e várias outras, algumas muito engenhosas, permitem várias formas de expressão.

O final do século XX e o início do século XXI estão habituados com a perfeição impecável.⁴ Há muito tempo os fabricantes de equipamentos de terraplenagem sabem que, se quiserem vender seus produtos, têm de entregá-los com o mesmo acabamento de alta qualidade exigido para um automóvel. E isso apesar do fato de que a primeira coisa que o comprador faz é enfiar a escavadeira em um buraco cheio de lama até a metade e começar a cavar. Isso porque a perfeição do acabamento expressa a perfeição do equipamento como um todo; mau acabamento implica, ainda que erroneamente, má qualidade total.

Figura 5.4 – Expressão por meio de junção

O cabo da escova de dentes, obtido pela moldagem combinada de dois elementos contrastantes, enfatiza suas funções estruturais e ergonômicas.

4. Perfeição e imperfeição. A perfeição da superfície é violada pelo mínimo defeito — ela não tem nenhuma esperança de envelhecer graciosamente. Melhor é transformar a imperfeição visual em parte da personalidade do produto — algo que lhe dê individualidade. É isso, em parte, que torna os materiais naturais — madeira, couro e pedra — atraentes.

**Figura 5.5 –
Expressão por meio
de superfície**

*Óculos revestidos de azul
metálico criam um detalhe
único de superfície.*



Portanto, processos de superfície podem servir para atrair, como ocorre com a escavadeira. Podem sugerir, às vezes com a intenção de enganar: plástico metalizado, por exemplo. Podem surpreender, adicionando novidades — uma chaleira revestida com material termocrômico que muda de cor à medida que a água aquece. Podem entreter: películas holográficas sugerem que há algo à espreita dentro do artigo ao qual é aplicada. Podem adicionar função: revestimentos antideslizantes adicionam uma função ergonômica; e tecnologias para imprimir circuitos eletrônicos em produtos lhes dão funções de sensoriamento e de processamento de informações.

Frequentemente os designers criam elementos expressivos por meio do tratamento de superfície. A serigrafia, por exemplo, é usada para diferenciar pranchas de surfe, estilo da prancha e estilo pessoal do usuário. Jatear uma superfície de vidro lhe confere um sentido frio de elegância. Os óculos de sol com revestimento de óxido metálico expressam um estilo de alta tecnologia por meio de cor brilhante e refletida (Figura 5.5).

**Expressão por meio
de manufatura**

Há trailers de viagem, caravans, e há ainda o Airstream (Figura 5.6). A maioria dos trailers de viagem é construída tendo-se em mente uma cabana.

**Figura 5.6 –
Expressão por meio
da manufatura**

*Detalhes de manufatura e
qualidade podem expressar
muita coisa sobre uma
empresa e seus produtos
(imagem por cortesia da
Airstream Inc. Jackson
Center, OH).*



Os Airstreams são construídos como aeronaves. Não é apenas a escolha do material — o produto é, claro, feito de alumínio e está por aí há mais de 70 anos —, mas também os métodos de manufatura que criam o estilo. O corpo é uma concha monocoque unida não por solda (como na construção de automóveis), mas por rebites deliberadamente visíveis. O acabamento expõe a superfície crua do metal (pintá-la seria a norma no caso de automóveis), enfatizando seus predecessores aeronáuticos. Eis um produto que deriva a sua qualidade (refletida no preço) do uso de materiais e da escolha dos processos de conformação, junção e acabamento usados para fabricá-lo.

Conclusões

A estética de um produto é criada pelos materiais dos quais

ele é feito e pelos processos usados nas fases de conformação, junção e acabamento. Expressam-se ideias e criam-se percepções e associações pelos modos como esses materiais são usados. Os requisitos técnicos do produto impõem certas restrições à forma, mas dentro dessas restrições ainda há espaço para expressar qualidade, humor, delicadeza, sofisticação. A junção também pode ser usada para sugerir processos artesanais ou robustez, ou para diferenciar partes do produto que têm finalidades diferentes. Sobretudo, tratamentos de superfície modificam cor e refletividade, textura e toque, e podem acrescentar padrão, símbolos ou texto para instruir, divertir ou simular.

A última parte deste livro contém perfis de 65 processos, escolhidos por sua importância para o design de produto, que expressam a relevância dessas características.

Leitura adicional

ASM. *ASM Metals Handbook* (Desk Edition) e *Engineered Materials* (Desk Edition), em CD e oferecidos on-line. American Society for Metals, Materials Park, OH 44073, USA, 2001. (Ambos os volumes contêm informações técnicas extensivas sobre processos de conformação, junção e tratamento de superfícies. O software é de consulta e permite rápida recuperação de informações.)

Bralla, J. G. *Handbook of Product Design for Manufacture*. 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998. (A “bíblia” — uma compilação maciça de informações sobre processos de manufatura, de autoria de especialistas de diferentes áreas e compilada por Bralla — é um manual, e não um texto didático.)

Canning, W. *The Canning Handbook on Electroplating*. Birmingham: W. Canning Limited, Gt Hampton St., 1978. (É exatamente o que parece: tudo que você precisa saber sobre galvanoplastia.)

CES 4. *The Cambridge Engineering Selector*, versão 4, Granta Design, Cambridge, 2002 (www.grantadesign.com). (Software com atributos técnicos para 120 processos.)

DeGarmo, E. P.; Black, J. T. e Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1984. (Texto abrangente que focaliza processos de manufatura, com uma breve introdução aos materiais. A perspectiva é a do processamento de metais; o processamento de polímeros, cerâmicas e vidros é bem mais breve.)

Grainger, S. e Blunt, J. *Engineering Coatings, Design and Application*. 2ª ed. Abington/Cambridge: Abington Publishing, Woodhead Publishing Ltd., Abington Hall, 1998. (Monografia dirigida a engenheiros técnicos, que detalha processos para aperfeiçoar a resistência de superfícies ante corrosão e desgaste.)

Houldcroft, P. *Which Process?* Abington/Cambridge: Abington Publishing, Woodhead Publishing Ltd., Abington Hall, 1990. (Breves perfis de 28 processos de solda e outros, para unir metais, baseados em grande parte no conhecimento técnico e prático da TWI International — anteriormente Welding Institute — no Reino Unido.)

Hussey, R. e Wilson, J. *Structural Adhesives: Directory and Data Book*. Londres: Chapman & Hall, 1996. (Compilação extensiva de dados de diversos fornecedores para adesivos estruturais.)

IDTC (International Design Trend Center). *How Things Are Made*. AG Book, Coreia, 2003 (www.agbook.co.kr). (Maravilhosa visita a fábricas do ponto de vista de um designer.)

Kalpakjian, S. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Reading, MA: Addison Wesley, 1984. (Texto abrangente e amplamente usado sobre processos de manufatura para todas as classes de materiais.)

Lesko, J. *Materials and Manufacturing Guide: Industrial Design*. Nova York: John Wiley and Sons, 1999. [Edição brasileira: *Design Industrial — Materiais e Processos de Fabricação*. São Paulo: Blucher, 2004.] (Breves descrições, desenhos e fotografias de materiais e processos de manufatura, com matrizes de características úteis, escritas por um consultor com muitos anos de experiência em design industrial.)

Mayer, R. M. *Design with Reinforced Plastics*. Londres: The Design Council and Bourne Press Ltd., 1993. (Texto dirigido a engenheiros que desejam fazer projetos com plásticos reforçados com fibras; uma útil fonte de informação para processos de conformação para polímeros compósitos.)

Pantone (www.pantone.com), 2001. (Quando se trata de definir, descrever e explorar as associações de cor, comece com a Pantone.)

Poeton. *The Poeton Guide to Surface Engineering*, 1999 (www.poeton.co.ReinoUnido/w1/surface.htm). (Site com informações úteis sobre tratamento de superfícies para propriedades “de engenharia”.)

Roobol, N. R. *Industrial Painting, Principles and Practice*. 2ª ed. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, 1997. (Guia abrangente para revestimento de tinta e resina.)

Swift, K. e Booker, J. D. *Process Selection: from Design to Manufacture*. UK: John Wiley & Sons, 1998. (Planilhas de dados em formato padrão para 48 processos de conformação e junção de metais. Nada a respeito de outros materiais ou de tratamentos para efeitos visuais.)

Thompson, R. *Manufacturing Processes for Design Professionals*. Londres: Thames & Hudson, 2007. (Melhor referência disponível para designers que querem entrar em uma fábrica e ver os detalhes da fabricação de produtos que conhecemos e amamos.)

Wise, R. J. *Thermal Welding of Polymers*. Abington/Cambridge: Abington Publishing, Woodhead Publishing Ltd., Abington Hall, 1999. (Compilação de informações sobre processos de solda de polímeros, baseada em grande parte na experiência técnica e prática da TWI International — anteriormente Welding Institute — no Reino Unido.)

Capítulo 6

A forma segue o material



Os materiais exercem profunda influência sobre a forma dos produtos. Em nenhum lugar isso é mais visível do que na arquitetura. O Partenon, a Torre Eiffel, a Ponte Golden Gate, todos grandes símbolos de sua época, são expressões únicas do que é possível com determinado material. Uma Torre Eiffel feita de pedra é tão inconcebível quanto um Partenon feito de ferro forjado ou a Ponte Golden Gate feita de concreto armado. O material restringiu cada projeto, mas, dentro dessas restrições, o projetista criou uma forma que as gerações subsequentes veem como arte estrutural.

Materiais e arquitetura

As ligações mais diretas entre material e forma surgem das forças que os materiais podem suportar (Figura 6.1). Para esclarecer a questão, examine as imagens da Figura 6.2, na qual cada par ilustra as formas que possibilitam o projeto — ou mesmo lhe são impostas — pela natureza do material das estruturas primárias.

Pedra e tijolo cimentado (Figura 6.2a–b) são resistentes a compressão e pouco resistentes a flexão e a tração, portanto exigem projetos que transmitam cargas por compressão: colunas pouco espaçadas (Figura 6.2a) ou ar-

cos de compressão (Figura 6.2b). Madeira é resistente a tração, compressão e flexão, portanto permite estruturas trianguladas e treliçadas (Figura 6.2c) e estruturas em balanço (Figura 6.2d). O ferro fundido antigo (Figuras 6.2e–f), como a pedra, é frágil sob tração ou flexão, o que demanda projetos que sigam o princípio coluna/arco para transmissão de cargas por compressão, embora, devido à facilidade com que pode ser fundido em formatos delicados, permita à estrutura certa aparência de leveza. Ferro forjado (Figura 6.2 g) e aço (Figura 6.2h) superam o problema de fragilidade da pedra e do ferro fundido, permitin-

Figura 6.1 – Flexão, tração e compressão

Três maneiras de apoiar um objeto pesado, cuja massa exerce certa carga sobre o apoio. Se quisermos usar um material que possa suportar somente compressão, como a pedra, a forma deverá ser parecida com aquela ao centro. Se um material é resistente à tração, mas não pode suportar compressão ou flexão, como é o caso de arames ou fibras resistentes, exige-se uma forma suspensa como a da direita. Se quisermos usar um material que possa suportar flexão, como madeira ou aço estrutural, então a forma à esquerda torna-se possível.



Figura 6.2 – Exemplos de construções

(a, b) A forma dessas estruturas acompanha a fragilidade da pedra, que é resistente à compressão, mas aproximadamente 20 vezes menos resistentes a tração e flexão. O tijolo, tal como a pedra, só é resistente à compressão.

(c, d) Neste caso, as formas refletem a alta razão resistência/peso da madeira e sua capacidade de suportar igualmente bem cargas de tração e de compressão.

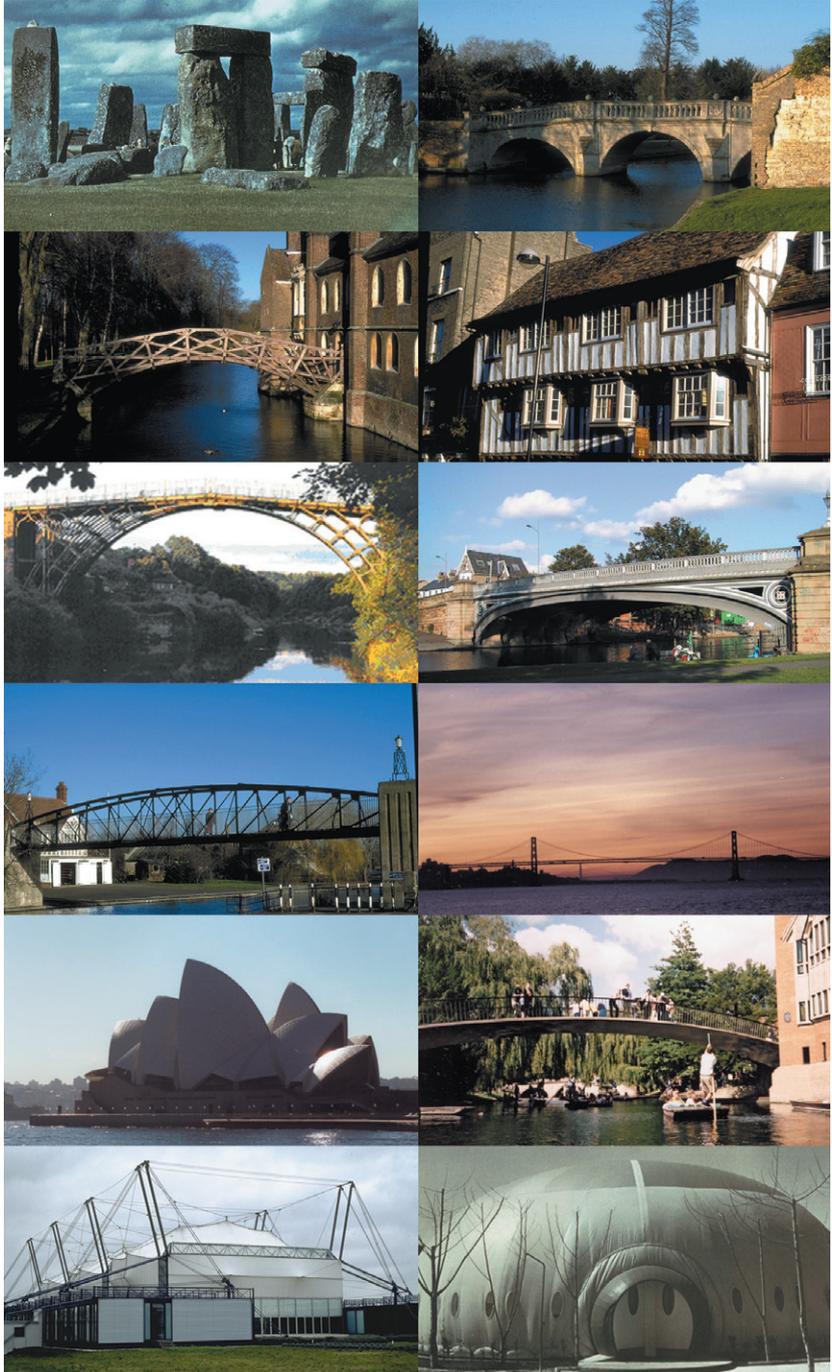
(e, f) As estruturas refletem o ferro que pode ser fundido em formas intrincadas, mas também sua relativa fraqueza sob tração e flexão.

(g, h) Aço na forma de seção “I” suporta compressão e flexão eficientemente; projetado como cabo de alta resistência à tensão, é muito eficiente sob tração. No projeto explícito dessas estruturas a orientação das escoras revela as direções nas quais as forças agem.

(i, j) Concreto armado e protendido permite grande liberdade e delicadeza de forma. O material, um composto de aço e concreto, suporta igualmente bem forças de tração, flexão e compressão.

(k, l) À esquerda: cabos de aço de alta resistência à tração em conjunto com estruturas treliçadas trabalhando a compressão sustentam uma edificação em membrana reforçada com fibra de vidro (PTFE).

À direita: membrana emborrachada de náilon sustentada por pressão interna. As formas são uma consequência direta da escolha do material.



do configurações mais delgadas que possam suportar tração ou flexão, o que estimula maior desenvolvimento do conceito de estruturas vazadas (estruturas espaciais com poucos apoios e maior vão livre). Também o concreto armado é resistente à tração, bem como à compressão, e a facilidade com que pode ser conformado permite estruturas fluidas, parecidas com uma concha (Figura 6.2i-j). Estruturas com componentes têxteis e cabos de aço de alta resistência suportam bem as cargas de tração, mas não podem suportar cargas de flexão ou compressão (devido a flambagem), o que leva a um novo conjunto de formas (Figura 6.2k-l).

Em todos esses exemplos, os materiais foram conformados em elementos capazes de suportar certas forças; os elementos são integrados em formas projetadas para converter as cargas que agem sobre a estrutura em forças compatíveis com o material de que ela é feita. A maioria das construções da Figura 6.2 foi projetada antes do desenvolvimento da ciência de análise de tensões; porém, mesmo sem ela, o projetista conseguiu visualizar as forças e a relação entre força, material e forma. Em todos os casos, a forma da construção foi poderosamente influenciada pela natureza do material de que cada estrutura é feita. A forma, por assim dizer, segue o material.

Materiais e cadeiras

Existem certas restrições mecânicas óbvias com relação a cadeiras; porém, elas não são severas e dão espaço para a diversidade, tanto na escolha do material quanto na forma. A forma não é particularmente limitada pela função — se fosse, todas as cadeiras seriam iguais, e um rápido olhar sobre a Figura 6.3 mostra claramente que não é esse o caso. Porém, uma vez escolhido o material, restringe-se a forma.

Uma cadeira, afinal, tem dois componentes básicos: uma estrutura para suportar as cargas mecânicas e um assento para adaptar a estrutura ao formato da pessoa que sentará nela. A cadeira da Figura 6.3a tem essas características: a estrutura é de aço tubular e o assento é de polipropileno moldado e corrugado. Na Figura 6.3b, a utilização de uma malha de fios de aço, conformada, soldada, niquelada e revestida com epóxi, combina a estrutura e o assento em uma só peça. Na Figura 6.3c, Philippe Starck manipulou o polipropileno para criar um assento moldado macio e descontraído. Na Figura 6.3d, a utilização de polipropileno reforçado com fibra de vidro permite a combinação da estrutura e do assento em uma única peça. Charles e Ray Eames usam fibra de vidro para criar duas conchas, unidas e interligadas a uma

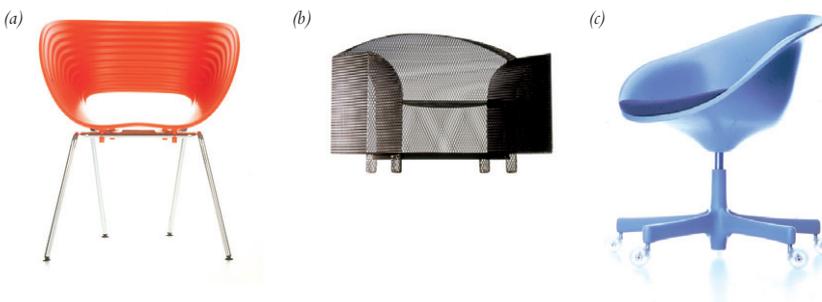


Figura 6.3 – Cadeiras

A cadeira é uma das formas mais comuns manipuladas por designers industriais ou engenheiros; mostramos aqui algumas formas e materiais inusitados. (Imagens por cortesia de Vitra Museum e Hans Hansen.)

Figura 6.3 – Cadeiras

A cadeira é uma das formas mais frequentemente manipuladas por designers industriais ou engenheiros; mostramos aqui algumas formas e materiais inusitados. (Imagens por cortesia de Vitra Museum e Hans Hansen.)



1. *Funcionalidade é a medida do grau de atendimento das expectativas técnicas por parte de um produto. A personalidade mede até que ponto o produto provoca prazer emocional e satisfação. Assim, uma luminária de escrivaninha poderia — por proporcionar luz de intensidade correta no lugar correto — ter uma boa funcionalidade, embora — por sua forma, cor e toque entrar em conflito com o restante da decoração — tenha personalidade fraca.*

Quadro 6.1 – Identificação, visualização e materialização

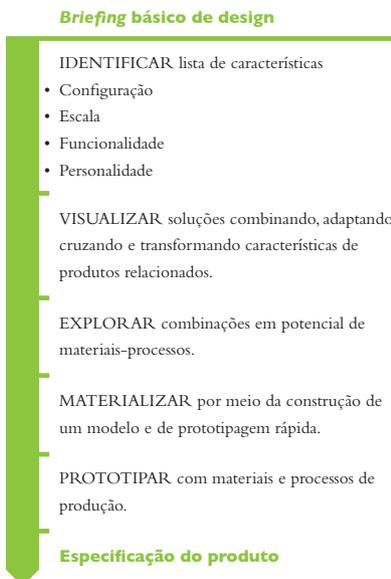
Etapas do desenvolvimento da forma do produto. A lista implica um processo sequencial, mas está longe disso.

base tubular de aço cromado (Figura 6.3e). A última, a Figura 6.3f, é feita de PVC inflado e tem algo do estilo pneumático e em forma de bulbo da construção mostrada na Figura 6.2l. Nesse caso, a estrutura desapareceu; o assento é também o suporte. Como ocorre com as edificações, os materiais da cadeira influenciaram profundamente sua forma.

Portanto, há mais de um modo de abordagem para a seleção de materiais. Um deles é levando em conta a função técnica. O outro é considerando forma e características, procurando materiais que possam fornecê-las. Aqui exploraremos a ideia de forma e características.

Identificação de uma lista de características

O ato de projetar, de fazer design, transforma *necessidade* em *produto*; começa com uma abstração sem forma e termina com uma realidade concreta. Primeiro, algumas definições. *Necessidade* é uma ideia abstrata. A necessidade de “iluminação” carrega a ideia de luz, mas não diz nada sobre sua forma, seu toque, como será realizada ou como será percebida. *Conceito* é um modo pelo qual a necessidade poderia ser atendida — uma vela, uma lâmpada incandescente, uma lâmpada tubular fluorescente, um laser —, e para cada um deles há um conjunto de subconceitos possíveis. *Produto* é uma realização de um conceito; é um objeto concreto, com formas e características que podem ser vistas e tocadas. É feito por processos que usam materiais que, por sua vez, também têm comportamentos visuais e táteis. *Característica* é um aspecto do design que contribui para a sua funcionalidade, usabilidade ou personalidade.¹ As características podem ser de vários tipos. Há as topológicas, que definem a configuração do produto. Há as geométricas e dimensionais, algumas determinadas por requisitos técnicos (resistência, estabilidade, eficiência etc.), outras pelas necessidades do usuário (características ergonômicas), e ainda outras para dar ao produto certas qualidades visuais e



táteis. Além dessas, há as características percebidas — as que criam as associações do produto e o significado que ele transmite. *Soluções* são combinações de características que concretizam o conceito, tornando-o real, e o fazem de maneira que, até certo ponto, satisfaçam as intenções do designer. A solução que é escolhida para manufatura torna-se o produto.

O ponto de partida para o desenvolvimento da forma é a formulação das características desejadas de um produto. As características definem as restrições às quais a forma e os materiais devem obedecer. Formular e aplicar restrições é fundamental para qualquer ato de seleção. Soluções que não cumprem as restrições, aplicadas sucessivamente, são rejeitadas, até sobrar apenas um pequeno subconjunto manipulável. Porém, embora projetar inclua o ato de reduzir o conjunto de soluções possíveis, é importante também o ato de expandi-las. O designer, ao experimentar modos de utilização, evolução e combinação das características, visualiza novas soluções. Portanto, passar do conceito ao produto

envolve tanto reduzir o número de soluções, rejeitando as que não atendem às restrições, como expandi-lo, ao criar novas soluções que, por sua vez, podem ou não ser rejeitadas. A lista de características apresenta restrições e ao mesmo tempo proporciona os ingredientes da inspiração.

Agruparemos os modos de identificar características e sintetizar soluções sob os títulos *identificação*, *visualização* e *materialização* (Quadro 6.1). A natureza sequencial de um livro — que é lido na ordem em que foi escrito — sugere que é uma progressão linear, mas não é isso que pretendemos aqui. Usando um texto com associações analógicas: design, e, em particular, a criação da forma, não é um procedimento linear como preencher um formulário de impostos (“se isso, então aquilo...”); trata-se mais de um jogo de palavras cruzadas multidimensional (“essa combina com essas... ou talvez ainda não seja bem isso... e se tentássemos isso...”).

Identificação

A identificação do conceito é a primeira etapa no desenvolvi-

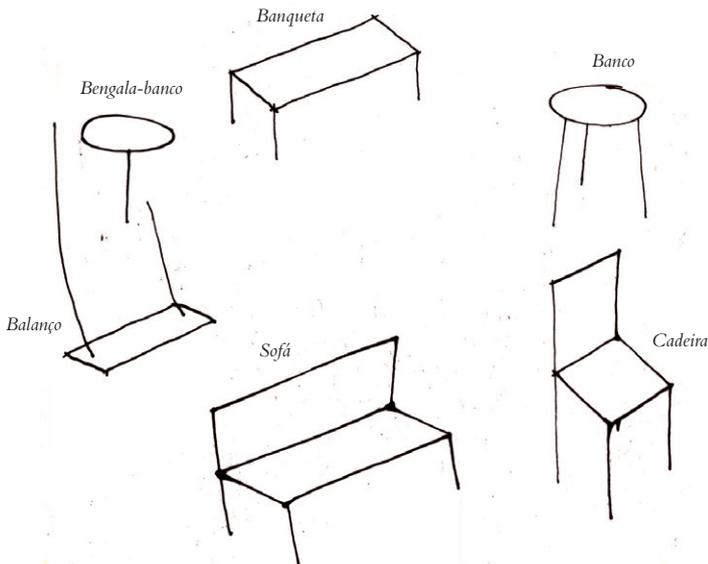


Figura 6.4 –
Conceitos para
sentar

A ideia de “sentar” pode envolver muitos conceitos: alguns com quatro pernas, outros sem nenhuma; alguns para uma pessoa, outros para muitas.

Quadro 6.2 – Características de uma “cadeira” conceitual

Uma cadeira tem certas características genéricas que restringem sua forma.

Configuração
Acomodar uma pessoa Assento horizontal Encosto para as costas
Escala
0,3 < Largura < 0,4 m 0,7 < Altura < 0,9 m 0,3 < Profundidade < 0,4 m

Quadro 6.3 – Intenções no design

As intenções descrevem visões amplas que orientam o design. Um único produto pode ter mais de uma intenção predominante.

Mercado
Design de uso público Design para mulheres Design para idosos...
Aspectos econômicos
Design para custo mínimo Design para montagem Design para produção em massa...
Sustentável
Design para o ambiente Design para reciclagem Design para biodegradabilidade...
Desempenho
Design para isolamento máximo Design para massa mínima Design para volume mínimo...

to de uma lista de características para uma ideia a princípio abstrata. Usamos a necessidade de “sentar” como exemplo. A ideia é inicialmente abstrata: não tem ainda nenhuma forma. Há muitos conceitos possíveis para assentos — modos básicos de dar suporte: o banco, a banqueta, a cadeira, o sofá, o balanço, a bengala-banco (bengala articulável que se transforma em banqueta) e muitos mais, como sugerido na Figura 6.4.

Escolhemos o conceito “cadeira”, que já foi usado antes; e, embora nosso desejo seja ter a máxima liberdade quanto ao design, a escolha da cadeira implica que ela terá certas características genéricas — aspectos que são características preestabelecidas para uma cadeira. O desenho esquemático da Figura 6.4 ilustra essas características, que são de dois tipos. O primeiro tem a ver com configuração: uma cadeira, normalmente, é projetada para suportar uma pessoa. Tem assento horizontal, apoiado acima do solo por pernas ou alguma estrutura equivalente, e tem um encosto para as costas. Essa combinação de características genéricas já a diferencia de todos os outros conceitos da Figura 6.4. O segundo tipo de característica tem a ver com escala. A cadeira deve acomodar um adulto; para isso, a profundidade e a largura do assento e sua altura em relação ao chão deverão estar dentro de certas faixas de restrições. Portanto, a escolha do conceito identificou um conjunto de características, algumas que restringem a configuração e outras que restringem a escala (Quadro 6.2). A criatividade está em escolher características e combiná-las em soluções que obedeçam a essas restrições, e, ao mesmo tempo, cumpram otimamente as *intenções* do designer. Essa palavra, *intenção*, necessita de aprofundamento. É o que faremos em seguida.

Os aspectos que caracterizam uma cadeira de aeroporto, por exemplo, são diferentes dos que caracterizam uma cadeira para um quarto de criança; cada uma é projetada levando em consideração o uso pretendido. A expressão “Design for X” (DFX), que significa design de excelência, denota muito bem o modo como as caracte-

rísticas da cadeira são selecionadas tendo em mente uma ou mais intenções amplas subjacentes — nos exemplos da Figura 6.4, projeto para uso público ou projeto para crianças. Essa utilização de *intenções* para orientar a escolha de características vai além dos objetivos usuais de mercado: o projeto pode ser adaptado para cumprir objetivos econômicos, objetivos ambientais e, é claro, objetivos de desempenho. O Quadro 6.3 sugere as categorias.

Considere, por exemplo, o design de uma cadeira de escritório (Figura 6.5) que defina uma intenção — “design para o escritório”. Algumas características de cadeiras de escritório são exigidas por lei: em partes da Europa, uma cadeira de escritório deve ter cinco, e não quatro pontos de contato com o chão. Outras são identificadas pelo exame de soluções existentes para o conceito de “móveis para escritório” em busca daquelas que pareçam mais bem-adaptadas a outras intenções do design. Assim, a priorização de características no “design para equipamentos leves de escritório” é diferente da utilizada em “design para equipamentos recicláveis de escritório”. As intenções fornecem filtros pelos quais as caracte-



Figura 6.5 – Visualização de uma cadeira de escritório

Uma cadeira de escritório deve ter certas características: na Europa a lei exige cinco — e não quatro — pontos de contato com o chão.

rísticas são rastreadas. A indexação por intenção permite explorar características de outros produtos projetados tendo em mente as mesmas intenções (Figura 6.6).

Um produto bem-sucedido está bem-adaptado às circunstâncias nas quais será usado. A cadeira de escritório será utilizada durante muitas horas por dia, e nem sempre pela mesma pessoa. Deve oferecer conforto e ter ajustes para a altura e o ângulo entre o assento e as costas. Para proporcionar liberdade de movimento, o assento deve ser giratório e a cadeira deve ter rodinhas. Deve ser resistente



Figura 6.6 – Visualização de um ambiente de escritório

O ambiente no qual a cadeira será usada sugere características visuais relacionadas com o entorno e a finalidade do escritório, bem como com as aspirações do usuário.

Quadro 6.4 – Lista de características para funcionalidade

Exigem-se características técnicas e ergonômicas para que os produtos funcionem adequadamente.

Funcionalidade
Confortável
Mobilidade
Ajustável
Resistente
Estável
Fácil de limpar
Resistente à abrasão

Quadro 6.5 – Lista de características para personalidade

Exigem-se características estéticas e de percepção para a personalidade de cada produto.

Estética
Preto
Metálico
Macio
Orgânico
Percepções
Alta tecnologia
Masculino
Caro

e estável — acidentes de trabalho resultam em indenizações. Deve ser durável, protegida contra manchas de café e abrasão (Quadro 6.4).

E, enfim, há a sua personalidade. A personalidade descreve as associações e o significado que um produto tem para seu proprietário ou quem o usa. Ela depende muito de aspectos visuais e táteis: um sentido de ordem, proporção e coerência interna, e de forma, cor e textura. Ainda inclui o sentido de compatibilidade com o estilo de vida e aspirações do consumidor. Características que criam e transmitem essas mensagens visuais passam a fazer parte da lista de características da qual, por fim, surge a solução.

As mais fáceis de descrever em palavras são a cor, a textura, o toque e a forma (veja o Quadro 4.3 no Capítulo 4). Percepções são mais difíceis de expressar com precisão e em geral são descritas por palavras de sentido vago ou metáforas como “áspero”, “feminino” ou “clássico”, que mais sugerem do que definem a percepção, porém ainda assim transmitindo certo conjunto de características criadas pela escolha da forma e do material. O Quadro 4.4 apresentou uma lista de tais palavras extraídas de revistas de design e catálogos de exposições. Algumas poderiam ser aplicadas às cadeiras de escritório que aparecem na lista do Quadro 6.5.

Visualização

Estratégias para criar personalidade são encontradas por meio do exame do ambiente no qual o produto será utilizado e pelo modo como outros produtos nesse mesmo ambiente conseguem criar personalidade semelhante. Uma técnica comum é reunir

imagens de produtos ou ambientes, amostras de cores e texturas e amostras dos próprios materiais que exibam algum aspecto da personalidade que se procura. Esses elementos são reunidos em uma colagem ou painel semântico, de tal forma que possam ser movimentados, rearranjados e sobrepostos para sugerir combinações alternativas, como descrevemos no Capítulo 3.

Montar a lista de características, como já dissemos, tem o efeito de reduzir e focar as restrições que recaem sobre a forma do produto. Porém, ao mesmo tempo, a lista nos dá uma ferramenta para inspiração. A liberdade de rearranjar características pode sugerir novas soluções, algumas das quais podendo se aproximar mais da personalidade que desejamos captar do que qualquer outra solução existente. É uma espécie de “raciocínio” visual, muitas vezes apoiado por esboços desenhados à mão que, nesse contexto, podem ser considerados como “processamento de dados”; os “dados” são as características visuais individuais.

Até aqui, a lista de características define um conjunto de restrições, bem como um conjunto de insumos para a síntese criativa de novas soluções. Mas o que de fato pode ser feito? A realidade é limitada por materiais e processos usados para conformá-los, uni-los e tratar sua superfície. Essas são, por assim dizer, as variáveis livres do design; a escolha de uma delas possibilita uma gama de soluções.

Materialização

A Figura 6.7 ilustra o modo como a escolha de material e processo pode permitir diferentes grupos de características. A matriz é uma lista de

2. Perfis para a maioria deles são mostrados no final deste livro.

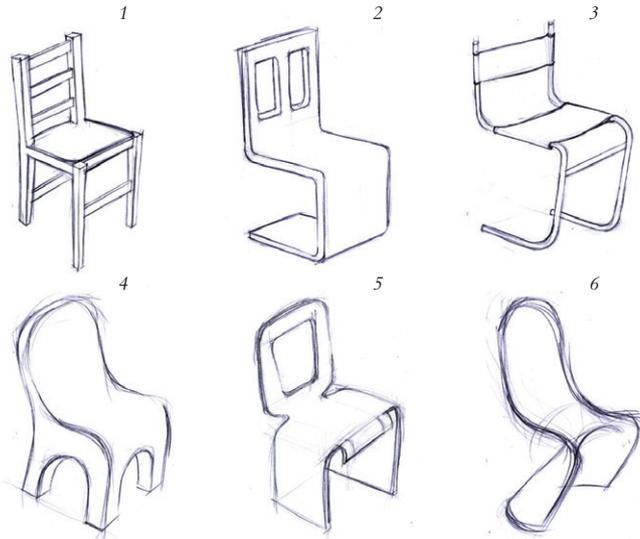


Figura 6.7 – Matriz material/ processo para cadeiras

A forma é parcialmente determinada pela escolha de material e processo de produção.

	Usinagem	Conformação de chapas	Estiramento	Moldagem rotacional	Métodos de laminação de compósitos	Termoconformação
Madeira maciça	1					
Compensado					5	
ABS				4		6
Aço inoxidável	2	2	3			

quatro materiais e seis processos.² Os quadrados numerados marcam combinações que são exploradas nos rascunhos desenhados à mão livre. Cada combinação resulta em formas que têm aspectos característicos: laminação de madeira (cadeira 5) adapta-se bem a estruturas planas ou curvaturas únicas; moldagem rotacional (cadeira 4) fornece estruturas fechadas e ocas com superfícies de dupla curvatura. A escolha também influencia a estética do produto — cor, textura e toque. A madeira (cadeiras 1 e 5) é naturalmente texturizada, leve e tem um toque quente, passa uma sensação acolhedora. O aço inoxidável (cadeira 2) é metálico e refletivo, pesado e frio. O grau de concordância dessas combinações com a lista de características desejadas é a métrica do sucesso. É nesse ponto que o raciocínio de projeto técnico e o raciocínio de design industrial se fundem. A materialização — criar um objeto que pode ser visto e tocado — é em parte condicionada pela escolha de material e processo de

produção, em parte pela necessidade de o produto suportar com segurança as cargas do projeto — algo determinado por métodos padrões de projeto técnico. O impacto ambiental do produto também é influenciado pela escolha inicial de material e processo, assim como a energia que consumirá durante sua vida útil e a duração dessa vida útil.

Antes de sairmos desse tópico, examinaremos brevemente mais dois exemplos de material e forma: a bicicleta e o abridor de garrafas.

Bicicleta: materiais e forma

Bicicletas são feitas de uma grande diversidade de materiais e formas (Figura 6.8). No caso, os requisitos são primordialmente mecânicos — resistência e rigidez — e devem ser conseguidos com baixo peso e custo aceitável. As estruturas trianguladas dos quadros convertem as forças geradas pelo ciclista em cargas de tração, compressão e torção que agem em seus componentes, como nas estru-

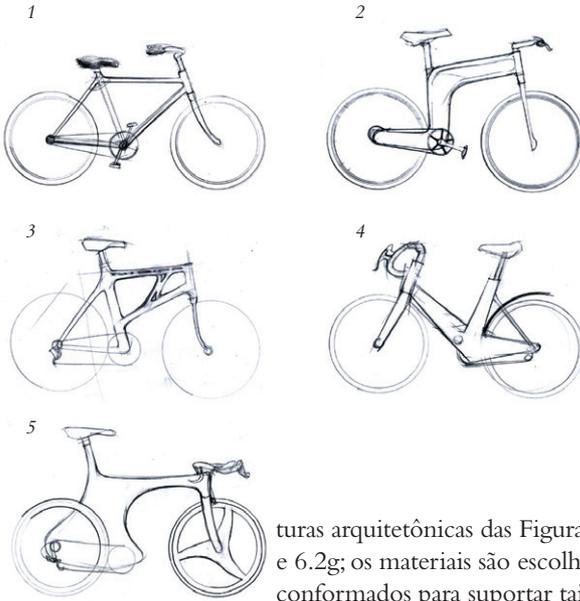


Figura 6.8 – Matriz material/processo para bicicletas

A matriz sugere possíveis combinações de material e processo de produção; os espaços vazios representam oportunidades ou limitações.

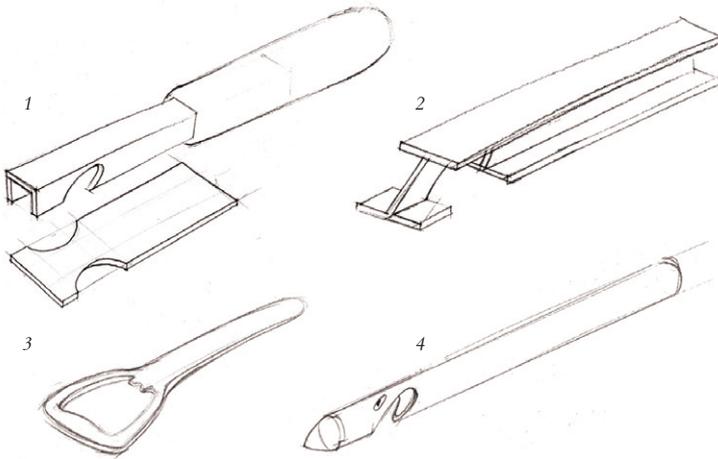
turas arquitetônicas das Figuras 6.2c e 6.2g; os materiais são escolhidos e conformados para suportar tais cargas.

As primeiras bicicletas tinham quadro de nogueira, com elementos unidos por adesivos especiais — eram leves, mas não muito duráveis. O aço sólido é dez vezes mais denso do que a madeira; porém, se conformado em um tubo oco e unido por brasagem, é tão leve quanto a madeira para as mesmas rigidez e resistência (forma 1 da Figura 6.8). A maioria dos metais pode ser estirada em tubos, de modo que as bicicletas de metal muitas vezes têm essa forma.

Porém, para alguns materiais a junção é difícil, lenta e cara. Será que não seria possível fazer um quadro com um número menor de partes, ou até mesmo como uma única estrutura integrada? A forma apresentada no desenho 2 mostra um quadro obtido por prensagem e união com adesivos especiais de duas chapas de alumínio, que resultou em uma casca leve e oca. O desenho 3 sugere moldagem por injeção para integrar as partes em uma única unidade; nesse caso, tanto

	Extrusão, extratamento	Conformação de chapas	Fundição sob pressão	Moldagem por injeção	Métodos de laminação de compostos
Aço	1				
Alumínio		2	4		
Magnésio			4		
Náilon				3	
CFRP					5

o quadro quanto as rodas são peças únicas moldadas em náilon. Peças moldadas, se fabricadas em grandes quantidades, podem ser baratas; e o náilon, diferentemente do aço, não enferruja. Contudo, há um problema: o náilon, mesmo quando preenchido, é mais de 50 vezes menos rígido e dez vezes menos resistente do que o aço de alta resistência, o que exige seções transversais maiores. O resultado é uma aparência atarracada e pesada de uma bicicleta de polímero; ela parece desajeitada — uma personalidade pouco apropriada para uma bicicleta. Descartada a moldagem por injeção, por que não fundição sob pressão? O magnésio é leve e fácil de fundir sob pressão. Mas tubos não podem ser fundidos sob pressão; já uma seção em “I” de rigidez equivalente, pode. O desenho 4 é o resultado — uma forma ditada pela escolha de processo e material. O material mais leve e mais rígido para uma bicicleta é o CFRP (resina epóxi reforçada com fibras de carbono). As primeiras bicicletas de CFRP usavam tubos, imitando as bicicletas de aço, mas uni-los era



	Estampagem, Conformação sob pressão	Moldagem por injeção	Extrusão	Estampagem
Aço	I		4	3
Termoplástico		I		
Alumínio			2	

Figura 6.9 – Matriz material/processo para abridores de garrafas

Novamente, a matriz também pode sugerir combinações possíveis.

difícil, e as junções adicionavam peso; a forma mostrada no desenho 4 não fez um bom uso do material. As propriedades do CFRP são mais bem utilizadas em uma construção monocoque (estrutura em forma de casca), como no desenho 5.

Em cada um desses exemplos, a forma mostrada nos desenhos reflete as propriedades do material e as maneiras como pode ser processado.

Abridores de garrafas: materiais e forma

Um abridor de garrafas executa uma função mecânica simples: prende a borda da tampa com um dente e — quando aplicada uma força de alavanca ao cabo — retira a tampa. Esse é um dos conceitos (há outros), e implica certas restrições de configuração e escala. O conceito pode ser corporificado de várias maneiras, mostradas nos desenhos esquemáticos da Figura 6.9. O apresentado em (3) é estampado em uma placa de aço plana. Os apresentados em (2) e (4) começam com uma seção extrudada, o que requer materiais fáceis de processar por extru-

são. O apresentado em (1) é fabricado por estampagem e dobradura de uma chapa de aço, com cabo de polímero moldado por injeção.

Matrizes³ como as apresentadas nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 são um modo útil de explorar a materialização e têm a capacidade de sugerir modos pelos quais as combinações material-processo poderiam resultar em novas soluções.

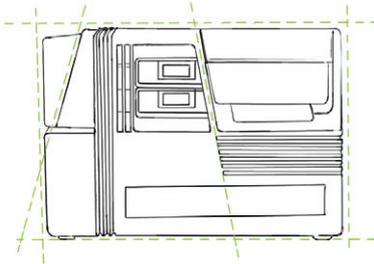
Antes de concluirmos este capítulo é interessante mudar um pouco de ponto de vista — não pensar no designer projetando, mas em um observador que analisa as origens de um projeto. O que pode ser inferido de um produto por suas características? Vamos considerar a conexão entre material e forma em outros campos de pesquisa, como por exemplo psicologia do usuário, arqueologia etc.

Compressor: linguagem de projeto

A Figura 6.10 mostra um compressor de 12 volts, pequeno, muito

3. A sugestão se originou com Haudrum (1994).

Figura 6.10 – Pequeno compressor



barato, projetado como ferramenta de emergência para motoristas. Quais são as associações e percepções que o designer está tentando criar? O que ele está tentando dizer, se traduzido em palavras? Nas figuras seguintes, são analisadas as fontes.

Os outros produtos mostrados na Figura 6.11 dão pistas visuais. Os três são exemplos de síntese do design de “força industrial”, expressos por meio de forma, cor, textura e elementos gráficos. Eles têm certas características em comum:

- Formas retas
- Horizontal repetida

- Diagonais que convergem para cima
- Cor sóbria
- Uso de textura para criar contrastes
- Decoração mínima

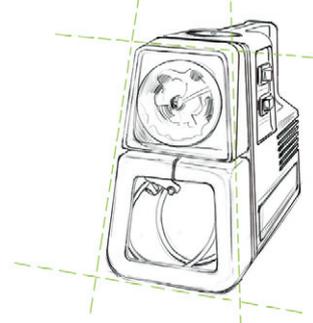
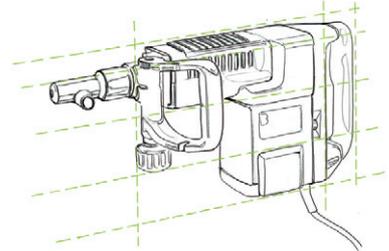
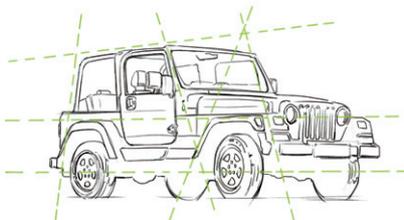
Essas são exatamente as características de projeto que o projetista adotou para o compressor. As associações são de ferramentas mecânicas e veículos comerciais ou militares; as percepções são de robustez e adequação à finalidade. A mensagem é: não se trata de um brinquedo; é um item importante do kit de ferramentas.

Design extremo

Concluimos esta seção com um exemplo de repaginação visual, criação dos alunos do Departamento de Desenho Industrial da Helsinki University of Art and Design (UIAH) em 1995. A tarefa era redesenhar um conjunto de cinco eletrodomésticos de pequeno porte — um secador de

Figura 6.11 – Elementos de força

Veículo off-road, furadeira profissional de impacto, empilhadeira e o pequeno compressor mostrado anteriormente (visto de outro ângulo).



cabelo, um ferro de passar roupa, um barbeador elétrico, uma torradeira e um mixer — em 12 “códigos” estilísticos diferentes. Um código é uma linguagem de estilo que evoca certas associações e emoções por meio da utilização de forma, cor e textura. Os resultados, apresentados em uma exposição e publicados em livro, são bem-humorados e provocativos.

Aqui reproduziremos três deles. Para o primeiro (Figura 6.12), o código é conservador, de luxo discreto, representado pela utilização de cores escuras e texturas semelhantes à da madeira, em contraste com superfícies metálicas com acabamento fosco e brilhante. O segundo (Figura 6.13) adota um código semelhante ao de um brinquedo, que evoca simplicidade, camaradagem e humor, conseguido por meio de formas arredondadas e cores primárias que distinguem as partes funcionais. Para o terceiro (Figura 6.14), o código é funcionalidade áspera e intransigente, obtido por meio de formas duras e angulares, com acabamento metálico escurecido e não refletivo.

Esses são exemplos de estilo pelo estilo, e, como tal, poderiam ser considerados superficiais e frívolos. Porém, vistos no contexto de exercícios de design, transformam-se em caricaturas que expõem, com graça, como associação e percepção podem ser manipuladas por intermédio do design.

Consideraremos a seguir a conexão entre material e forma no campo da arqueologia.



Figura 6.12 – Elementos de estilo
 Produto familiar (ferro de passar roupa) caracterizado pela forma modernista atenuada, cor sóbria e textura sutil (fonte: *The KOODI CODE*, U. of Arts and Design, Helsinque, Finlândia).



Figura 6.13 – Gracioso e amigável
 Mixer Mixit (fonte: *The KOODI CODE*, U. of Arts and Design, Helsinque, Finlândia).



Figura 6.14 - Funcionalidade robusta, de força militar, sem adornos
 Mixer Kalashnikov (fonte: *The KOODI CODE*, U. of Arts and Design, Helsinque, Finlândia).

Processo inverso: arqueologia do produto

Um arqueólogo, ao encontrar um objeto com decoração esculpida, como o apresentado na Figura 6.15, procura inferir de suas características necessidades e desejos que inspiraram essa criação. O diâmetro e a forma levemente côncava do objeto implicam o conceito: um prato ou uma travessa. O fato de ser raso e não ter bordas são características que sugerem sua funcionalidade: usado para conter sólidos, e não líquidos. A geometria do design o associa a outros artefatos descobertos anteriormente, com formas e imagens diferentes, porém tendo o mesmo estilo: as proporções, a geometria da decoração, o material e o modo como foi trabalhado. Isso, por sua vez, associa o prato a um período, uma sociedade e uma cultura específicos — a da civilização suméria —, sobre os quais já se sabe muito. O material e o respectivo processamento — prata forjada e cinzelada — e a qualidade do artesanato começam a dar significado à travessa: prata e a habilidade para trabalhar em prata nunca foram recursos aos quais o homem médio poderia aspirar. A percepção da travessa naquela época, assim como agora, é a de um objeto precioso e raro, propriedade de um indivíduo ou organização rica, importante e poderosa — esta última característica reforçada pela imagem do leão.

Esse tipo de método arqueológico é conhecido como “tipologia”. Baseia-se em agrupar objetos (“por tipos”) que compartilham os mesmos atributos de material, forma e decoração da superfície. Por trás dele está a premissa de que objetos de determinada época e lugar compar-

tilham um estilo reconhecível — o que hoje seria denominado “identidade de marca” — e que as mudanças de estilo são graduais. São usados três grupos abrangentes — e reveladores — de atributos na Arqueologia Tipológica. É assim que um texto⁴ muito conhecido os descreve:

- *Atributos formais* são características como forma, dimensões mensuráveis e componentes.
- *Atributos estilísticos* incluem decorações, padrão e acabamento de superfície.
- *Atributos tecnológicos* são os que descrevem o material e o processo usados para fazer o objeto.

O paralelo com as listas de características desenvolvidas neste capítulo, baseadas no pensamento de design atual, é surpreendente.

Vamos experimentá-lo para um design do século XX. O objeto mostrado na Figura 6.16 é obra de um escritório de design — Clarice Cliff — e epítome de um estilo — *art déco* — que dominou a Europa e os Estados Unidos na década de 1920. O estilo *art déco* invoca geometria semiabstrata que envolve linhas horizontais e em zigue-zague, e arranjo dinâmico. A ornamentação geométrica é baseada em hexágonos, octógonos, ovais, círculos e triângulos. A decoração é inspirada no classicismo, em arte pré-colombiana, egípcia e africana, usando motivos como o leque, a flor de lótus, o sol nascente e o raio.

A *art déco* foi o primeiro movimento de estilo a fazer uso expressivo de polímeros. A baquelita (resina fenólica), o primeiro plástico comer-



Figura 6.15 – Travessa suméria
Travessa suméria de prata forjada e decoração cinzelada.



Figura 6.16 – Travessas art déco (Clarice Cliff)
O material e a forma, a cor e a geometria da decoração caracterizam o movimento art déco.

4. Fagan (1999) fornece uma resenha fácil de ler sobre métodos arqueológicos.

cial que podia aceitar ampla gama de cores e texturas, prestava-se às curvas aventureiras e às formas escalonadas do movimento *art déco* — formas que seriam difíceis de fazer em madeira. Em um extremo, figurava o rádio portátil, cuja utilização de plástico, cromo, aço e alumínio permitia uma gama de produtos baratos, produzidos em massa. No outro, as suítes faustosas dos grandes navios transoceânicos e hotéis de primeira classe, em que a utilização de exóticas madeiras rígidas, couro, marfim, vidro e bronze criava um cenário para os muito ricos. A *art déco* está associada a luxo cosmopolita, progresso e poder industrial, fé na tecnologia e futurismo.

Alguns estilos de design, como os que já citamos (Quadro 4.5), têm tal significância que foram estudados em profundidade; o agrupamento de atributos — forma, padrão, decoração, material e processo — que caracteriza cada um é bem-documentado. Porém, existem muitos outros “estilos” que surgiram naturalmente na tentativa de atender a uma necessidade. Portanto, há um estilo associado a veículos militares que tem sua origem em necessidades puramente práticas, com as óbvias associações de durabilidade, robustez, força e agressividade. Designers de carros, em particular de veículos *off-road*, inspiram-se na forma, cor e material de veículos militares para criar, em seus produtos, a mesma personalidade.

Há um estilo associado a equipamentos eletrônicos de aviões e navios, de novo nesse caso de origem puramente utilitária, que transmite associações de desempenho técnico de última geração, precisão e confiabilidade. Designers de equipamentos

de altaprecisão para utilização dos entendidos do ramo usam sugestões visuais desse estilo — forma retangular discreta, acabamento preto fosco, interruptores e controles que imitam os dos equipamentos profissionais — para sugerir liderança técnica intransigente. Há um estilo que caracteriza a era aeroespacial, que vai além da simples otimização e se estende à cor e ao material (alumínio polido ou fosco), ao formato de janelas e portas (arredondados) e ao método de junção (rebites). Designers de eletrodomésticos usam esses e outros atributos que caracterizam a era aeroespacial para sugerir uma associação com a natureza avançada dessa indústria.

Essa digressão para a arqueologia tem uma razão. É que os métodos de tipologia permitem aos produtos serem indexados de várias maneiras: por configuração, escala, intenção, funcionalidade, personalidade e pelos materiais e processos usados para fazê-los. Um catálogo de produtos indexados dessa maneira (ou por outra equivalente, baseada em software) torna-se uma ferramenta para o design industrial, um tipo de colagem ou painel semântico computadorizado, e ainda uma outra maneira de sugerir materiais e processos. Essa ideia será desenvolvida no Capítulo 7.

Conclusões: o que influencia a forma?

Uma das frases mais citadas e influentes da história do design é: “a forma segue a função”. Seu criador, Louis Sullivan, queria dar ênfase a uma questão simples,⁵ mas a brevidade, a aliteração, a praticidade

5. Sullivan foi arquiteto, um projetista de arranha-céus. Sua frase lançou um princípio básico do modernismo, e com ele um mal-entendido que provou ser tão difícil de destruir quanto o concreto. Tornou-se um álibi para produtos com brutal falta de imaginação. O próprio Sullivan explicou o que a frase realmente significava, a saber, que construir Bancos que parecem templos gregos é ridículo — afinal, as pessoas que estão atrás dos balcões não usam togas. Um Banco que funciona como um Banco deve parecer um Banco; um Museu deve parecer um Museu; um edifício residencial deve parecer um edifício residencial.

— a *clareza* — da frase lhe dá uma qualidade instigante, que parece dizer que a melhor forma para um produto é a que mais se adapta à função que ele desempenha. Esse raciocínio tem uma atratividade óbvia para os engenheiros, cujo trabalho é fazer as coisas funcionarem, e há muitos exemplos nos quais a busca da função criou um objeto de beleza: a Ponte Golden Gate em San Francisco, o Fusca original da Volkswagen, a aeronave Concorde (embora, a bem da verdade, o Boeing 747 esteja mais próximo do princípio “a forma segue a função”) — todos esses foram projetados tendo em mente desafios técnicos, e não estéticos. Percepções como essas deram à frase o *status* de um dogma religioso.

Mas será que ela é de fato verdadeira? O melhor design — o único design — é o que melhor cumpre a função do produto? A forma, como acabamos de mostrar, também é influenciada por materiais; no caso da arquitetura, a influência é forte; no design de produto, embora às vezes menos óbvia, certamente ela está presente. Poderíamos desenvolver um caso com base na frase “a forma segue o material” — não soa tão bem, mas pode estar mais próximo da realidade. Parece ser uma regra geral que o bom design é aquele que utiliza materiais de modo a fazer uso mais eficiente, e muitas vezes visível,

de suas propriedades e da maneira como podem ser conformados. Mas regras, é claro, têm suas exceções: a utilização incongruente de materiais pode expressar algo surreal (um relógio peludo) ou ridículo (uma lâmina de faca feita de borracha), ou transferir uma associação de um objeto para outro (chocolate Torre Eiffel). Todos têm o seu lugar no mercado. Mas no centro do palco estão as formas que usam materiais de modo elegante, eficiente e econômico.

E função e material não são as únicas diretrizes da forma. Consumidores compram as coisas de que gostam; e, com muitas alternativas de méritos técnicos praticamente iguais, o consumidor é influenciado pelas tendências do gosto, pela publicidade e por coisas que outras pessoas compram. A forma, inevitavelmente, segue a moda. Há ainda outros modos de influenciar a forma. A forma segue o prazer. A sociedade quase saciada dos anos 2000 é atraída pelo humor (secador de cabelo do Snoopy; telefone em forma de banana), pela perfeição (pintura imaculada da carroceria de um carro novo), pelo luxo (sofás aconchegantes e macios estofados em couro) e pela novidade extravagante (qualquer design de Philippe Starck). A forma do produto é influenciada por muitas coisas, mas material e processo estão entre as mais fortes.

Leitura adicional

Bahn, P. *Archaeology — A Very Short History*. Oxford: Oxford University Press, 1996. (Levantamento vivaz, crítico e divertido de métodos arqueológicos e escolas de pensamento.)

Billington, D. P. *The Tower and the Bridge, New Art of Structural Engineering*. Princeton: Princeton University Press, 1985. (O professor Billington, engenheiro civil, argumenta que grandes estruturas — a Ponte do Brooklyn, os arranha-céus de Chicago, os telhados de conchas de concreto de Pier Luigi Nervi — não apenas superam desafios técnicos, mas alcançam o *status* de arte. Grande parte é biográfica — realizações individuais de arquitetos de estruturas —, mas o comentário que as permeia é poderoso e esclarecedor.)

Cowan, H. J. e Smith, P. R. *The Science and Technology of Building Materials*. Nova York: Van Nostrand-Reinhold, 1988. (Uma boa introdução sobre materiais na arquitetura, que revela distinções entre materiais estruturais, “externos” ou materiais para a parte externa, e “internos” ou materiais para controle de som, calor e luz dentro do edifício. Há capítulos sobre pedra, aço, madeira, concreto, vidro e plástico, com diretrizes para seleção.)

Duncan, A. *Art Déco*. Londres: Thames and Hudson, 1988. (Resenha abrangente da história e características do movimento *art déco* de design.)

Fagan, B. M. *Archaeology — A Brief Introduction*. 7ª ed. Londres: Prentice Hall International, 1999. (Introdução aos métodos e técnicas da moderna arqueologia.)

Haudrum, J. *Creating the Basis for Process Selection in the Design Stage*. Tese de doutorado, The Institute of Manufacturing Engineering, Technical University of Denmark, 1994. (Exploração de processos de seleção do ponto de vista de uma teoria de design.)

Jakobsen, K. “The Interrelation between Product Shape, Material and Production Method”, *ICED’89*, Harrowgate, pp. 775–778, ago. 1989. (Jakobsen identifica a interdependência entre função, forma, material e processo, e ensina como podemos seguir diferentes sequências para a seleção dos quatro aspectos.)

Lenau, T. “Material and Process Selection using Product Examples”, apresentado na Euromat 2001 Conference, Rimini, Itália, 10–14 jun. 2001. (Análise das necessidades que os designers industriais têm de informações sobre materiais.)

Muller, W. *Order and Meaning in Design*. Utrecht: LEMMA Editores, Utrecht, 2001. (W. Muller é professor da Escola de Design Industrial da Delft Technical University. O livro descreve o processo que ele desenvolveu para entender e ensinar Design Industrial. Contém várias percepções úteis, algumas das quais usamos neste capítulo.)

University of Art and Design Helsinki. *KOODI Code*. Helsinque: UIAH Books, 1995. (Delicioso conjunto de exemplos de redesign de pequenos produtos domésticos em estilos diferentes.)

Capítulo 7
**Criando uma estrutura para
seleção de materiais**



Para criar uma ferramenta de seleção de materiais, precisamos estruturar as informações que foram apresentadas até aqui. Essa ferramenta, como descrita no Capítulo 3, deve: (a) coletar e armazenar informações de materiais, processos e produtos, organizando-as de modo que permita rápida recuperação; (b) apresentar essas informações em formato criativo; e (c) permitir pesquisa, recuperação e combinação de informações sobre materiais, processos e os produtos que eles criam. Para isso, a primeira etapa é a classificação.

Classificação e indexação

Classificação é a primeira etapa para trazer ordem a qualquer empreendimento científico. Os fundadores da biologia, zoologia e geologia foram os criadores dos sistemas de classificação. A classificação segrega uma população inicialmente desordenada em grupos que, de algum modo, têm semelhanças significativas. Esses grupos podem ser subdivididos procurando-se níveis mais refinados de similaridades dentro de cada um. O sucesso dos grandes sistemas de classificação deve-se à escolha de atributos relevantes e do modo de julgar o que é “significativamente semelhante”. A classificação de Mendeleiev dos elementos na tabela periódica, a classificação de Darwin para a vida natural das ilhas Galápagos

e a classificação das plantas de Lineu, além de trazerem ordem ao assunto que estudavam, sugeriram a existência de membros que estavam faltando nas populações — elementos e espécies que ainda não tinham sido descobertos. Nem todas as classificações sobreviveram — ainda hoje o mapeamento genético está reconstruindo as classificações da biologia. Porém, de modo algum isso diminui a importância da classificação original; ela foi uma etapa essencial para chegar à nova estrutura.

A classificação desempenha um papel importante em design. Design envolve escolha, e uma escolha é feita a partir de uma enorme gama de ideias e dados — entre eles, a escolha de materiais e processos. A classificação está intimamente ligada à indexação, uma atividade fundamental para a

recuperação, bem como para a seleção de informações. Porém, para serem eficientes, a classificação e a indexação devem ser adaptadas à natureza da “população” de objetos que devem ser classificados e à finalidade da busca. Considere o exemplo a seguir.

Estrutura de informações para uma livraria

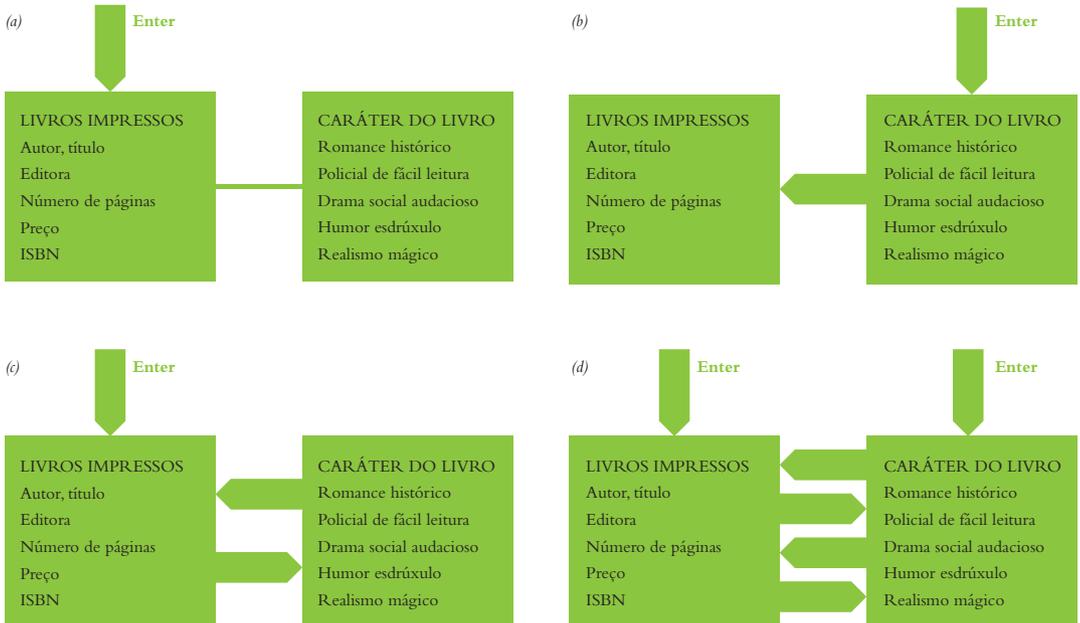
Imagine que você dirige uma pequena livraria e tem acesso ao banco de dados padrão para livros impressos. Nesse banco de dados figuram certos atributos de livros: o autor, a editora, o título, o ISBN (International Standard Book Number), a data de publicação, o preço, e assim por diante. Um cliente que quer um livro e conhece qualquer uma dessas informações pode ser ajudado. A recuperação é objetiva e sistemática: qualquer um que faça o mesmo pedido receberá exatamente a mesma resposta (Figura 7.1a). Daremos a isso o nome de “indexação simples”.

Mas suponha que o cliente não sabe nada disso e simplesmente quer “um romance histórico”. Ele ainda pode ser ajudado se você — o dono da livraria — conhecer o caráter dos livros que vende ou tiver um banco de dados que contenha tais informações (Figura 7.1b). Aqui, os atributos descrevem a natureza dos livros em um nível mais abstrato: biografia, documentário ou ficção; romântico, trágico ou humorístico; contemporâneo ou histórico, e assim por diante. Então uma busca por “romântico e histórico” retornará livros que atendem os desejos do cliente. O método é subjetivo, não sistemático — é baseado em percepções, não em simples fatos — e, às vezes, as visões sobre o caráter de um livro

serão diferentes. Porém, se existir um amplo consenso (como certamente ocorre com os livros), a seleção por características é produtiva: é rápida, flexível e processa bem imprecisões na definição dos dados. Embora não seja exata, é um grande passo à frente (a alternativa é a resposta “se você não souber o ISBN, não poderei ajudá-lo”). Daremos a isso o nome de “indexação profunda”.

Contudo, ainda há mais. A Figura 7.1c mostra um tipo diferente de seleção. Aqui, a seleção não é mais uma simples busca que utiliza o índice relevante; ela depende de analogia. É uma resposta ao cliente que gosta de livros do autor X, porém, como já leu todos eles, agora quer livros de caráter semelhante, escritos por outros autores. Os livros do autor X têm uma ou mais características abstratas, e essas mesmas características estão ligadas a outros autores. Nesse caso, as palavras exatas usadas para descrever o caráter do livro são menos importantes; elas são, por assim dizer, “variáveis fictícias”, que criam associações entre um autor e outro.

Dando mais um passo à frente (Figura 7.1d), o par acoplado de bancos de dados permite “busca aleatória” (*browsing*). A busca aleatória é baseada em curiosidade, é o modo de satisfazer uma necessidade que é sentida, mas não é exatamente definida. É como passear por uma livraria, puxar livros das estantes e verificar o caráter desses livros até encontrar um que combine com o que você está procurando. A busca aleatória permite sugestões não planejadas, sugestões inesperadas, ao acaso: você sai da livraria com livros que, quando entrou, não sabia que queria; é uma espécie de inspiração.



Pode até parecer que toda essa explicação está longe do assunto fundamental deste livro, mas contém mensagens úteis. A primeira: a escolha de atributos e a classificação e indexação que dela decorrem devem ser adaptadas à finalidade para a qual as informações serão usadas. A segunda: a indexação múltipla permite uma diversidade mais rica de métodos de seleção, dos quais a distinção mais surpreendente é entre os baseados em análise — “achar um objeto que tem algo” — e os que usam analogia — “achar um objeto que é parecido com alguma coisa”. Então, veja como são construídas as classificações:

- *Empiricamente*: usando fatos universais, verificáveis — do mesmo modo que os cientistas sociais poderiam classificar a população por idade, sexo, estado civil, número de filhos, profissão, renda e assemelhados.

- *Visualmente*: procurando agrupamentos em “mapas de densidade” de atributos — como na classificação de dados estatísticos de ocorrência de crimes no mapa de um país e agrupando as áreas que tenham uma determinada densidade de tais ocorrências. Os métodos de mapeamento de atributos e de escala multidimensional, descritos no Capítulo 4, revelam “similaridades” dentro de populações de materiais, processos ou produtos.
- Usando *conhecimento científico* subjacente: como na classificação de materiais baseada na natureza de suas ligações interatômicas e estruturas cristalinas, ou na classificação de animais com base no DNA.
- Por qualidades mais abstratas de *percepção* ou *associação*: do mesmo modo que você poderia classificar amigos como sensíveis, emocionais, tolerantes, ou facilmente

Figura 7.1 – Indexação e seleção
 (a) Indexação simples por atributos objetivos, usando “o objeto tem atributos...”;
 (b) Indexação profunda por associações ou percepções, usando “o objeto tem características...”;
 (c) Seleção por síntese, usando analogias — “o objeto é parecido com...”;
 (d) Seleção por inspiração, por busca aleatória.

irritáveis; ou do mesmo modo que classificamos livros como policiais, romances ou dramas sociais.

A classificação baseada na ciência, reforçada por mapas de propriedades, funcionou bem para os atributos de engenharia de materiais (Capítulo 4). O método empírico funcionou adequadamente para processos (Capítulo 5). Porém, para produtos, precisamos de algo mais abstrato.

Uma estrutura de informações para design de produto

A Figura 7.2 mostra o desenho esquemático de uma estrutura de informações para design de produto que reúne muitas das ideias desenvolvidas em capítulos anteriores. É composta por uma rede de seis círculos interligados que representam dados. O ponto central — Produtos — contém dados factuais para atributos de produtos: o nome do produto, fabricante, número do modelo, preço e detalhes de desempenho. Podemos encontrar produtos fazendo uma busca por esses atributos, exatamente como podemos encontrar livros pelo título ou pelo ISBN. Permite indexação simples.

Podemos alcançar um nível mais profundo de indexação interligando cada produto aos materiais e processos usados em sua manufatura (veja os pontos Materiais e processos na Figura 7.2). Agora é possível buscar todos os produtos, como, por exemplo, aqueles feitos de ABS, aço inoxidável ou ainda os produtos decorados, talvez, por tampografia. E isso também abre novos modos de

selecionar materiais por analogia e busca aleatória, aos quais voltaremos em breve. Mas, primeiro, observe os pontos à direita da Figura 7.2.

O primeiro contém informações sobre a estética do produto: os atributos visuais, táteis, acústicos e — se relevantes — olfativos apresentados no Quadro 4.3 do Capítulo 4. Isso permite a indexação de produtos por essas características e, indiretamente, por meio de produtos, liga essas características aos materiais e processos capazes de fornecê-las. A segunda contém informações sobre percepções — os atributos que aparecem no Quadro 4.4 (Capítulo 4). É como o quadro “caráter do livro” da Figura 7.1. Seu conteúdo e as ligações desse conteúdo a produtos são questões de juízo: dependem de cultura, gosto e moda, e evoluem com o tempo. Mas, como argumentamos antes, o fato de elas serem imprecisas não significa que são inúteis; permitem novos modos de indexação de produtos e proporcionam novos caminhos para a recuperação de informações sobre materiais e processos baseadas nos modos como são utilizados.

Resta um ponto — o círculo mostrado na parte superior da Figura 7.2. Ao projetar um produto, o designer é guiado por certas prioridades gerais que condicionam, em maior ou menor grau, todas as decisões e escolhas. Nós as encontramos no Capítulo 6, onde foram denominadas Intenções no design (Quadro 6.3). A palavra “intenção” descreve o que o produto é *destinado a ser* — as prioridades na mente do designer. A indexação por intenções permite certo grau de abstração, por agrupar produtos cujas funções podem ser radicalmente

diferentes, mas que são projetados com um conjunto de prioridades semelhantes. A intenção “Design para idosos” implica a visão de um produto com funcionalidade, apelo e preço adaptados a pessoas mais velhas, o que influencia a escolha de configuração, forma, tamanho, cor e textura, e dos materiais e processos usados para conseguir tais atributos. “Design para produção em massa” implica a visão de um produto que pode ser fabricado rapidamente e com custo baixo por equipamentos automatizados, o que orienta a escolha de materiais e processos de conformação, junção e acabamento. “Design para reciclagem” implica a escolha de materiais e de modos de junção e acabamento que permitirão que os produtos sejam desmontados e voltem ao ciclo de produção. Se as intenções são conhecidas ou podem ser inferidas, os produtos podem ser vinculados a elas.

É uma figura complexa. Uma analogia ajudará. Pense no produto como uma pessoa — antropomorfize-o. Então, os pontos do lado esquerdo da Figura 7.2 — a parte que trata de materiais e processos — transmutam-se em carne e osso, em coisas que você pode pegar e sentir — a fisiologia do produto. Os pontos do lado direito, referentes à estética e às percepções — tornam-se a simpatia e o caráter, a psicologia do produto. Encontrar uma analogia para intenções é mais difícil — poderiam ser as características com as quais a pessoa é dotada pela genética. Somando tudo, elas criam a *personalidade do produto*.¹

Essa estrutura de informações permite a indexação simples de um produto por seus atributos: nome, fabricante, número de série, e assim

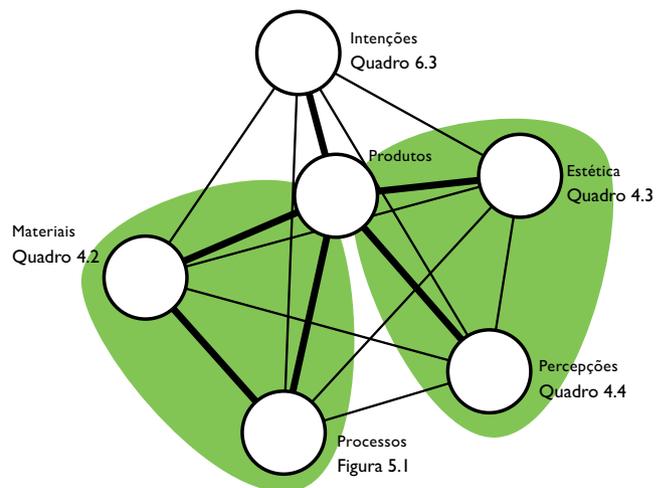
por diante. Mais proveitoso ainda, o produto pode ser indexado de um modo mais profundo por material, processo, intenção, estética e percepção. A indexação mais profunda permite todo um conjunto de métodos de seleção, exatamente como ocorreu com a indexação de livros.

Um exemplo ilustrará alguns deles. O conceito: um assento de segurança para transportar crianças em automóveis. O ponto de partida são as diretrizes básicas do projeto, o *briefing*, que estabelecem certos requisitos e implicam uma lista de características. O assento deve acomodar, segurar e proteger a criança quando submetida a desacelerações de até 10 g; deve ser forte o suficiente para suportar as forças de inércia que isso demanda e ao mesmo tempo não permitir que a criança sofra qualquer lesão. As dimensões do assento devem permitir que ele passe facilmente pela porta do carro. Deve ser leve, e ao mesmo tempo capaz de suportar má utilização e impactos, e tem de ser fácil de limpar. Em segundo lugar, vêm as intenções.

1. Talvez seja interessante pensar nisso como o “DNA do produto”, no sentido da combinação particular de características que o distingue de todos os outros produtos.

Figura 7.2 – Uma estrutura de informações para design de produto

Cada círculo e suas ligações são explicados no texto. Os números ao lado de cada círculo referem-se aos quadros e à figura apresentados ao longo do livro.



Há várias: “design para crianças” é a óbvia, mas “design para produção em massa” e “design para baixo custo” provavelmente também entram.

Focalizando a primeira: design para crianças. Quando pensamos em produtos para crianças, pensamos em robustez e tolerância à má utilização, altos padrões de segurança, materiais não tóxicos, formas arrojadas e simples, e cores alegres. O que podemos aprender com outros produtos que foram projetados com essa intenção?

Examinar produtos projetados para crianças pode nos dar ideias que talvez nos ajudem com o assento de segurança para automóveis. ABS, PP e náilon são usados em muitos produtos para crianças. São fortes, rijos, resistentes à corrosão e, é claro, não tóxicos e aprovados por órgãos competentes. Todos podem ter cores alegres e — por serem termoplásticos — são fáceis de moldar. Essas informações não configuram o assento de segurança para crianças, mas sugerem opções que vale a pena explorar e modos de criar as características que desejamos.

O assento deve obedecer a certos requisitos técnicos. Tem de ser leve e forte, portanto, requer materiais com características de alta resistência a peso. Deve suportar colisões, mas ser flexível se a criança for impactada contra ele, o que exige materiais resistentes e flexíveis. Os perfis de materiais apresentados mais adiante neste livro caracterizam tenacidade e resiliência: entre polímeros, ABS, PP e náilons podem ser encontradas ambas as propriedades, assim como entre poliésteres e epóxis reforçados com fibras. O material deve poder ser moldado ou prensado até assumir uma forma complexa parecida com uma concha ou casca

com os necessários pontos de fixação para tiras, arreios e acolchoados. Se a capacidade de ser colorido e moldado a custo baixo são prioridades, o ABS e o PP passam para o topo da lista. Se o peso leve e a resistência forem mais importantes, então polímeros reforçados com fibras é que sobem na lista, mas talvez tenham de ser pintados ou revestidos, embora as crianças sempre descubram meios de remover tintas e revestimentos muito mais eficientes que todos os meios conhecidos de aplicar esses materiais.

O design de produto bem-sucedido utiliza todas essas informações, e de mais de um modo. Exploramos esses modos em seguida, focando a seleção de materiais e processos.

Seleção de materiais para design de produto

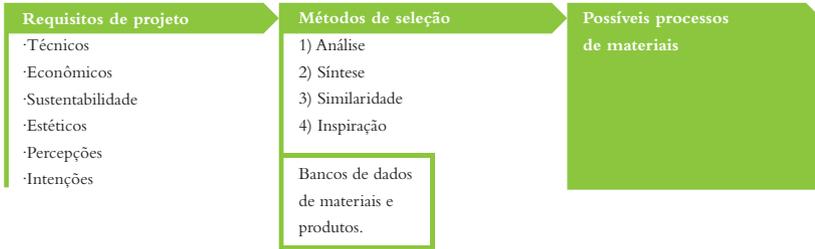
A vida está cheia de escolhas difíceis. Todos temos nossos modos de lidar com elas, alguns efetivos, outros não. Estudos de solução de problemas distinguem dois processos de raciocínio distintos, já citados no Capítulo 3: o raciocínio *dedutivo* e o *indutivo*. Eles são a base da seleção por análise, por síntese e por similaridade, que agora estudaremos com mais detalhes, usando a estrutura de dados da Figura 7.2.

O ato de seleção envolve converter um conjunto de insumos — os requisitos de projeto — em um conjunto de resultados — uma lista de materiais e processos viáveis (Quadro 7.1). Há vários métodos para fazer isso.

Seleção por análise²

Engenheiros técnicos são treinados em análise — é uma das

2. Um breve resumo do método analítico para seleção de materiais é dado no Apêndice deste capítulo. Explicações completas são dadas em textos sobre seleção de materiais como Dieter (1991), Charles et al. (1997) ou Ashby (2005) e Ashby et al. (2007); os dois últimos apresentam muitos exemplos resolvidos.



Quadro 7.1 Métodos de seleção

1) por análise; 2) por síntese; 3) por similaridade; e 4) por inspiração.

ferramentas da profissão. Nesse caso, os insumos são os requisitos técnicos. A análise prossegue em quatro etapas.

- *Tradução* dos requisitos, muitas vezes expressos inicialmente em termos não técnicos, para uma declaração de objetivos e restrições a que o projeto deve obedecer.
- *Análise* do componente para o qual o material é pensado, identificando métricas de desempenho e expressando-as como equações que medem desempenho.
- *Identificação*, a partir dessas equações, das propriedades do material que determinam o desempenho.
- *Triagem* de um banco de dados de materiais e suas propriedades, eliminando os que não obedecem às restrições e classificando os que restam por sua capacidade de maximizar as métricas de desempenho.

Assim, para dar um exemplo simples, a escolha de um material para o raio de uma roda de bicicleta de

peso leve deve prosseguir da maneira mostrada no Quadro 7.2. Os três primeiros requisitos de projeto impõem limites aos atributos de materiais e eliminam candidatos inviáveis. Os que permanecem são classificados pelo quarto requisito — o da resistência com massa mínima (aqui a massa é a métrica de desempenho). Isso deve ser contrabalançado com o custo, por meio de métodos *trade-off**. O método de análise está resumido na Figura 7.3 e no Apêndice deste capítulo; não prosseguiremos com ele aqui.

O método de análise tem grandes forças. É sistemático. É baseado em um entendimento profundo (“fundamental”) dos fenômenos subjacentes. Além disso, é robusto — contanto que os insumos sejam definidos com precisão e as regras nas quais a modelagem se baseia sejam sólidas. Todavia, essa última provisão é séria, já que limita a abordagem a um subconjunto de problemas bem especificados e regras bem-estabelecidas. Em

* No original em inglês, o termo *trade-off*, usado pelos autores, resume um conjunto de métodos de análise e tomada de decisão utilizadas comercialmente para otimizar a escolha de materiais de produtos e suas características em função da importância ou interesse relativo de cada uma delas em relação às outras. Para facilitar a pesquisa bibliográfica de conteúdo e amplitude de seu uso, neste livro, o termo será empregado sem tradução. (N.R.T.)

Quadro 7.2 – Análise técnica para um raio de roda de bicicleta

Restrições, que aparecem nas três primeiras linhas, permitem triar e eliminar materiais incapazes de executar a função. O objetivo de minimizar a massa permite a classificação dos sobreviventes.

Insumos	Caminho para a seleção de materiais
Resistente a impacto	Tenacidade à fratura, $K_{Ic} > 20 \text{ MPa.mH}$
Resistente à corrosão	Nenhum material que sofra corrosão pela água
Disponível sob a forma de haste	Nenhum que não possa ser obtido por extrusão ou estiramento
Leve e que suporte a carga de projeto	Classificar pela razão resistência/densidade

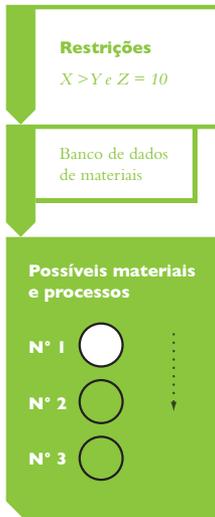


Figura 7.3 – Seleção por análise

Requer a seleção de um material em um banco de dados de materiais e atributos de materiais. Aqui, o círculo branco representa uma solução que cumpre todas as restrições e maximiza o objetivo.

engenharia, como em todos os outros aspectos da vida, às vezes é necessário basear decisões em insumos cujas especificações são imprecisas e para os quais não há regras perfeitamente formuladas. Então, o método analítico não serve e precisaremos recorrer a outro tipo de método diferente.

Seleção por síntese

A síntese é baseada na experiência prévia e na analogia. Nesse caso, os insumos são os requisitos de projeto expressos como um conjunto de características que descrevem intenções, estética e percepções. O caminho da seleção de materiais explora o conhecimento de outros problemas resolvidos (“casos de produtos”) que têm uma ou mais características em comum com o novo problema, o que permite que novas soluções potenciais sejam sintetizadas e testadas quanto à capacidade de cumprir os requisitos de projeto.

Novamente, um exemplo específico ajudará a entender. Um fabricante de equipamentos médicos percebe a necessidade de adaptar sua bomba de insulina, percebida no momento em questão como clínica e intimidadora, para torná-la mais aceitável — amigável, seguindo tendências modernas, e até mesmo bem-humorada. Isso resulta em uma lista de percepções desejadas apresentada no Quadro 7.3. Um

ponto de partida é pesquisar outros produtos que são percebidos desse modo. Uma busca por “tendência” e “bem-humorada” resulta em vários produtos caracterizados por cores alegres, utilização de policarbonato transparente e polietileno translúcido, elastômeros macios supermoldados, formas simples e arredondadas que às vezes lembram formas humanas ou de animais, frequentemente fabricados por moldagem por injeção. Isso sugere mudanças no design que a empresa talvez queira considerar.

À primeira vista, parece que os métodos de síntese baseados em analogia (Figura 7.4) têm uma grande desvantagem: como dependem de experiência e designs anteriores, não podem sugerir soluções radicalmente novas, ao passo que o método de análise, como não exige tais insumos, pode. Porém, talvez esse juízo seja muito severo. O método incentiva polinização cruzada: desenvolvimentos em uma área podem ser adaptados para utilização em outras, onde antes eram desconhecidos; é inovação de um tipo diferente — o que poderíamos chamar de *casamento de tecnologias*.

Seleção por similaridade

Há muitas razões para que um designer queira considerar materiais similares: a necessidade de substituição, rompimento com ideias preconcebidas ou simples exploração. Qual

Quadro 7.3 – Percepções desejadas para uma bomba de insulina

Percepções podem ser criadas combinando características de outros produtos que são percebidas de determinado modo.

Insumos	Caminho para a seleção de materiais
Tendências modernas	PC transparente, de cores alegres PP e PE translúcidos
Bem-humorado	Superfícies de elastômeros supermoldados e macios Formas simples, coloridas Formas moldadas por injeção que lembram formas humanas ou de animais

é o melhor modo de encontrar esses materiais? Procuram-se substitutos quando um material já utilizado não está mais disponível ou, por alguma razão, não cumpre um requisito de projeto modificado — por causa de uma nova lei ambiental, por exemplo. A seleção por análise — a modelagem de função, objetivo e restrições a partir do zero — pode ser possível, mas quando optamos por ela estamos descartando informações valiosas. Materiais consagrados são respeitados por que, por razões nem sempre totalmente compreendidas, possuem a mistura complexa correta de atributos que cumprem os requisitos do projeto. O perfil de atributos do material existente é, por assim dizer, o retrato de um ideal. Um bom retrato pode captar muito do que é sutil e difícil de analisar.

Idealmente, o substituto deve ser comparável com o existente em todos os aspectos exceto, é claro, a razão por que queremos substituí-lo. Portanto, um modo de abordar tais problemas é o de “capturar — editar — buscar”. Em primeiro lugar, capturar o perfil de atributos do material existente — tarefa fácil, com as fontes de dados existentes hoje. Se usarmos esse perfil como um gabarito para a seleção, provavelmente encontraremos somente o material com o qual começamos. Portanto, a próxima etapa — editar — envolve diminuir as restrições a atributos não críticos, admitindo uma faixa mais ampla de candidatos e reforçando a restrição imposta ao atributo que estava causando o problema. A última etapa — buscar — descobre substitutos que oferecem as qualidades essenciais do material existente, sem suas fraquezas (Figura 7.5).

Uma busca por materiais similares pode servir como método para expandir o conjunto de possíveis soluções de materiais. Designers geralmente têm ideias preconcebidas: por exemplo, policarbonato, ABS ou a mistura dos dois são as melhores escolhas para corpos e cascas de produtos; polietileno, polipropileno ou PET podem resolver a maioria dos problemas de embalagem; alumínio ou aço são a resposta para a maioria dos produtos de “engenharia”. Ideias preconcebidas podem ser um atalho para uma solução rápida, mas restringem a inovação. Uma busca por materiais similares pode desbancar essas ideias preconcebidas, e assim introduzir criatividade ou novidade em uma solução de projeto.

Seleção por inspiração

Designers tiram a maioria de suas ideias de outros designers (passados, bem como presentes) e do seu ambiente. É possível pesquisar essas ideias de modo sistemático — essa é a base da seleção por síntese. Ela recorre a um índice mental (ou a livros indexados ou arquivos de computador) para procurar características e o modo como são criadas. Porém, muitas boas ideias são despertadas por acidente — por um encontro não planejado. O encontro é “inspirador”, no sentido de que provoca o pensamento criativo. O método científico não ajuda nesse caso; inspiração desse tipo ocorre por imersão; pela exploração de ideias quase aleatoriamente, como se remexêssemos em uma arca do tesouro (Figura 7.6). Aqui, a palavra “quase” é importante; se queremos que a inspiração seja útil, a arca do tesouro de ideias precisa ter alguma estrutura. A inspiração pode ser despertada por interação



Figura 7.4 – Seleção por síntese

Novas soluções são geradas (e materiais selecionados para elas) por meio do exame de produtos existentes que tenham características como as requeridas para o novo projeto. Aqui, o círculo branco representa a síntese de características das três soluções apresentadas (círculos coloridos).



Figura 7.5 – Seleção por similaridade

Encontrar substitutos por comparação de perfis de atributos. Aqui os círculos coloridos representam materiais cujos valores de atributos críticos estão, o mais aproximadamente possível, de acordo com o do material existente (círculo branco).

com materiais, por meio de uma coleção de materiais ou — menos recomendável — por meio de imagens desses materiais. Pode ser acionada por interação com produtos, percorrendo lojas especializadas em bom design ou folheando livros — na verdade, um dos papéis desempenhados por revistas de design e livros artísticos é o de simplesmente apresentar ao leitor imagens maravilhosas em ordem mais ou menos aleatória. Outro meio, possibilitado por tecnologia baseada na web, é um arquivo visual digital de imagens de materiais, com *links* para uma quantidade limitada de informações técnicas e contatos com fornecedores.

Combinando os métodos

A Figura 7.7 mostra um modo de pensar sobre todos esses métodos. É um desenvolvimento do modelo das bolhas apresentado no Capítulo 3, especializado na seleção de materiais e processos. Nesse modo de pensar, os métodos de seleção que acabamos de descrever são vistos como grandes bolhas; sua tarefa é gerar possíveis soluções para as diretrizes iniciais do projeto. Cada uma gera uma população de pequenas bolhas — as soluções que sobreviveram ou emergiram da técnica —, cada uma contendo informações sobre um material ou uma combinação de materiais. Os métodos de seleção — as bolhas maiores — recorrem a dois recursos importantes: um banco de dados de materiais e processos e um banco de dados de produtos, armazenados como “casos”: exemplos indexados da utilização de materiais em produtos.

A escolha do caminho desde as diretrizes básicas do projeto até a especificação do produto depende da

natureza do problema de seleção. Se bem especificado, o método de análise faz uma triagem eficiente da população contida no banco de dados de materiais, descartando membros que não podem cumprir os requisitos e classificando os que podem por uma medida de seu desempenho, o que resulta nas “bolhas” de soluções possíveis 1, 2, 3... Então, o banco de dados de produtos fornece informações de suporte — produtos nos quais esses materiais selecionados foram usados.

Se não for fácil quantificar os requisitos, a análise é abandonada. O método de síntese pode ser usado para gerar possíveis soluções como A, B, C... explorando produtos que têm as características desejadas, extraindo informações de materiais e processos sobre eles. Nesse caso, o banco de dados de produtos é o recurso principal; o de materiais simplesmente informa o perfil de dados uma vez encontrada uma possível solução de material. Quando a especificação é ainda menos precisa, as possíveis soluções a, b, c... também podem ser geradas pelo método da similaridade — buscar materiais cujos perfis são similares ao do material já usado —, na verdade, reavaliar a utilização de material em qualquer produto ajuda a saber quais são as alternativas. Nesse caso, os bancos de dados de materiais, bem como os de produtos, agem como recursos. Finalmente, uma possível solução pode surgir de um processo de busca aleatória — simplesmente explorando a utilização de materiais em produtos, escolhidos aleatoriamente, e usando o que foi descoberto como uma fonte de inspiração ($\alpha, \beta, \gamma...$).

Qualquer um desses métodos pode ser usado isoladamente, mas o caminho

mais efetivo explora as características mais úteis de cada um. Assim, a escolha de um material para uma estrutura vazada leve é um problema bem-especificado, que se presta à análise e gera possíveis soluções. Porém, se uma dessas soluções não é muito conhecida, o designer pode relutar em usá-la, temendo problemas inesperados. Então, é útil recorrer à síntese e procurar produtos que são estruturas vazadas para verificar do que são feitos, ou produtos feitos de um material pouco conhecido. O resultado disso pode ser considerado como uma fusão de bolhas de solução da análise com as da síntese, que gera soluções novas, híbridas. Soluções encontradas pelos outros métodos podem ser combinadas de modo semelhante.

Como modelo para a seleção do processo de material, esse diagrama de bolha, embora complexo e indistinto, é uma representação mais exata do que a do modelo linear da Figura 3.3. Dentro de um método — análise, por exemplo —, pode-se encontrar um caminho linear, mas é raro que esse caminho resulte em uma escolha não ambígua. Quase sempre um caminho mais tortuoso, como o que acabamos de descrever, é o melhor. Os estudos de casos que apresentamos em seguida no Capítulo 8 ilustram isso.

Resumo e conclusões

Soluções criativas para problemas de design podem ser obtidas de mais de um modo; quanto mais flexível a abordagem, maior a possibilidade de criatividade. Os requisitos essenciais são:

- Uma *estrutura de informações* que permita indexação simples, bem como profunda; nesse caso, temos indexações cruzadas por Intenções, Produtos, Materiais, Processos, Estética e Percepções.³
- *Métodos de seleção* que podem lidar com requisitos de projeto e regras formuladas com precisão, e com características especificadas com menor precisão, que podem incluir as dimensões técnicas, estéticas e percebidas.

Quatro métodos complementares são descritos e ilustrados aqui:

- *Seleção por análise* (raciocínio dedutivo), que utiliza os insumos especificados com precisão, os métodos de projeto bem-estabelecidos da engenharia moderna e bancos de dados de materiais e seus atributos.
- *Seleção por síntese* (raciocínio indutivo), que aproveita experiência anterior, recuperada por meio da busca de uma combinação entre as características, intenções, percepção ou estética desejadas com soluções de projetos documentadas, armazenadas em um banco de dados de “casos” de produtos.
- *Seleção por similaridade*, que busca materiais cujos atributos selecionados combinam com os de um material existente, sem saber por que eles têm os valores que têm, mas simplesmente porque são relevantes para o sucesso do projeto.
- *Seleção por inspiração*, que procura ideias por meio do exame aleatório de imagens de produtos ou materiais (ou visitando lojas e examinando os próprios produtos e materiais), até encontrar uma ou



Figura 7.6 – Seleção por inspiração

A inspiração pode ser despertada por materiais ou processos, em particular se o material for novo ou for usado de modo inusitado. Aqui os círculos representam soluções inspiradas por um exame aleatório de uma coleção ou catálogo de materiais e produtos.

3. Essa estrutura pode estar armazenada na mente do designer — a “experiência” de uma vida dedicada a projetos —, mas isso é de pouca ajuda para quem é novo na área. Para esses, uma estrutura equivalente baseada em computador, que armazena informações sobre produtos, materiais e processos, indexados do modo descrito neste capítulo, pode ajudar.

mais que sugerem soluções para o desafio em questão.

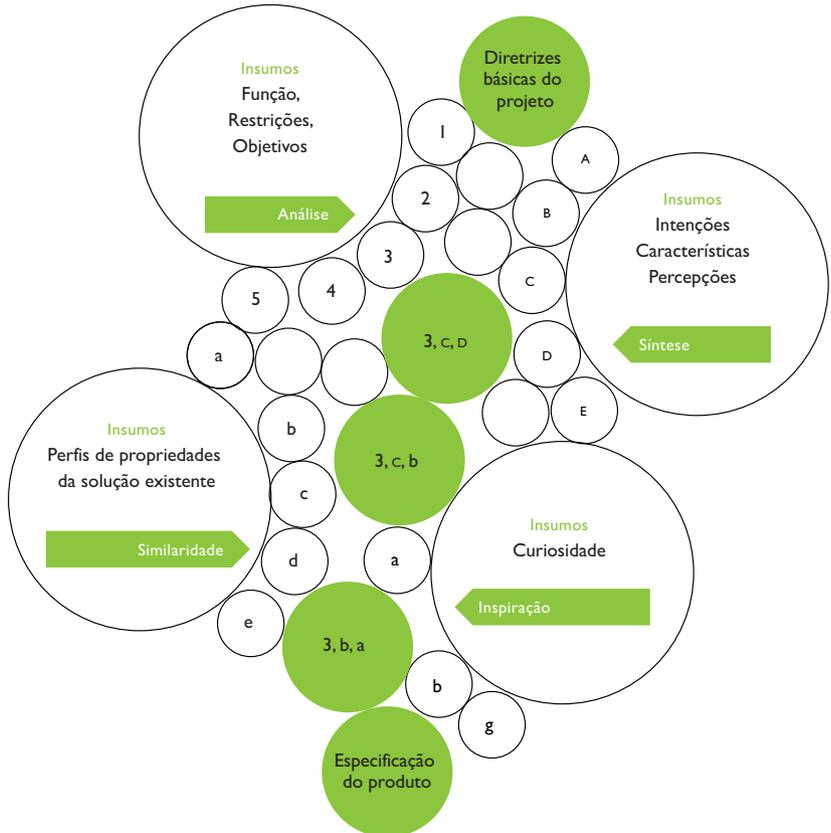
O ensino tradicional da engenharia dá ênfase aos métodos analíticos, frequentemente ao ponto de excluir ideias sobre analogia e síntese. A justificativa é que a análise é uma ferramenta extremamente poderosa que, com o suporte dos computadores modernos, pode ser aplicada com velocidade e rigor cada vez maiores; além disso, pode ser ensinada como um conjunto de procedimentos formais. Mas há evidências de muitas ideias criativas em áreas técnicas — ciência e engenharia entre elas — que não surgem da análise, mas do pensamento indutivo:

de sucessivas soluções adivinhadas (palpites informados, é claro, resultantes de experiência anterior) e do teste de uma após a outra até encontrar uma solução, amarrada por todos os cordões das muitas soluções anteriores, que combina com os requisitos.

Então, cada um dos métodos tem suas forças e fraquezas. Um método mais adequado para um problema pode não servir para outro — todos são necessários. Muitas vezes, a melhor solução é encontrada pela combinação dos três métodos; essa combinação, como ilustramos aqui, é uma ferramenta muito mais poderosa do que qualquer um deles usado individualmente.

Figura 7.7 – O caminho da seleção de materiais

A seleção é vista como uma jornada desde as diretrizes básicas do projeto até a especificação do produto. O viajante é ajudado, em vários graus, pelas ferramentas de análise, síntese, similaridade e inspiração (círculos grandes), que geram soluções sucessivamente refinadas à medida que a jornada prossegue.



Leitura adicional

Ashby, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. (Um texto que complementa este livro apresentando métodos para seleção de materiais e processos para cumprir requisitos técnicos de projeto e uma grande quantidade de diagramas de propriedades de materiais.)

Ashby, M. F., Shercliff, H. R. e Cebon, D. *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. (Um texto introdutório que usa uma abordagem baseada em design para a seleção de materiais e processos de engenharia.)

Bailey, K. D. *Typologies and Taxonomies, an Introduction to Classification Techniques*. Thousand Oaks, CA e Londres: Sage, 1995. (Uma monografia sobre classificação em ciências sociais, que apresenta uma poderosa defesa de sua aplicação nessas ciências e em outras.)

Bakewell, K. G. B. *Classification for Information Retrieval*. Londres: Clive Bingley, 1968. (Uma coletânea de seis palestras sobre diferentes tipos de classificação, interessante pela contribuição que dá à classificação facetada, precursora das estruturas de banco de dados relacionais.)

Charles, J. A., Crane, F. A. A. e Furness, J. A. G. *Selection and Use of Engineering Materials*. 3ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. (Uma abordagem de ciência dos materiais para a seleção de materiais — nada sobre estética.)

Dieter, G. E. *Engineering Design, a Materials and Processing Approach*. 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1991. (Um texto bem-equilibrado e respeitado que foca o lugar de materiais e processamento no projeto técnico. Nada significativo sobre design industrial.)

Everitt, B. *Cluster Analysis*. Londres: Heinemann, 1974. (Uma introdução abrangente à análise de agrupamentos.)

Haberlandt, K. *Cognitive Psychology*. 2ª ed. Boston: Allyn and Bacon, 1997. (Uma introdução à psicologia da escolha e da tomada de decisões com percepções que são úteis neste livro.)

Kolodner, J. L. *Case-Based Reasoning*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1993. (Raciocínio baseado em casos é uma técnica de armazenamento de informações sobre situações anteriores de forma a permitir recuperação de informações úteis para resolver problemas atuais; os métodos são bem-apresentados neste livro.)

Zwicky, F. *Discovery, Invention, Research*. Toronto: Macmillan, 1969. Library of Congress N° 69-10785. (Uma introdução à abordagem morfológica para a solução de problemas.)

Apêndice: Seleção por análise

Aqui parafraseamos a abordagem analítica para seleção de materiais. Damos apenas um breve esboço.⁴

Função, objetivos, restrições e variáveis de controle

Qualquer componente de engenharia tem uma ou mais funções: suportar carga, conter uma pressão, transmitir calor, e assim por diante. Ao projetar o componente, o designer tem um objetivo: torná-lo o mais barato possível, talvez, ou o mais leve, ou o mais seguro, ou uma combinação dessas condições. Isso deve ser alcançado com algumas restrições: certas dimensões são fixas, o componente deve suportar uma determinada carga ou pressão sem falhar, tem de funcionar com segurança dentro de certa faixa de temperatura e em um dado ambiente, e muitas mais. Função, objetivos e restrições (Quadro 7A.1) definem as condições de contorno para a seleção de um material e — no caso de componentes que suportam cargas — uma forma para sua seção transversal.

O desempenho do componente, medido por métricas de desempenho P , depende de variáveis de controle. As variáveis de controle incluem as dimensões do componente, as cargas mecânicas, térmicas e elétricas que ele tem de suportar, e as propriedades do material de que ele é feito. O desempenho é descrito em termos das variáveis de controle por uma ou mais funções-objetivo. Uma função-objetivo é uma equação que descreve uma métrica de desempenho, P , expressa de modo tal que o desempenho esteja inversamente relacionado com o seu valor, o que exige que se procure um valor mínimo para P . Assim,

$$P = f [(Cargas, F), (Geometria, G), (Material, M)]$$

ou

$$P = f [F, G, M]$$

onde “ f ” significa “uma função de”. Projeto ótimo é a seleção do material e geometria que minimizam uma determinada métrica de desempenho, P . Otimização multiobjetivos é um procedimento para melhorar simultaneamente várias métricas de desempenho interdependentes, P, Q, R .

No plano abstrato, isso parece terrivelmente obscuro. Um simples exemplo desmistificará o método. Considere o problema de seleção mencionado no texto: materiais para o raio de uma roda de bicicleta de corrida. Os requisitos de projeto especificam seu comprimento L , e a carga, F , que deve suportar. A *função* é o de um *tirante*; o *objetivo* é minimizar a massa; as *restrições* são a carga especificada, F ; o comprimento, L e o requisito de suportar a carga sem falhar. As *variáveis livres* (as que, até agora, não estão especificadas) são a área da seção transversal, A , e a escolha do material. Os insumos para o modelo, que agora descrevemos, estão resumidos no Quadro 7A.2.

Quadro 7A.1 – Detalhes de análise

Função

O que um componente faz?

Objetivo

O que deve ser maximizado ou minimizado?

Restrições

Quais são as condições não negociáveis que devem ser cumpridas?

Variáveis livres

Quais são as variáveis de controle que podemos ajustar?

4. O método é desenvolvido totalmente, com muitos exemplos, na obra *Materials Selection in Mechanical Design* (Ashby, 2005) que em breve será traduzida pela editora Campus/Elsevier.

A medida de desempenho é a massa, m — é isso que desejamos minimizar. A equação de desempenho descreve esse objetivo:

$$m = AL\rho$$

onde ρ é a densidade do material do qual a haste é feita. O comprimento L é dado, mas a seção A é livre; reduzi-la reduz a massa. Porém, se ela for demasiadamente reduzida, não suportará mais a carga F e isso restringe a seção, exigindo que

$$\frac{F}{A} > \frac{\sigma_y}{S}$$

onde σ_y é a tensão de escoamento do material da haste, e S é um fator de segurança. Usando isso para substituir A na equação para m , temos

$$m > SFL \left[\frac{\rho}{\sigma_y} \right]$$

Tudo aqui é especificado, exceto o termo entre colchetes — e ele depende somente da escolha de material. A massa é minimizada (e o desempenho maximizado) se escolhermos materiais com o menor valor possível de ρ/σ_y , que é denominado *índice de desempenho de materiais*.

Índices de desempenho de materiais

Cada combinação de função, objetivo e restrição resulta em uma métrica de desempenho que contém um grupo de propriedades de material, ou índice de desempenho de materiais; o índice é característico da combinação. A Tabela 7A.3 apresenta alguns deles; a dedução desses índices é detalhada no texto que acompanha este livro. O ponto de interesse aqui é que materiais que tenham valores extremos de certos índices são bem adequados para cumprir certos conjuntos de requisitos de projeto. O raio é um exemplo: materiais com baixos valores de ρ/σ_y são boas escolhas. Índices permitem comparações. Se no momento em questão o raio é feito de um material de referência M_o e tem massa m_o , um material concorrente M_1 que tenha massa m_1 será mais leve do que M_o para a mesma capacidade de suporte de carga, pelo fator

$$\frac{m_1}{m_o} = \frac{\rho_1/\sigma_{y1}}{\rho_o/\sigma_{yo}}$$

(onde o índice “o” refere-se à referência e “1” aos novos materiais), o que dá uma medida direta do ganho em desempenho alcançada pela troca de M_o por M_1 .

Quadro 7A.2 – Detalhes de análise para um raio de roda de bicicleta

Função

Tirante.

Objetivo

Minimizar massa.

Restrições

Comprimento especificado L

Carga especificada F , não

sujeito a falha.

Variáveis livres

Seção transversal A

Escolha de material.

Tabela 7A.3 – Índices de desempenho de materiais

Quando queremos otimizar a escolha de material para obedecer a requisitos puramente técnicos, os índices agem como um guia.

Função, objetivo e restrição	Minimizar índice
Tirante, peso mínimo, rigidez recomendada (Suporte de cabo de uma estrutura leve sob tração)	ρ/E
Viga, peso mínimo, rigidez recomendada (Longarina de asa de aeronave, haste de taco de golfe)	$\rho/E^{1/2}$
Viga, peso mínimo, resistência recomendada (Braço de suspensão automotivo)	$\rho/\sigma_y^{2/3}$
Painel, peso mínimo, rigidez recomendada (Painel de porta automotiva)	$\rho/E^{1/3}$
Painel, peso mínimo, resistência recomendada (Tampo de mesa)	$\rho/\sigma_y^{1/2}$
Coluna, peso mínimo, carga de flambagem recomendada (Haste de acionamento de sistema hidráulico de aeronave)	$\rho/E^{1/2}$
Mola, peso mínimo para um dado armazenamento de energia (Molas de retorno em aplicações espaciais)	$E\rho/\sigma_y^2$
Dobradiça simples, distorção máxima, flexão sem falha (Dobradiças baratas)	E/σ_y

(ρ = densidade; E = módulo de Young; σ_y = limite elástico)

Existem softwares que permitem a seleção de materiais que atendam às restrições técnicas. O resultado de um desses sistemas é mostrado no Gráfico 7A.4. Nesse diagrama, os eixos são a tensão de escoamento σ_y e a densidade ρ ; cada bolha pequena descreve um material. A linha diagonal isola materiais com baixos valores de ρ/σ_y , o ponto de partida para escolher materiais para o raio. A esses requisitos podem ser adicionados outros, como resistência à corrosão, resistência a impacto, rigidez, e assim por diante, o que afunila a escolha. Ainda há mais uma etapa necessária: alguns dos candidatos no Gráfico 7A.4 são mais caros do que outros. Como o peso pode ser contrabalançado em contrapartida ao custo?

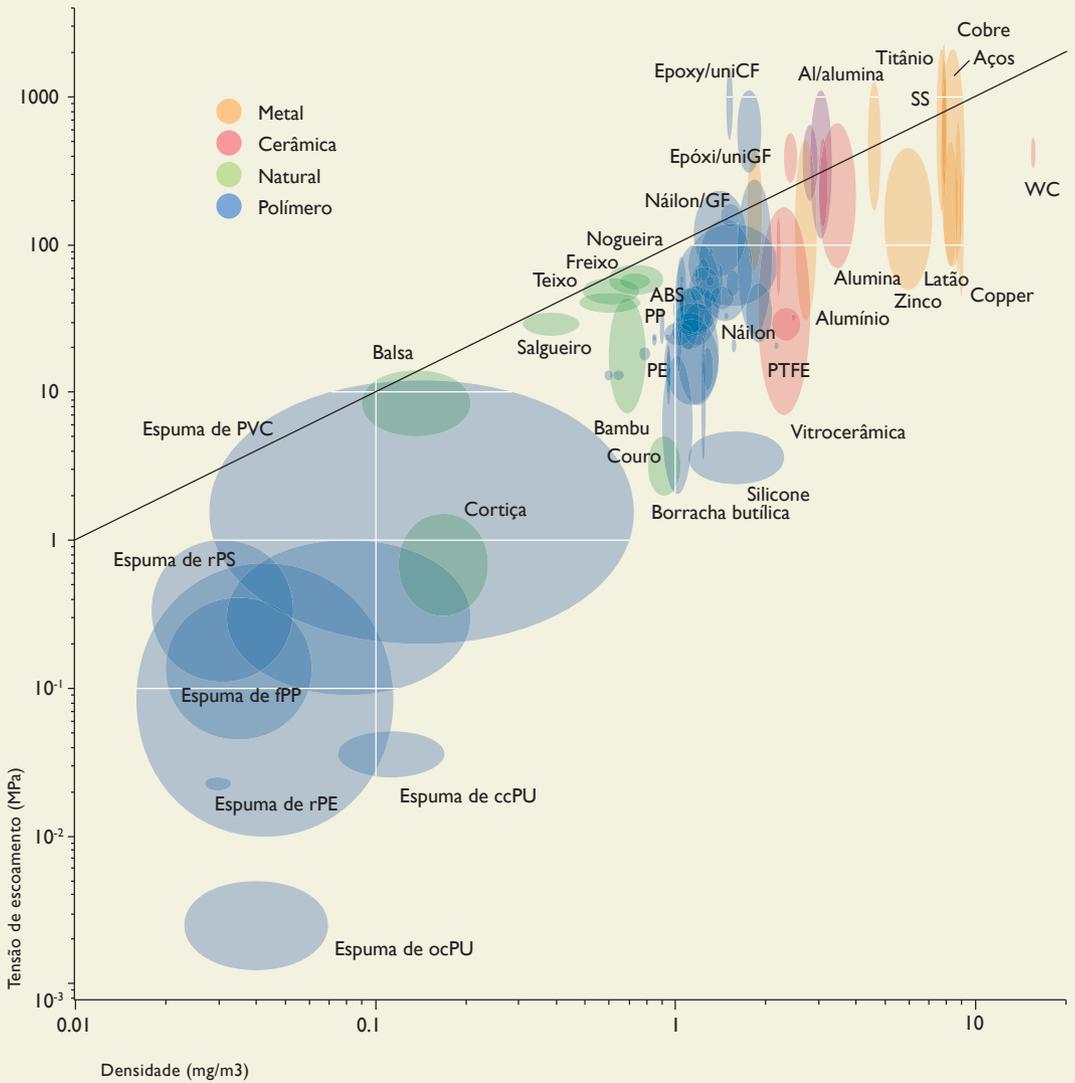


Gráfico 7A.4 – Seleção otimizada

Um diagrama tensão de escoamento-densidade. Materiais com baixos valores de ρ/σ_y encontram-se acima da linha diagonal, na parte superior esquerda (CES Edu, 2009).

Otimização multiobjetivos

É possível obter maior discriminação com diagramas de *trade-off* dos quais o Gráfico 7A.5 é um exemplo simples. Aqui o grupo de material ρ/σ_y é representado no eixo vertical e o custo/kg do material no eixo horizontal. O diagrama permite a comparação de materiais com base no desempenho e no custo. Os candidatos mais atraentes encontram-se perto ou sobre a superfície *trade-off* (linha cheia); esses materiais oferecem baixa massa e baixo custo. O diagrama mostra que aços-carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis são todas boas escolhas. Polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) oferecem massa mais baixa do que esses aços, mas configuram um aumento considerável no custo do material. Ligas de titânio também são mais caras e têm maior massa — não são uma boa escolha.

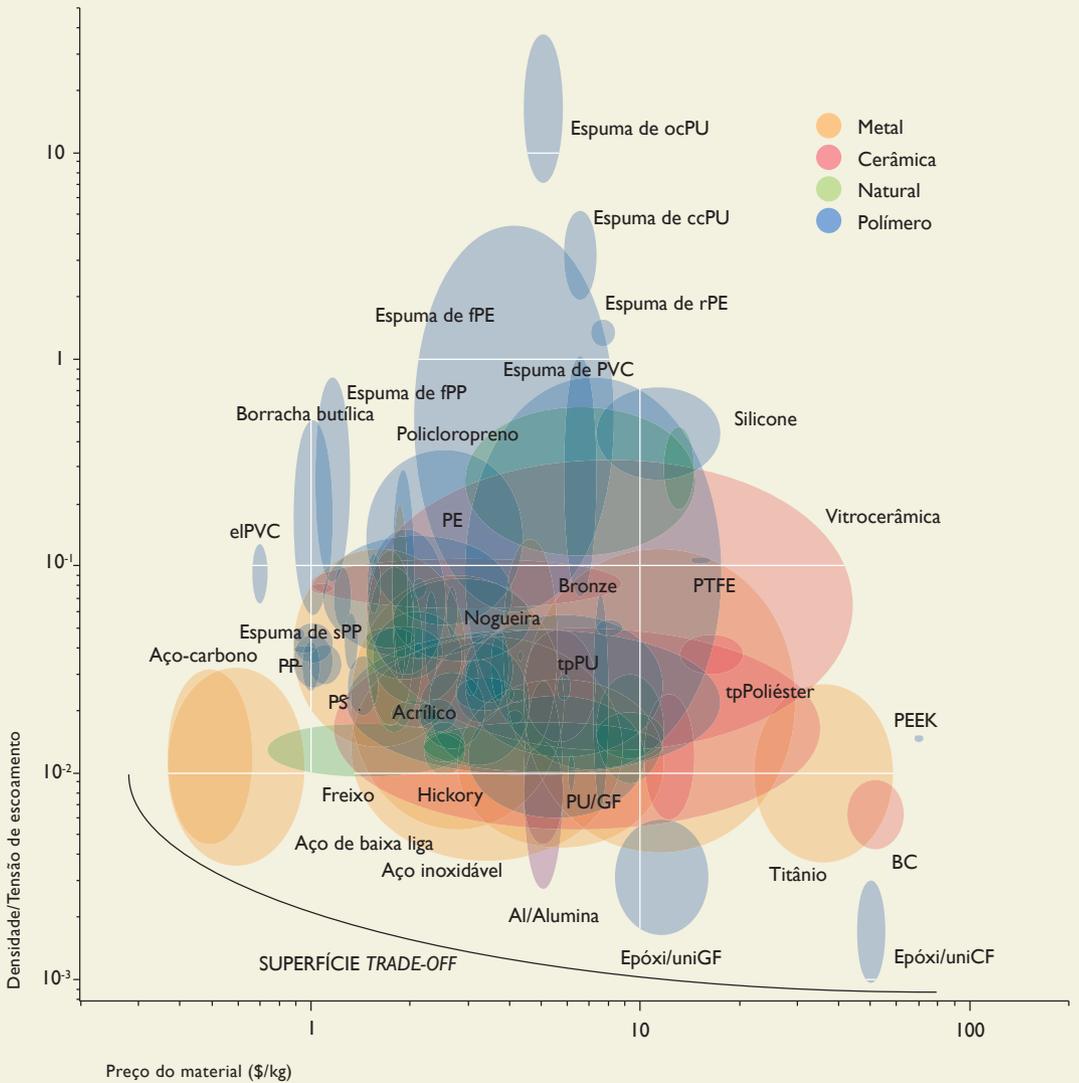


Gráfico 7A.5 – Análise trade-off

Aqui, procura-se um compromisso entre minimizar peso e custo. Os materiais que se encontram próximos ou sobre a superfície trade-off são os candidatos; a decisão final depende do valor de cada atributo (CES Edu, 2009).

Capítulo 8

Estudos de caso em materiais e design de produto



Os capítulos anteriores exploraram os atributos de materiais e processos e os modos como essas informações podem ser classificadas e recuperadas. Aqui, passamos da exploração para o exemplo: como essas informações são usadas? Os estudos de caso desenvolvidos neste capítulo são propositalmente breves. A intenção é ilustrar cada um dos métodos gerais de seleção: análise, síntese, similaridade e inspiração.

A estrutura

Cada desafio de seleção de material tem suas próprias características especiais — é, de certo modo, único. Portanto, não existe nenhuma prescrição única sobre como enfrentá-lo; não obstante, é útil ter alguma estrutura. A estrutura segue a apresentada no Capítulo 7: o ponto de partida são as diretrizes básicas do projeto; o ponto final, uma especificação do produto. Entre esses dois estão as etapas de *identificação, seleção e implicações*.

Identificação

O primeiro requisito na seleção de materiais é um amplo entendimento do contexto. O que o produto ou o

componente faz? De que sistema faz parte? Em qual ambiente funcionará? Quais forças deve suportar? Quais são as ideias preconcebidas e as expectativas do consumidor? As respostas a essas perguntas estabelecem o cenário no qual uma solução deve ser procurada. A primeira prioridade é identificar os requisitos de projeto. Alguns podem ser expressos explicitamente. Restrições, é bom lembrar, são condições que devem ser obedecidas: técnicas, ambientais, estéticas. Objetivos são uma declaração do que deve ser maximizado ou minimizado: minimizar custo é um objetivo; minimizar massa é outro; maximizar segurança poderia ser um terceiro. Muitos requisitos não podem ser expressos desse modo; em

vez disso são descritos como características, intenções ou percepções. A natureza desses insumos orienta a escolha do método de seleção.

Seleção de material

Quando os objetivos e restrições podem ser expressos como limites bem-definidos para as propriedades de um material ou como índices de desempenho de materiais, é possível fazer seleção sistemática por análise. Quando as restrições são qualitativas, as soluções são sintetizadas pelo estudo de outros produtos com características semelhantes e identificação dos materiais e processos usados para fabricá-los. Quando se procura alternativas para um material existente e pouco mais se sabe, o método da similaridade — pesquisar materiais com atributos que correspondem aos do material visado — é um modo de seguir adiante. Além do mais, muitas boas ideias surgem em buscas aleatórias. Combinar os métodos nos dá mais informações, percepções mais claras e maior confiança nas soluções.

Implicações

Agora temos um conjunto de possibilidades selecionadas. A próxima etapa é investigar os aspectos mais íntimos do caráter desses possíveis materiais; procurar detalhes sobre os melhores métodos para conformá-los, uni-los e dar acabamento a suas superfícies; determinar quais seriam os custos prováveis; quanto durariam e como reagiriam a determinados ambientes. Até que ponto a lista de possíveis soluções cumpre as diretrizes básicas originais do projeto? A utilização desses materiais traz outras implicações — impacto ambiental,

talvez, ou a necessidade da introdução de um novo processo de fabricação?

Os estudos de caso seguem esse padrão geral. Omitem muitos detalhes e visam simplesmente a mostrar como os métodos podem ser combinados e como se reforçam mutuamente (como o diagrama de bolhas da Figura 7.7), às vezes extraindo mais de um, às vezes extraindo mais de outro, mas mesclando-se de modo a conseguir mais do que seria possível com qualquer um deles isoladamente.

Móveis de escritório

Um fabricante de móveis de escritório com estrutura de aço deseja lançar uma nova linha de mesas mais leves e mais fáceis de movimentar. Uma mesa de escritório, projetada para produção em massa, tem uma estrutura que suporta uma superfície de trabalho. Deve ser leve e barata, porém, precisa suportar com segurança cargas de trabalho normais — e isso inclui a carga de uma pessoa grande sentada na mesa — sem sofrer falha ou flexão significativa (Figura 8.1). O projeto atual tem uma estrutura de tubos de aço doce de seção transversal quadrada, soldada nas junções. O cliente acredita que há potencial para usar extrusões de um metal mais leve. Isso levanta questões sobre material, junção e formas quanto à rigidez com baixo peso e facilidade de montagem. É um problema que se presta tanto à análise quanto à síntese; combinar as duas nos dará percepções ainda melhores.

Seleção de material — análise

Para fabricar uma estrutura leve e rígida para suportar cargas em flexão

(como ocorre com essa estrutura) o melhor é um material que tenha um baixo valor de $\rho/E^{1/2}$ (veja a Tabela 7A.3 de índices de desempenho de materiais) onde ρ é a densidade do material e E é seu módulo de elasticidade. Esse grupo de propriedades caracteriza o peso da estrutura. O custo, obviamente, é uma consideração. O índice de desempenho do material $\rho/E^{1/2}$ é representado em relação ao preço/kg de material na Figura 8.2, no qual também foi traçada uma linha que determina uma superfície *trade-off*. Materiais que se encontram sobre essa superfície ou próximos a ela oferecem a melhor combinação de baixo peso e baixo custo. O material usado atualmente — aço-carbono — está marcado. Tem baixo custo, mas também é relativamente pesado. Ligas de alumínio, de fácil extrusão sob a forma de tubos de seção transversal quadrada, são mais caras, porém, consideravelmente mais leves. Ligas de magnésio permitem uma redução de peso ainda maior, mas há um considerável aumento de preço. Ainda mais leves são os GFRP e, em particular, o CFRP — mas o CFRP é caro.

Seleção de material — síntese

O que podemos aprender com a síntese (Figura 8.3)? Aqui a intenção é um projeto de baixo peso. Onde mais encontrar estruturas vazadas de baixo peso? Hoje, os fabricantes de veículos se esforçam para reduzir o peso e alcançam esse objetivo montando o veículo sobre uma estrutura vazada, rígida e leve. O projeto de equipamentos de alpinismo tem como uma de suas prioridades primárias o baixo peso: mochilas, tendas, equipamentos para escalar montanhas e equipamen-

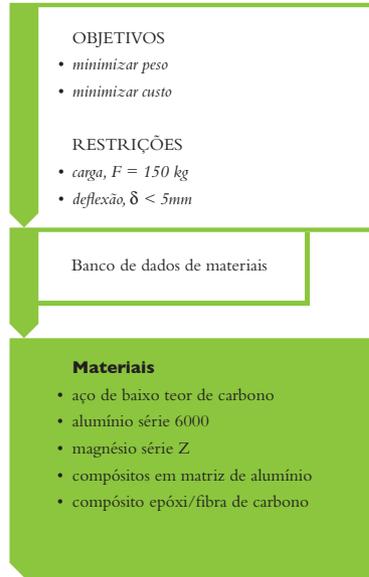


Figura 8.1 - Seleção por análise

Para móveis de escritório, a seleção por análise requer a otimização de um conjunto de objetivos dado um conjunto de restrições.

tos de socorro, todos têm estruturas leves, que no caso buscam resistência, em vez de rigidez. Além do alpinismo, o peso é um fator significativo em outros esportes: o projeto de estruturas de bicicletas e calçados para andar na neve é guiado pela minimização da massa.

Um levantamento de materiais e processos usados nesses produtos pode sugerir opções para a escrivinha. A Audi e a Lotus usam alumínio extrudado série 6000, soldado ou unido com adesivos e rebitado, para criar estruturas vazadas leves para seus carros. Mochilas e calçados para andar na neve também usam tubos de alumínio série 6000 curvados, soldados, com acabamento de revestimento com pintura a pó. Quadros de bicicletas já foram feitos de muitos materiais diferentes; vários modelos leves usam tubos feitos de alumínio séries 6000/7000 ou de compósitos em matriz de alumínio. Mochilas e bicicletas de alto desempenho são feitas de poliéster ou epóxi reforçado com fibra

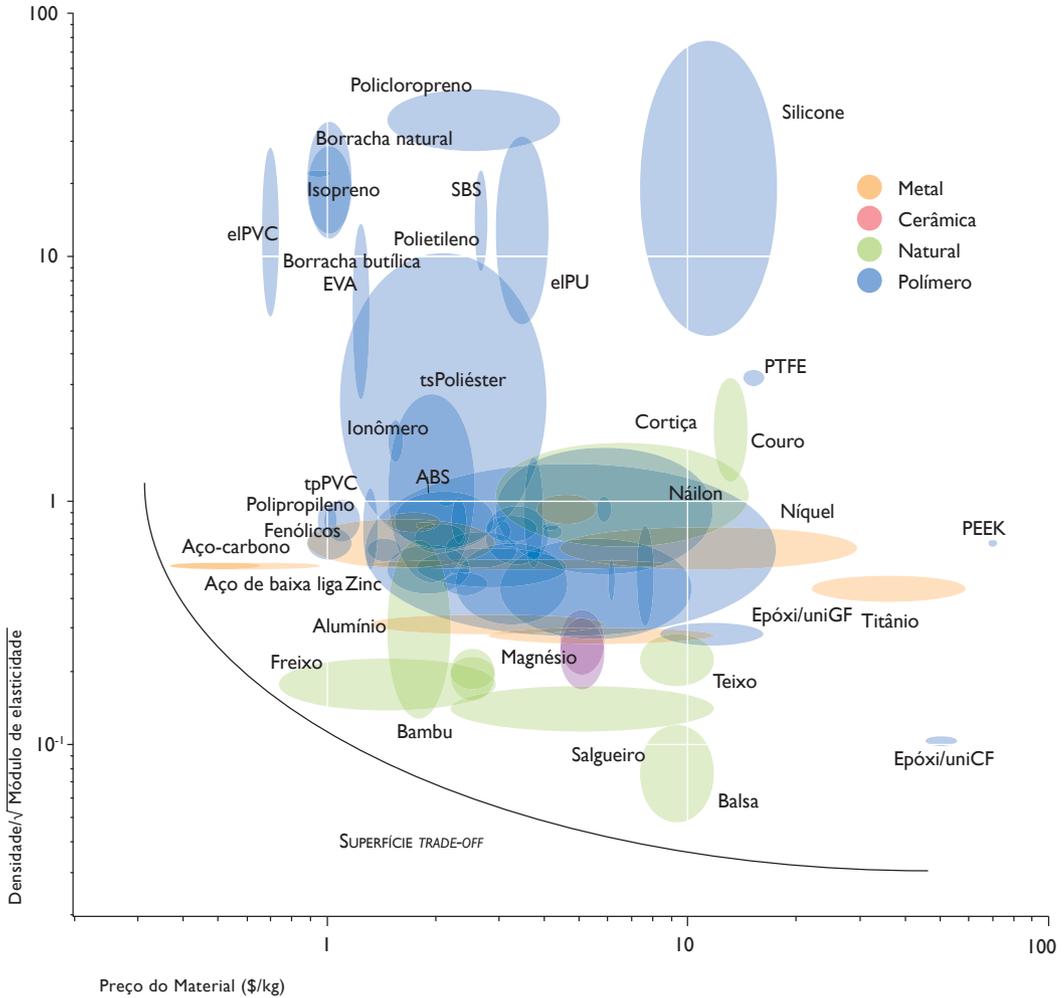


Figura 8.2 - Trade-off
 Obtendo uma solução de compromisso entre baixo peso e baixo custo (CES Edu, 2009).

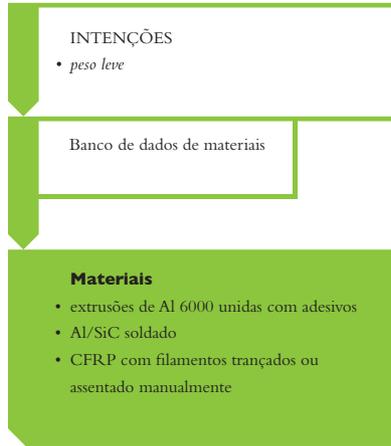
de carbono, ou sob a forma de tubos (mas isso é ineficiente) ou sob a forma de casca ou concha, normalmente produzida por laminação manual de camadas de tecidos pré-impregnados (*prepregs*). Nenhum usa magnésio.

Os três primeiros são produtos fabricados em massa que dominam uma porção substancial do mercado; promovem a confiança de que o alumínio série 6000 não apresentaria nenhuma surpresa desagradável e

aponta modos de união (soldagem e adesivos) e acabamento (revestimento pulverizado). Essa seria a escolha segura — algo já utilizado em outros projetos semelhantes. A pequena economia adicional de peso oferecida pelos compósitos em matriz de alumínio não justifica seu custo.

Mas será que haveria uma solução mais radical? Bicicletas de CFRP usam métodos de laminação de compósitos para criar formas

elegantes, com duas curvas; existem cadeiras que têm essas mesmas características. Uma escrivaninha de elevado nível tecnológico poderia ser fabricada de modo semelhante (Figura 8.4), com pontos de ligação para gavetas e outros elementos de fixação obtidos por moldagem, como ocorre com a bicicleta. Esse nível de sofisticação pode não se justificar aqui. Mas a leveza e a rigidez de compósitos em matriz de polímero é uma atração. Pultrusão é um modo de custo relativamente baixo para fabricar seções ocas de alta rigidez com compósitos. Essas seções podem ser unidas por adesivos usando nódulos de alumínio fundido nas quinas, uma técnica utilizada em algumas bicicletas de CFRP, para formar a estrutura. Aqui, há potencial



8.3 - Seleção por síntese

Aqui, buscamos produtos que contêm estruturas vazadas leves, procurando o material e seu processo de fabricação.

para grandes economias de peso, aliadas à aparência visual nova (pultrusões de CFRP negro com conexões de alumínio polido) que poderiam ser manipuladas para dar percepções de engenharia de precisão avançada.



Figura 8.4 - Mobiliário de escritório móvel

Uma mesa leve pode ser conformada com compósitos de epóxi/fibra de carbono.

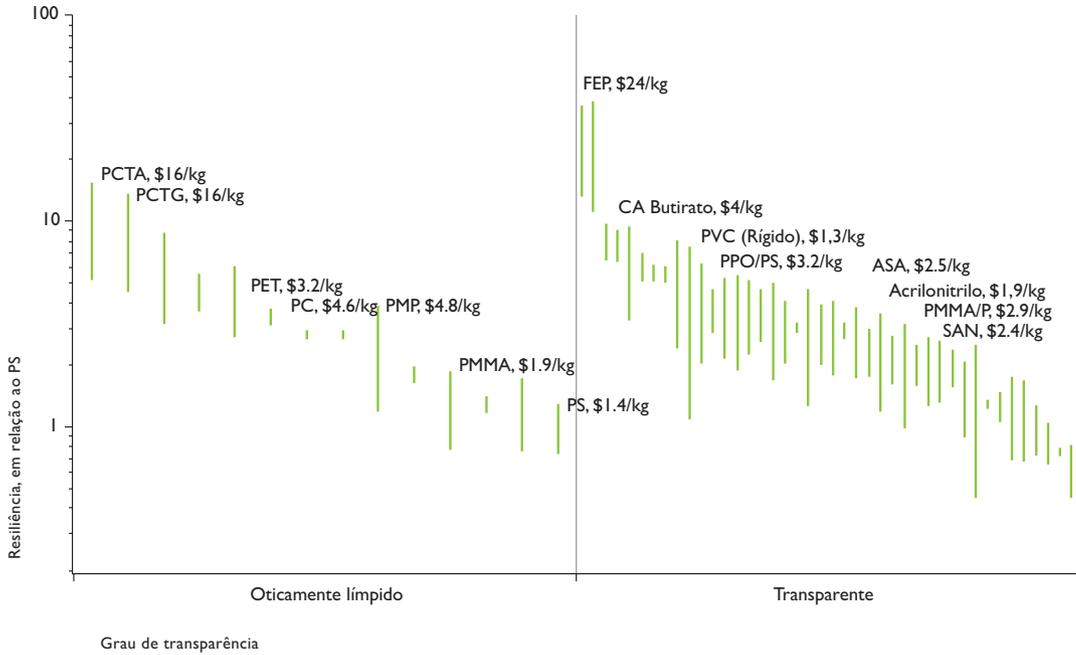


Figura 8.5 - Resiliência e transparência

Aqui, a resistência de materiais à fratura quando curvados é representada em gráfico em relação à do poliestireno, PS. Todos os materiais mostrados neste diagrama podem ser moldados por injeção e são oticamente límpidos ou transparentes (CES Edu, 2009).

Caixas de CD

Há muitos produtos do dia a dia que aceitamos sem pensar. Eles funcionam razoavelmente bem, são fáceis de usar e não custam praticamente nada — lembre-se dos copos descartáveis, pastas de documentos e cliques. Como os aceitamos sem pensar, não os valorizamos — e, até certo ponto, essa falta de valor é transferida para sua função ou conteúdo. E, se por alguma razão eles *não* funcionam bem, tornam-se motivo de grande irritação. As caixas de CD são um exemplo.

A maioria dos CDs de música são comercializados no estojo padrão do tipo caixa de “joia”. Caixas de joias racham com facilidade, e quando racham ficam com uma aparência horrível e não fecham adequadamente. A caixa padrão é feita de poliestireno, aparentemente escolhido por seu bai-

xo custo e por ser transparente como água. O desafio é fazer uma caixa que não rache e tenha — se possível — a mesma transparência.

Seleção de material — análise

Um material racha quando a força a ele aplicada provoca a propagação repentina de pequenas imperfeições (sempre presentes). Mudanças abruptas de seção e projeções finas (como nas dobradiças de uma caixa de CD) concentram tensão e pioram as coisas. A resistência à falha por rachadura de uma dobradiça é medida de mais de um modo. Aqui, a medida que precisamos é a *resiliência* — que mede o quanto um material pode ser curvado antes de quebrar.¹ A Figura 8.5 mostra essa medida normalizada pelo material usado agora — poliestireno, PS —, o que significa que o valor do PS na escala é 1; então, a escala mostra

1. Os detalhes dessa análise podem ser encontrados no apêndice do Capítulo 4 e em Ashby (2005); a propriedade usada aqui para a resiliência é K_{IC}/E , onde K_{IC} é a tenacidade à fratura e E é o módulo de elasticidade.

quanto os outros candidatos são melhores ou piores do que ele. Cada barra descreve um material, identificado por seu nome e custo aproximado. Todos obedecem às restrições impostas: são óticamente límpidos ou transparentes, e podem ser moldados por injeção. Os que têm preços abaixo de \$4/kg (três vezes o do PS) são apresentados em ordem crescente de custo de **Materiais** na Figura 8.6.

Essa análise destaca a atratividade, bem como a fraqueza do PS usado atualmente: é óticamente límpido, pode ser moldado e é barato, mas também é o menos resiliente de todos os polímeros límpidos. Vários materiais oferecem maior resistência à rachadura, embora — exceto o PET e o PC — à custa de certa perda de limpidez ótica. Entre esses, o PET parece ser uma boa solução, já que oferece uma resistência à rachadura três vezes maior, com um modesto aumento no preço. Entre os polímeros transparentes (menos límpidos), o SAN também é barato (e às vezes é usado para caixas de CD), mas ele também é relativamente frágil. O PVC é uma



Figura 8.6 - Seleção por análise

Para uma caixa de CD, as restrições em análise são a resiliência e a transparência.

possibilidade interessante: é barato, tem alta resiliência e poderia permitir um projeto com uma “dobradiça incorporada” ou junta integral, que substituiria a incômoda junta de pino da caixa de joias. Sua falta de limpidez significa que o rótulo do CD terá de ser impresso ou colado com adesivo do lado de fora da caixa ou então a caixa tem de ser projetada de modo a não encobrir o rótulo do próprio CD. A solução proposta: um projeto com dobradiça integrada em PVC e recortes para expor o lado impresso do CD,



Figura 8.7 - Uma caixa de CD

Esta caixa (talvez de PVC) tem um design aberto, que permite uma linha de visão ao rótulo do CD. O fecho tem uma dobradiça tipo “borboleta”, que oferece uma solução adequada para aberturas e fechamentos e permite moldagem em uma única peça.

e rótulos aplicados com adesivos, se necessário (Figura 8.7).

Pode-se buscar inspiração de outros modos, o que provocaria outras linhas de pensamento. Críticos de produtos em revistas de design usam palavras como “interessante”, “afinado com tendências modernas”, “futurista”, quando acham que o produto que estão criticando as justifica. Que tal uma caixa de CD que evoque essas percepções? Uma pesquisa em edições recentes de revistas de design (como a ID), revela produtos aos quais essas palavras foram aplicadas e identifica os materiais usados para fabricá-los: bolsas — polipropileno translúcido em cores iridescentes; iluminação — policarbonato opalescente translúcido (bem caro para uma caixa de CD); móveis — folhas de alumínio batido unidas por rebites (um pouco demais para um CD); mochilas — tecido de náilon reforçado com tubulação de polímero (mas muito molenga para proteger um CD). À primeira vista, nenhum deles é bastante promissor. Mas vamos com calma — há ideias aqui. Alguns graus de polipropileno são quase transparentes, certamente translúcidos, podem ser coloridos e são fáceis de moldar — essas qualidades das bolsas poderiam ser capturadas aqui. Também o acrílico (PMMA) pode ser colorido, moldado e metalizado — a aparência metálica e robusta do alumínio rebitado poderia ser simulada desse modo (como é o caso em muitas máquinas fotográficas pequenas). A atratividade do tecido de náilon está em sua textura — que também poderia ser simulada por impressão. Pesquisas aleatórias como essas soltam a imaginação e permitem saltos de conceito que não seriam possíveis apenas com análise.

Arcos de violino

Quando um material consagrado que é bem adequado para sua função não pode mais ser usado surge a necessidade de um substituto. Isso poderia acontecer porque o material usado até então ficou muito caro; ou porque sua disponibilidade está, por alguma razão, restrita; ou porque é prejudicial para o meio ambiente; ou porque estava sendo explorado a uma taxa insustentável. Qualquer uma dessas razões pode desautorizar seu uso, eliminando, assim, uma aplicação de material que, não fosse isso, é quase perfeita. O estudo de caso a seguir é um exemplo.²

Arcos de violino (Figura 8.8) são, por longa tradição, feitos de uma única espécie de madeira tropical dura: pau-brasil. Mas o crescimento do pau-brasil é lento e seu hábitat é limitado. Violinos, que precisam de arcos, são fabricados em grandes quantidades. O resultado é que o pau-brasil é explorado excessivamente, o que o expõe ao perigo real de extinção em termos comerciais.³ Há uma alternativa?

Seleção de material — similaridade

Os princípios físicos subjacentes a certos usos de materiais podem ser difíceis de revelar, e esse é um deles. O arco executa várias funções. Age como mola, mantendo a crina sob tensão, portanto, a rigidez é importante; na busca por um substituto temos de igualar essa rigidez, o que exige um material cujo módulo de flexão está na faixa de 9,5–11,6 GPa. A massa do arco também é importante: as menores forças aplicadas sobre o violino são obtidas com a utilização do peso próprio do arco. Assim, procuramos equiparar

2. Wégst, U. G. K. (1996), *Tese de Doutorado, Engineering Department, Cambridge University, Cambridge, Reino Unido.*

3. *Uma situação difícil semelhante ameaça a utilização do mogno de Honduras em guitarras elétricas.*

a madeira pau-brasil a um material de densidade semelhante: aproximadamente 900 kg/m^3 . Há outras restrições: obviamente a resistência é uma delas; arcos quebram, é claro, mas parece que o pau-brasil lida com isso adequadamente. E também poderíamos prever que o amortecimento mecânico (medido pelo coeficiente de perda) poderia ser importante: um arco de baixa perda pode permitir técnicas de arco mais nítidas, mas, é claro, as frequências naturais são provocadas mais facilmente em uma estrutura de baixo amortecimento. A resposta é tentar igualar o amortecimento do pau-brasil. O quadro de insumos na Figura 8.9 resume a combinação exigida.

Aqui, a estratégia é simples: procurar materiais cujos valores para essas quatro propriedades críticas se encontrem dentro das faixas dadas e então examiná-los, procurando os que não estão ameaçados de extinção. Os resultados, facilmente encontrados por meio de uma busca em manuais de madeira⁴ ou com softwares de seleção⁵ existentes, são apresentados no painel de resultados na Figura 8.9. O interessante é que todos são madeiras; nenhuma outra classe de material oferece essa combinação de atributos.

Mas talvez estejamos sendo muito apressados. Na realidade, não sabemos se é a densidade, o módulo de elasticidade, a resistência e o coeficiente de perda que determinam o

desempenho do arco; tudo o que realmente sabemos é que o arco desempenha uma função mecânica. Vale a pena tentar uma combinação menos restrita, que use todas as propriedades mecânicas sob a forma de um mapa MDS (Figura 4.5). A busca de um substituto para o material do arco por proximidade nesse mapa chega — como esperado — a outras madeiras; mas também sugere que polímeros reforçados com fibra de carbono ou de vidro (tal como um composto por moldagem por injeção ou compressão) são, de um modo geral, similares.

Portanto, há alternativas, todas amplamente disponíveis e facilmente sustentáveis. Ocorre que tudo já foi tentado uma vez ou outra. Porém, apesar dessa boa combinação, a esmagadora preferência continua sendo o pau-brasil. Por quê?

Algumas perguntas óbvias permanecem sem resposta. Como as madeiras alternativas reagiriam à flexão a quente? Como conservariam a sua curvatura? É fácil trabalhar com elas? O seu crescimento seria regular? Qual seria o desempenho de um arco de BMC? Para descobrir isso é preciso fazer arcos experimentais com esses materiais candidatos e testá-los — o que, como dissemos, já foi feito com aparente sucesso. Então, por que há resistência em relação aos substitutos?

Materiais para instrumentos musicais são escolhidos não somente pelo

4. *Manuais como o Handbook of Wood and Woodbased Materials do US Forest Product Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture tabulam propriedades de madeiras (Hemisphere Publishing Corp, Nova York, 1989).*

5. *CES Edu, 2009, Granta Design, Cambridge (www.grantadesign.com).*

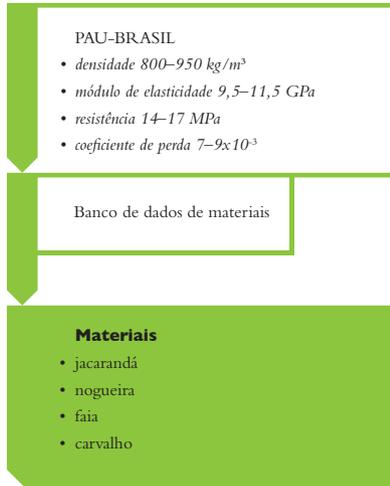


Figura 8.8 - Um arco de violino

Arcos são tradicionalmente feitos de madeira pau-brasil com pouca variação na configuração.

Figura 8.9 - Seleção por similaridade

Para o violino, há um número bem pequeno de materiais sintéticos que têm perfis de atributos que combinem com a madeira pau-brasil.



comportamento mecânico e acústico, mas também por razões de tradição e estética; uma madeira cuja cor ou textura não é familiar é “errada” exclusivamente por essas razões. Portanto, voltamos aos atributos de percepção. Percepções influenciam a escolha e, em particular, em um mercado de tão forte tradição como o de fabricação de violinos. O único modo de ir em frente é a persuasão — talvez obtida induzindo os grandes artistas a usar e recomendar o novo arco, incentivando outros a percebê-lo sob uma nova ótica, mais desejável.

Machado de gelo

Equipamentos de alpinismo atendem dois mercados primários — alpinismo industrial (a indústria da construção) e alpinismo de recreação (montanhas, rochas, geleiras). O equipamento é especializado: cordas, arreios, *carabiners*, parafusos de rocha, mochilas, tendas — e machado de gelo. Vamos focar o machado de gelo

para escaladas de recreação. Machados de gelo datam da época em que o alpinismo se tornou uma recreação — cerca de 1870 —, uma evolução das ferramentas usadas pelos camponeses alpinos. Os primeiros machados tinham cabeças de ferro e cabos de nogueira, freixo ou bambu. Os modernos têm cabeças de aço de baixa liga (Cr-Mo) e cabos de alumínio com o local da pega revestido de polímero. Essa combinação funciona, mas há alternativas? Poderíamos aprender algo com outros produtos que poderia resultar em um machado melhor?

Seleção de material — síntese

Os requisitos para a cabeça do machado são a resistência à abrasão, ao desgaste e à fragilidade quando frio, e a capacidade de receber polimento de alto brilho e um logo do fabricante discretamente texturizado. Os requisitos para o cabo são resistência, baixo peso, baixa condutividade térmica e boa pega. Aqui, procuramos ideias extraídas de outros produtos que obedecem a restrições semelhantes, ainda que a aplicação possa ser bem diferente; em particular os que são projetados para uso em baixas temperaturas: patins de hóquei no gelo, lâminas de patins para patinação artística, anzóis, *crampons*, botas de alpinista e óculos de sol. Os patins para hóquei no gelo têm uma lâmina de aço inoxidável moldada em um solado de compósito de náilon/fibra de vidro. A lâmina dos patins de patinação artística e os anzóis são ambos feitos de aço de alto teor de carbono endurecido por deformação (forjamento para o anzol, ou estampagem para a lâmina) e subsequente tratamento a quente. O *crampon* é feito de aço de baixa liga estampado e curvado.

O arreo que prende o *crampion* à bota de alpinismo é feito de um tecido revestido com poliuretano. Os óculos são de policarbonato moldado por injeção com um revestimento semelhante a diamante para proteger as lentes contra abrasão. A seleção por síntese prossegue com a escolha de elementos entre esses que tenham possibilidades no projeto de um machado de gelo, combinando-os para dar uma especificação final do produto (Figura 8.10).

A temperatura de transição de dúctil para frágil do aço-carbono pode estar acima de -30°C ; é adequada para anzóis e patins de patinação artística que raramente enfrentam frio abaixo de -4°C , mas é arriscada para um machado de gelo que poderia ser usado em temperaturas muito mais baixas. Ambos, aços inoxidáveis e aços de baixa liga, cumprem o requisito de rigidez; dos dois, o aço de baixa liga é o mais forte. Não é o caso de mudar o material da cabeça, como a farpa do anzol ou os dentes dos patins, que poderiam ser usadas para dar ao machado melhor poder de garra em neve densa. A extremidade picadora de um machado de gelo deve permanecer sempre afiada mesmo sob severa abrasão; aqui, um

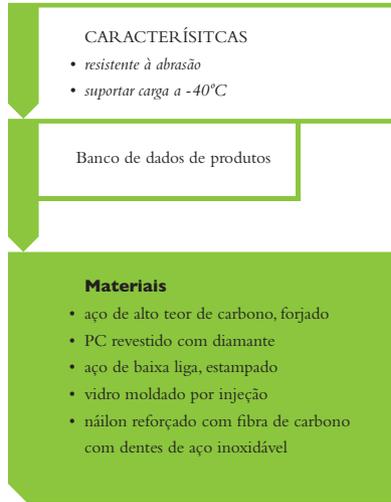


Figura 8.10 Seleção por síntese

Para machados de gelo, a síntese de produtos relacionados requer acesso a um banco de dados de produtos e materiais dos quais são feitos.

revestimento cerâmico ou de carbono semelhante a diamante como o dos óculos escuros poderia melhorar o desempenho. O cabo oferece maior escopo para inovação: a utilização de náilon reforçado com fibra de vidro oferece a possibilidade de menor peso e condutividade térmica muito mais baixa — uma consideração importante quando ele tiver de ser segurado na mão; e a adição de um revestimento de poliuretano macio poderia ajudar a garantir que ele permaneça livre de neve congelada e seja confortável de segurar. Um exemplo de projeto é mostrado na Figura 8.11.

Figura 8.11 - Um machado de gelo

Náilon reforçado com fibra de vidro forma o cabo, o picador tem um revestimento de diamante amorfo para maior resistência ao desgaste e também aço levemente farpado (talvez com dentes de carboneto de tungstênio).

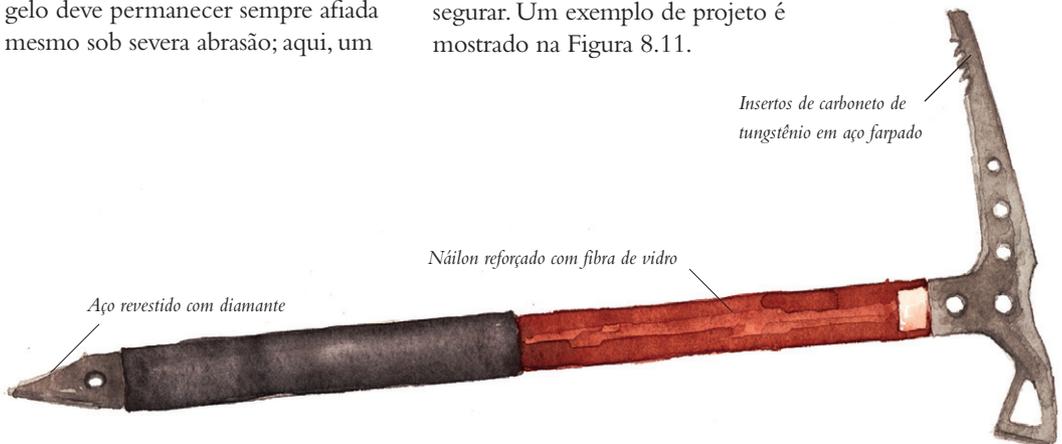


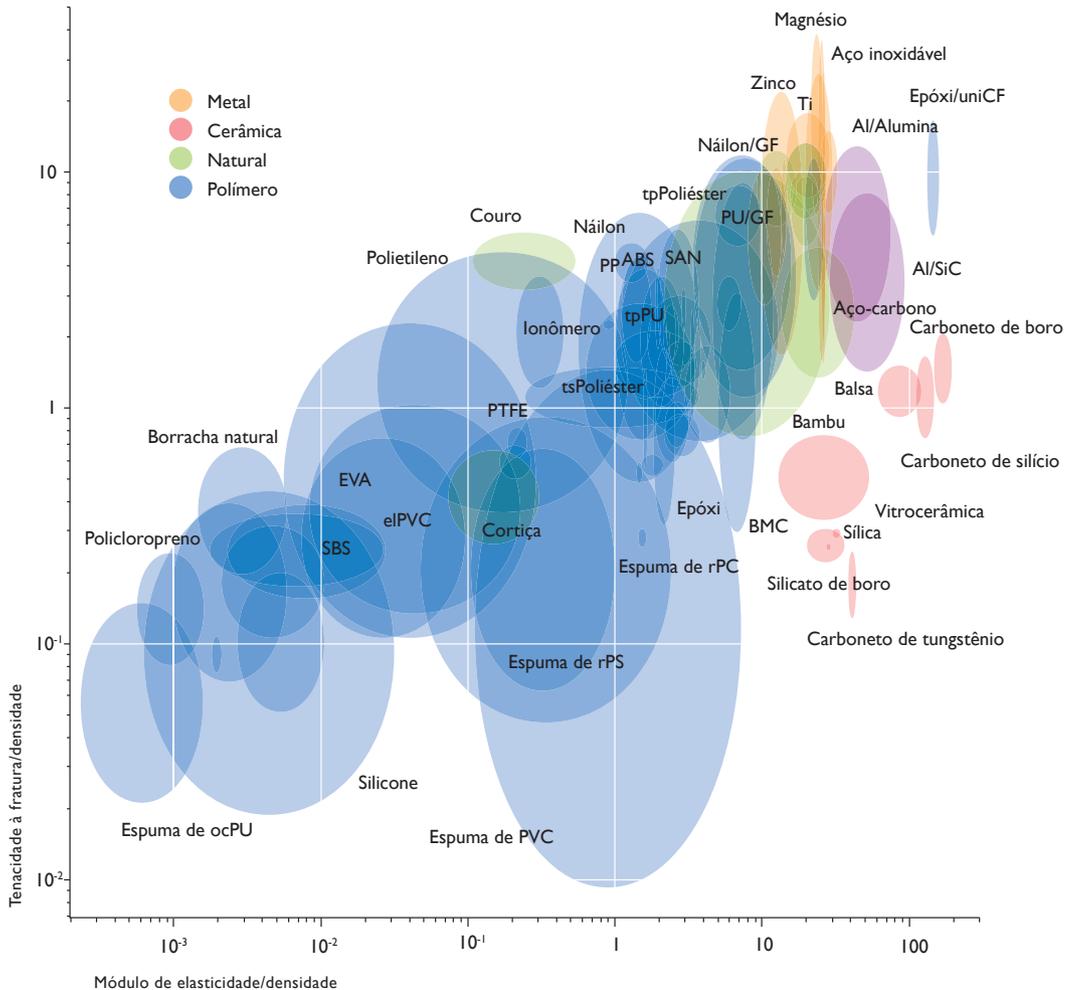
Figura 8.12 - Resistência ao impacto e rigidez com baixo peso

Patins com rodas em linha equilibram as restrições de resistência ao impacto e rigidez — com baixo peso, e também com comportamento semelhante ao do náilon ou PE (CES Edu, 2009).

É claro que podemos levar isso adiante. Há muitas variantes de cada produto que descrevemos — alguns usam outros materiais, revestimentos e processos diferentes dos que indicamos aqui e com os quais poderíamos aprender muito mais. Mesmo uma breve pesquisa como essa é suficiente para demonstrar que o método tem potencial.

Patins em linha

Patins existem desde a década de 1880. Patins com rodas em linha (in-line) são muito mais recentes, comercializados pela primeira vez na década de 1980 pela empresa Rollerblade. O primeiro par de patins Rollerblade de sucesso comercial foi uma bota de hóquei no gelo com



rodas de poliuretano, com freio de borracha no calcanhar e estrutura externa em fibra de vidro. Desde então, os patins evoluíram e ficaram diferenciados, alguns com rodas robustas para patinação na “montanha”, outros com botas removíveis que permitem rápida conversão entre sapatos e patins com rodas em linha e alguns com elementos atraentes especificamente para mulheres ou crianças.

Seleção de material — similaridade

E agora o desafio: um pedido de projeto para uma bota de patins com rodas em linha que será usado para treinamento em esqui *cross country*. A bota deve ser rígida, porém flexível, leve e resistente a impacto. A rigidez é necessária para que ela possa ser acoplada à plataforma de rodas e proporcionar a segurança adequada para dar apoio ao tornozelo; a flexibilidade é necessária porque, quando usado para treinamento em *cross country*, o calcanhar sairá da plataforma de rodas e a bota será flexionada; e a leveza é exigida para limitar o peso que o atleta tem de carregar. A resistência ao impacto é importante para suportar colisões com objetos ou com o solo. O designer começa com a ideia preconcebida (baseada na experiência com botas de hóquei no gelo) de que o náilon ou o polietileno poderiam ser possíveis soluções para o material. O conjunto de possíveis soluções para o material é expandido por uma busca de materiais que cumpram atributos críticos dos dois materiais. A rigidez e a resistência ao impacto dependem das propriedades módulo de elasticidade do material e tenacidade à fratura;

se, além disso, quisermos que a bota seja leve, são os valores dessas unidades por peso que contam. Assim, procuramos combinar módulo de elasticidade/densidade e tenacidade à fratura/densidade (Figura 8.12).

Para igualar o desempenho do náilon e do polietileno, é importante que o designer selecione materiais que abranjam a faixa de cada atributo especificado. O patins com rodas em linha poderia ser composto por uma biqueira e um calcanhar feitos de SAN com uma conexão flexível entre eles feita de EVA. A bota tem de ser projetada de modo que possa ser acoplada à plataforma em um ponto (somente biqueira) ou em dois pontos (biqueira e calcanhar), para possibilitar o treinamento para esqui *cross country*, mas esse é um detalhe de projeto que não consideraremos aqui. O caminho da seleção de material para esse caso e um exemplo de projeto para os patins em linha são mostrados nas Figuras 8.13 e 8.14, respectivamente.

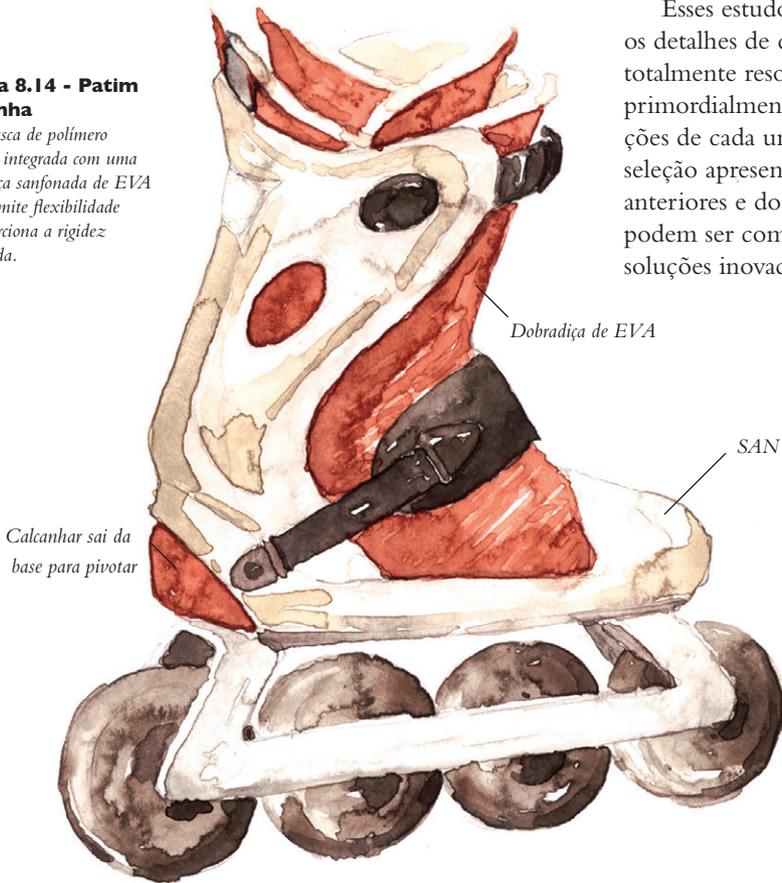


Figura 8.13 - Seleção por combinação de propriedades

Os materiais selecionados têm módulo de elasticidade/densidade e tenacidade à fratura/densidade que estão de acordo com as do (a) náilon e (b) polietileno.

Figura 8.14 - Patim em linha

Uma casca de polímero SAN é integrada com uma dobradiça sanfonada de EVA que permite flexibilidade e proporciona a rigidez adequada.



Conclusões

Esses estudos de caso são breves e os detalhes de cada projeto não estão totalmente resolvidos; eles servem primordialmente como demonstrações de cada um dos métodos de seleção apresentados em capítulos anteriores e do modo como eles podem ser combinados para sugerir soluções inovadoras para materiais.



Capítulo 9

Novos materiais: o potencial para inovação

Novos materiais muitas vezes são o ponto de partida para os designers — eles inspiram e podem ser manipulados para se obter produtos que nunca tinham parecido possíveis antes. É fácil inventar uma história para a ideia de “cerâmica de alta tecnologia” ou “alumínio da era espacial” ou “compósitos avançados” — a linguagem das novas tecnologias sempre parece despertar uma percepção de algo novo e de algo melhor. O que muitas vezes é esquecido é que materiais possuem não só um apelo técnico como também pessoal. E com frequência o desafio nesse setor industrial é lembrar do elemento humano e não focar apenas a tecnologia. Este capítulo examina as oportunidades que surgem da combinação de novos materiais e design.

“O mundo parece que espera um suprimento infundável de opções de novos materiais.” Essas foram as palavras de George Beylerian, da MaterialConnexion,¹ e ele sabe do que está falando — sua empresa ganha dinheiro divulgando informações sobre novos materiais. Dizer que o mundo inteiro está nesse estado de expectativa é discutível, mas os designers, certamente, sempre estão à espreita do que é novo. E o novo pode ser encontrado de várias formas diferentes:

- *Materiais em pesquisa* — polímeros eletroativos e emissores de luz; nanocompósitos, materiais autor-reparadores.
- *Materiais em início de comercialização* — metais amorfos; espumas metálicas; ligas de memória de forma.
- *Materiais em combinação* — polipropileno recheado com madeira, PP e fibras de carbono combinados, elastômeros ferromagnéticos.
- *Materiais em lugares inesperados* — titânio em armações de óculos, papel

e vidro como materiais estruturais, mobiliário de cimento, madeira como material estrutural em equipamentos eletrônicos (Figura 9.1).

Novos materiais têm sua gênese nos laboratórios de universidades, de governos e de indústrias. As tecnologias que eles desenvolvem são apresentadas aos poucos: aparecem primeiro em produtos de “demonstração” e então são absorvidas em mercados mais amplos. À medida que o volume de produção aumenta, o preço do

1. George Beylerian, MaterialConnexion, Nova York, NY. www.materialconnexion.com.



Figura 9.1 - Materiais em lugares inesperados
A utilização incomum de madeira de faia para os suportes manuais dessa máquina fotográfica de alto desempenho sugere qualidade de artesanato e uma atenção excepcional com a estética (imagem por cortesia de ALPA da Suíça).



Figura 9.2 - Um novo metal para a Vertu

As caixas desses telefones celulares (super finas e super fortes) são moldadas de metal amorfo (imagem por cortesia de LiquidMetal).

material cai, e sua familiaridade cada vez maior com designers e consumidores amplia a base de sua utilização. O material alcança progressivamente uma espécie de maturidade, mas pode reviver sua “novidade” por combinação com outros materiais, ou por novos meios de processamento para criar compósitos ou materiais híbridos — estruturas em sanduíche, sistemas blindados, estruturas gradeadas ou revestidas. A utilização de um material antigo em um novo cenário pode fazer com que ele pareça novo, o que reestimula o interesse em seu potencial.

Para um designer, um novo material oferece oportunidades e também riscos (Figura 9.1). Oportunidades derivam de novas ou aperfeiçoadas técnicas ou comportamentos estéticos que ele oferece. Os riscos — e eles podem ser grandes — encontram-se na caracterização incompleta e na falta de experiência de projeto ou de manufatura. Normalmente, as “difíceis” propriedades de dependência de tempo — relacionadas à integridade de longo prazo (resistência à corrosão, fadiga, fluidez e desgaste) — é que são as menos bem-documentadas e causam os maiores problemas. Não existe nenhum conjunto histórico de experiência de projetos a consultar, o resultado é que a confiança no novo material é baixa e investir nele parece

arriscado. Os canais de comunicação são imperfeitos, o que dificulta para os designers encontrar as informações que querem. E, no início de sua vida, um novo material é caro — é preciso pagar os custos de desenvolvimento — e a disponibilidade pode ser restrita.

Ainda assim, o interesse em novos materiais e processos continua alto porque a recompensa pelo sucesso pode ser grande. A adoção de polímeros reforçados com fibra de carbono, novos elastômeros, novas estruturas em sanduíche e — mais recentemente — a utilização de ligas de titânio e metais amorfos (Figura 9.2) provocaram uma espetacular melhora nos produtos esportivos. A tecnologia dos displays, uma vez transformada pelo desenvolvimento de polímeros de cristal líquido, está prestes a ser alterada novamente pelo desenvolvimento de películas de polímeros emissores de luz (*Light-Emitting Polymer Films* — LEPs). Cerâmicas e polímeros biocompatíveis possibilitaram avanços em produtos médicos que, quando bem-sucedidos, são muito lucrativos. A hidroconformação e o recorte de metais de acordo com um gabarito predefinido, ou a moldagem rotativa e o trançamento de compósitos com base de polímero permitem formas que são ao mesmo tempo eficientes quanto à utilização de material e esteticamente agradáveis. Processos de corte e soldagem a laser resultam em junções rápidas e sem rebarbas. Uma gama crescente de processos de prototipagem rápida permite que o designer concretize um conceito com agilidade e facilidade. E há, é claro, a excitação — o alvoroço — que um novo material ou processo pode gerar na mente do designer e na mente do consumidor.

A adoção de novos materiais

O sucesso de um novo material depende de sua capacidade de atrair uma sequência de *early adopters*. O simples retrato da adoção de materiais, representado pela linha cheia na Figura 9.3, é, na realidade, o envelope de um conjunto de curvas em S sobrepostas que descrevem uma sucessão de aplicações de volume cada vez maior. As primeiras aplicações são em mercados que dão alto valor ao desempenho e podem aceitar um grau de risco. As últimas, aplicações em maior volume, tendem a ter as características opostas.

Há várias forças de mercado em ação aqui. A aceitação do risco está associada a um equilíbrio entre o valor do desempenho e o custo da falha. A indústria nuclear valoriza o desempenho, mas percebe que o custo da falha é tão grande que às vezes ouvimos dizer que nenhum material novo jamais será usado dentro de um reator nuclear — o custo da qualificação desse material é simplesmente alto demais. No outro extremo, a indústria de equipamentos esportivos dá um valor tão alto ao desempenho que adota avidamente quaisquer novos materiais que percebe que podem oferecer o menor ganho que seja, ainda que não estejam perfeitamente caracterizados e, na realidade, talvez não possam oferecer nada de novo. Além disso, dentro de qualquer setor industrial há aplicações que são mais ou menos sensíveis ao risco. Assim, a introdução bem-sucedida de compósitos com matriz de polímeros na indústria aeroespacial ficou inicialmente confinada a componentes não críticos: somente em 2009 é que a incorporação de uma asa,

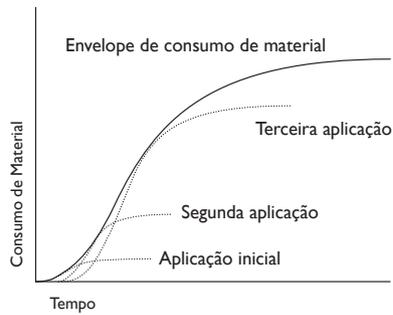


Figura 9.3 - Consumo de material ao longo do tempo

A entrada de um novo material no mercado requer uma oportunidade direcionada a desempenho e baixo volume, e que não é adversa ao risco.

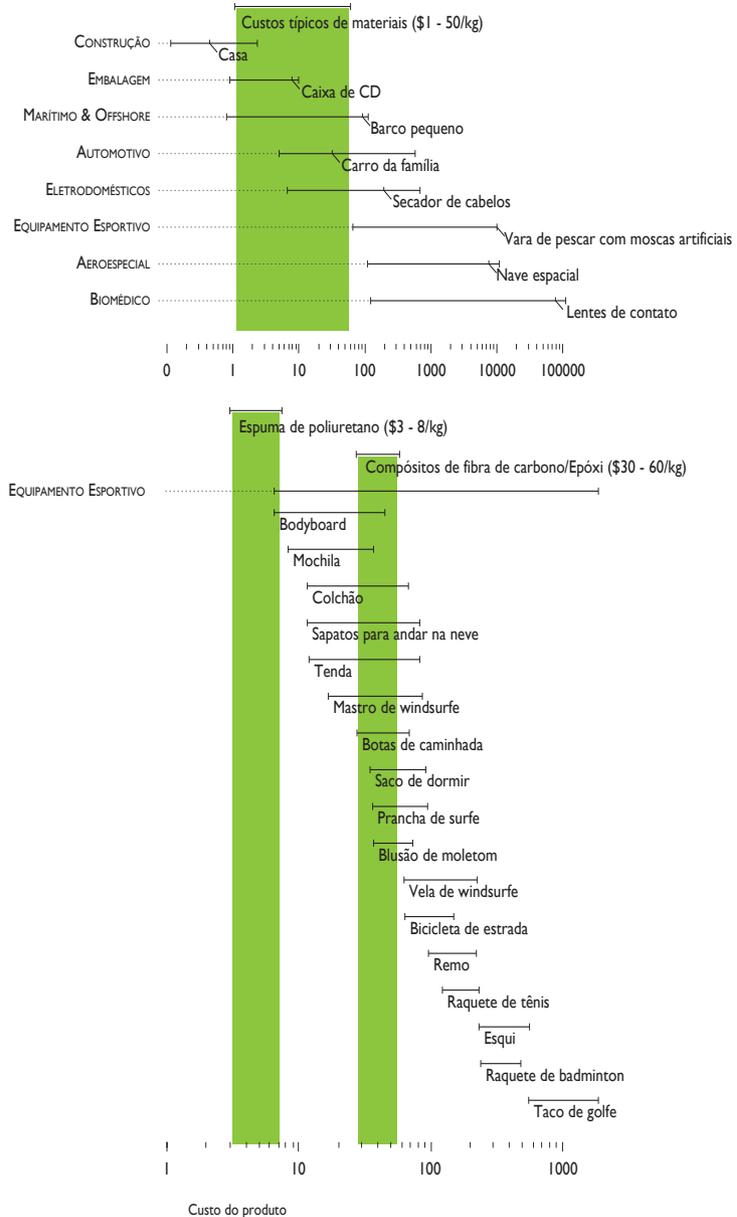
feita inteiramente de compósito, a um avião civil de grande porte tornou-se uma realidade. Na engenharia civil, a utilização de materiais avançados — como membranas para cobertura de edifícios em fibra de vidro revestida de PTFE — está limitada pelo custo, bem como pela incerta durabilidade de longo prazo em edifícios para os quais as dramáticas possibilidades espaciais que elas oferecem superam o risco de possível falha.²

Nesse ponto, é útil introduzir a ideia da *sensibilidade ao custo do material* (Figura 9.4). O custo de um *tee* de golfe é pouco mais de duas vezes o do material de que é feito; o valor agregado na fabricação é baixo. Se o custo do material dobrar, o custo do *tee* de golfe deve ter um aumento significativo; o produto é sensível ao custo do material. No outro extremo, o custo de um taco de golfe pode ser até 20 vezes o dos materiais de que é feito. Nesse caso, se os custos do material duplicarem, o custo do produto terá apenas um pequeno aumento; o valor agregado é alto e o produto não é sensível ao custo do material. Novos materiais são adotados mais imediatamente em setores industriais que são insensíveis ao custo do material: eletrodomésticos e automóveis de alta tecnologia, equipamentos esportivos,

2. O Domo do Milênio em Londres e o Edifício Schlumberger em Cambridge (mostrado em 6.2k) são exemplos.

Figura 9.4 - Sensibilidade ao custo do material

Custo do produto por kg em vários setores industriais (parte superior); detalhes para a indústria de equipamentos esportivos (parte inferior).



equipamentos aeroespaciais e biomédicos (tente calcular para uma escova de dentes de marca famosa!).

Entre esses, o setor de equipamentos esportivos é um dos mais

receptivos e mais visíveis — uma boa combinação quando o que se procura é uma vitrine para produtos feitos com um novo material ou por um novo processo. A fibra de vidro, desen-

volvida pela primeira vez para ogivas de radares para aeronaves na Segunda Guerra Mundial, rapidamente desbancou a madeira em cascos de barcos e pranchas de surfe e encontrou aplicações em design de alta proeminência como as cadeiras de Charles e Ray Eames (1950). Compósitos de fibra de carbono/epóxi e matrizes de metal, ligas de titânio e de alumínio de alta resistência, todos desenvolvidos tendo em mente aplicações espaciais e de defesa, são mais conhecidos pelo consumidor médio por seu uso em tacos de golfe, raquetes e quadros de bicicleta. A partir de então se propagaram para outros produtos — relógios, carcaças leves para computadores, móveis, equipamentos para cozinha e banheiro. A pesquisa de materiais, motivada no passado por aplicações militares e aeroespaciais, agora é dirigida mais ao consumidor do que antes, dada a significativa influência do designer — e, em particular, do designer industrial. A adoção de polícarbonato translúcido para a carcaça do iMac e do titânio para a do iBook — exemplos da utilização por uma empresa de materiais antigos de novos modos — cria novos mercados para os próprios materiais, e ao mesmo tempo desperta para eles a atenção de designers de outros produtos.

Mas o desafio permanece. Aqui, focamos dois: a lacuna de informações encontrada por designers de produtos que procuram usar novos materiais e a dificuldade que eles têm de estimular fornecedores a desenvolver materiais com os atributos que eles querem. Fundamental para isso é a tarefa da comunicação, tanto entre o desenvolvedor e o designer, quanto na direção oposta.

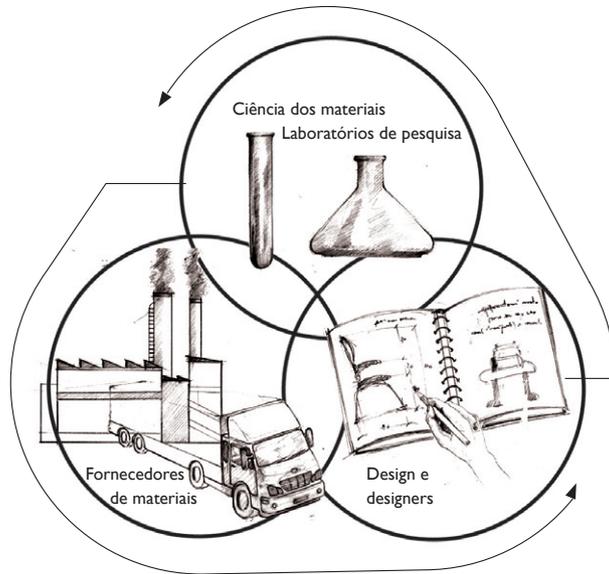
Informações sobre novos materiais

A maioria dos novos materiais para design surge por meio da comercialização de pesquisas, isto é, por meio do desenvolvimento impulsionado pela ciência (Figura 9.5). O desenvolvedor comunica informações sobre o material por meio de publicidade, comunicados de imprensa, perfis e planilhas de dados. A comunicação, se bem-sucedida, estimula os designers a usar o material de formas criativas. Mas, para isso funcionar, duas coisas são necessárias. A primeira: que as informações incluam as exigidas para o design de produto — e, como sabemos, isso significa muito mais do que apenas atributos técnicos. E a segunda: que a linguagem na qual elas são expressas tenha significado tanto para o fornecedor quanto para o designer, o que requer um vocabulário para expressar requisitos de projeto e comportamento de materiais que ambas as partes possam entender. Se as informações estão fluindo em uma direção, também podem fluir na direção contrária: o designer influencia o desenvolvimento de materiais sugerindo ou requisitando comportamentos técnicos, de processamento e estéticos específicos.

Então, a necessidade é de comunicação. As fontes de informações usuais para novos materiais — comunicados de imprensa, planilhas de dados de fornecedores, catálogos de fabricantes, informam o que eles têm de bom, mas raramente o que é ruim, e em geral focam atributos técnicos. Os atributos que incidem sobre o design industrial são bem mais difíceis de encontrar, e a consequência disso é que materiais que são muito conhecidos nas áreas

Figura 9.5 – Feedback positivo

A interação entre pesquisa de materiais, fornecedores e designers.



técnicas muitas vezes não são conhecidos pelos designers industriais. Aqui, a necessidade é de atributos visuais e táteis — os que ajudam a criar as associações e percepções de um produto. O desejo de satisfazer essa necessidade motiva exposições, livros e serviços ocasionais,³ mas alguns desses não são fáceis de encontrar e nenhum fornece métodos de seleção estruturados. Um exemplo das informações que um deles oferece é mostrado na Figura 9.6. Descreve os atributos técnicos ou percebidos de um novo material — uma espuma metálica — dando uma ideia das possibilidades de absorção de energia e design leve.

Vagas rapsódias sobre as maravilhas de um novo material podem servir para estimular interesse, certamente. Mas se você quiser projetar alguma coisa com o material precisará saber das más notícias, além das boas. Espumas metálicas nos dão um estudo de caso. Quanto custa uma espuma metálica? (Muito.) É atacada rapida-

mente pela corrosão? (Sim.) É fácil de conformar? (Ela pode ser fundida ou usinada, mas não muito mais do que isso.) Há alguma aplicação de sucesso comercial junto aos consumidores? (Ainda não.) E — já que queremos fazer alguma coisa com ela — qual é a sua resistência? Sua condutividade térmica? A planilha de dados não informa. Materiais emergentes podem ter uma adolescência difícil, durante a qual seu verdadeiro caráter emerge apenas lentamente. Materiais maduros são bem conhecidos em todos os seus aspectos. Manzini⁴ cita o exemplo da madeira: ela já foi tocada, cheirada, curvada, quebrada, cortada, estirada, já sofreu tração, já foi secada, molhada, queimada e talvez até provada pela maioria dos seres humanos; sabemos o que a madeira é e o que ela faz. Um novo material não está embutido na experiência do designer dessa mesma maneira. Precisamos de um modo de reunir e comunicar informações sobre ele que nos dê um quadro mais com-

3. O catálogo de Antonelli (1995) da exposição do MoMa, *Mutant Materiais*, o livro de imagens e texturas de Juracek (1996) e o livro *Material of Invention* de Manzini (1989) são exemplos. A empresa de consultoria *MaterialConnexion*, com sede em Nova York, oferece um serviço de informações para designers industriais. As empresas de consultoria citadas no Capítulo 2 oferecem coleções de materiais e serviços de informações sobre materiais para designers industriais.

4. Manzini (1989).

pleto de seu caráter emergente. Como disse o designer Richard Seymour, “Precisamos de um sistema no qual a tecnologia possa estar à altura da aplicação. Um sistema no qual os fabricantes de materiais possam difundir suas ideias diretamente àquelas pessoas que podem aplicar a necessária imaginação para utilizar suas propriedades”.⁵

O que pode ser feito? Duas possibilidades são exploradas aqui. A primeira é desenvolver os perfis de novos materiais de forma mais completa, tentando capturar atributos técnicos, bem como estéticos. A segunda é a ideia de oficinas de trabalho de materiais — interação direta entre quem faz e caracteriza materiais e quem faz projetos com eles.

Perfis para novos materiais

Os perfis de materiais apresentados em uma das seções que vêm mais adiante neste livro têm um formato padrão e informam os comportamentos técnicos, percebidos e visuais, diretrizes de projeto e utilizações típicas. Para *novos materiais* algumas dessas informações estão faltando — sendo as mais notáveis as diretrizes de projeto e as utilizações confirmadas. Ainda é possível reunir grande parte do restante e até mesmo indicar onde essas aplicações poderiam se encontrar. Damos três exemplos no final da referência para perfis de materiais: *espumas metálicas, metais amorfos ou “vítreos” e ligas memória de forma*.

Há informações suficientes desses perfis para montar com eles os mapas MDS de propriedades de materiais descritos no Capítulo 4, que permitam sua comparação com o “mundo” dos materiais. No mapa de rigidez e densidade da Figura 4.4, espumas



metálicas se encontram acima de espumas de polímeros rígidos — são um pouco mais pesadas e um pouco mais rígidas — e, é claro, podem ser usadas em temperaturas mais altas e são muito mais duráveis.⁶ O mesmo pode ser feito com mapas MDS e também aqui eles nos dão perspectivas interessantes. Se as representarmos nos mapas MDS da Figura 4.5, constataremos que elas se encontram mais próximas das madeiras e das espumas cerâmicas do que dos polímeros — uma percepção que levou um pesquisador a equiparar o material à “madeira metálica”. As comparações são esclarecedoras e sugerem possíveis aplicações de espumas metálicas que exploram sua rigidez, baixo peso e capacidade de absorção de energia, encontradas por aplicações “piratas” de espumas de polímeros ou madeiras nas quais deseja-se durabilidade adicional ou desempenho em alta temperatura: recheios para painéis sanduíches, divisórias leves a prova de fogo e certos tipos de embalagens.

Uma oficina de trabalho de materiais

O desafio da comunicação pode ser abordado de outro modo — como uma oficina de trabalho que

Figura 9.6 - Introduzindo um novo material

Descrição de espuma de alumínio em Materials and Ideas (Material Connexion): O processo de obtenção da espuma de alumínio combina alumínio em pó com um agente espumante e produz peças de espuma de formas complexas, painéis sanduíches de espuma metálica e perfis ociosos preenchidos com espuma. As peças têm uma microestrutura celular fechada e uma alta porcentagem de porosidade (40–90%), com uma estrutura de poros relativamente homogênea e isotrópica. A espuma tem uma alta razão rigidez específica/peso, alta absorção de impacto e energia e alto isolamento térmico e acústico. Em aplicações automotivas, é usada como carcaça do motor, e como estrutura da carroceria, o que promove a redução do peso e, com isso, economia de combustível. Portanto, o processo de obtenção de espumas metálicas pode resultar em novos desenvolvimentos na construção estrutural de mobiliário pelas propriedades de resistência e o baixo peso da espuma.

5. Richard Seymour (1998) escreveu sobre “vencer no design de esportes”.

6. A mesma coisa pode ser feita usando os outros oito diagramas de propriedades de materiais apresentadas no Apêndice ao final deste livro.

reúna especialistas que desenvolveram e caracterizaram o material e os designers que desejam usá-lo. Tentamos várias delas, a mais recente na SeymourPowell, Londres (uma empresa de consultoria em design), da qual participaram três cientistas de materiais e quatro designers. O pessoal de materiais apresentou um retrato do material — novamente, espumas de alumínio — usando amostras de espumas metálicas e diagramas de propriedades do material para colocá-lo no contexto, abordando as questões:

- *O que é?*
- *Quais são as possibilidades e os limites do processamento?*
- *Qual é o seu caráter?*
- *Como ele se comporta?*
- *Quais são os materiais concorrentes?*
- *Onde o material foi usado antes?*
- *Onde — de um ponto de vista técnico — as aplicações poderiam se encaixar?*

Isso estimulou uma sessão de *brainstorming* na qual os designers assumiram a liderança e pediram informações técnicas ao pessoal de materiais quando necessário. Todas as aplicações técnicas citadas anteriormente foram exploradas. Em particular, os aspectos visuais do material intrigaram os designers — espumas de células abertas parecem opacas e sólidas sob luz refletida, e transmitem luz quando iluminadas por trás. Isso mais as texturas naturais interessantes da espuma pele integral (ou espuma integral) sugeriram aplicações em artefatos leves, mobiliário, caixas de som (explorando suas características de amortecimento) e painéis arquitetônicos.

Reuniões como essa removem muitas barreiras e abrem canais de

comunicação de um tipo que nem mesmo os melhores perfis podem conseguir.

Exploração do material

Se o papel do designer é ver possibilidades em novos materiais, encontrar significados relevantes para as pessoas, habilitar a criação de novas experiências, então muitas vezes os materiais são um bom ponto de partida. Novos materiais e materiais “velhos” podem ser manipulados e modificados de modo a criar expressões de design que comunicam o que é único naquele material. Em primeiro lugar, é importante entender os atributos exclusivos que um material oferece. Por fim, é importante criar descrições visuais fortes daquilo que é possível. Essas imagens podem ser usadas para inspirar designers, investidores ou clientes. A capacidade de experimentar por conta própria e inspirar outros a experimentar com a exploração de materiais (novos e velhos) é uma habilidade importante para um designer aprender.

Incluimos aqui alguns estudos de caso da IDEO (www.ideo.com) que mostram uma gama de exploração de material e expressão de design: Vision (Visão), Heat (Calor), LiquidMetal® e Fabrications®. Os dois primeiros estudos de caso exploram os atributos de diferentes tipos de plásticos — com nomes que provavelmente não são conhecidos da maioria dos designers (mesmo os mais experientes). O plástico é um desses materiais que é mais ou menos definido por sua capacidade de ser manipulado com facilidade, e por servir para qualquer função ou decoração. Mas aqui examinamos



Figura 9.7 - Celulose e copoliéster

Equipamentos oculares inspirados em plástico (imagem por cortesia da IDEO).

minuciosamente qual design é possível com dois plásticos específicos.

Os dois estudos de caso que vêm depois exploram os atributos de dois materiais que definiram, cada um, uma nova categoria inteiramente diferente. Espera-se que esses materiais resultem frequentemente em inovação imediata, mas o sucesso na utilização de um novo material requer um entendimento sutil de atributos técnicos, possibilidade estética e comportamento humano.

Plásticos Eastman

Esse projeto foi denominado “Vision”; é uma exploração dos atributos exclusivos de mais dois plásticos — celulose (um plástico feito de algodão polimerizado e polpa de madeira) e copoliéster (PETG ou teraftalato de polietileno glicol modificado). A equipe de design buscava meios de reinterpretar materiais conhecidos. Futuros avanços em design dependerão fortemente da colaboração mútua entre designers e fornecedores de materiais.

Nessa exploração, a IDEO e a Eastman estudaram novos e engenhosos projetos com dois dos materiais que a Eastman fabrica, o copoliéster e a celulose. Esses materiais são conhecidos, mas suas possíveis encarna-

ções estão longe de ser exauridas. A natureza e o comportamento únicos desses plásticos apresentaram oportunidades e desafios interessantes para os designers da IDEO. A exploração foi simbiótica, e também satisfatória, e o resultado celebra a redescoberta do copoliéster e da celulose.

A equipe de design montou uma série de histórias de design contemporâneo tendo como tema equipamentos oculares. Cada história inspirou um conceito que foi implementado em celulose (Figura 9.7a) ou em copoliéster (Figura 9.7b). A intenção do design era capturar o esforço e a emoção por trás da exploração de materiais e design e então apresentá-los a um público mais amplo.

Plástico de alta temperatura da Basf

Esse projeto foi denominado “Heat”; é uma exploração dos atributos exclusivos do plástico resistente à alta temperatura; em particular, o foco caiu sobre um material (polifenilsulfona) que é vendido pela Basf com o nome comercial “Ultrason”. A equipe de design foi inspirada pelos atributos exclusivos do material e focou na criação de uma família de objetos para o lar: uma chaleira, uma



Figura 9.8 - Polifenilsulfona
Eletrodomésticos inspirados por tecnologia (imagem por cortesia da IDEO).

torradeira, um cabide de roupas, uma luminária e um secador de cabelo.

A chaleira (Figura 9.8a) permite que você veja a água fervendo em um recipiente transparente, frio ao toque, de parede dupla, que pode ser colocado diretamente sobre qualquer superfície depois de aquecido. Uma chapa de metal na parte inferior aquece a água por indução, o que é mais seguro e facilita a limpeza. A torradeira (Figura 9.8b) é leve e tem uma forma com cantos suaves. Sua estrutura aberta e transparente permite uma experiência sensorial visual e olfativa, e evita que a torrada queime, já que possibilita o controle visual direto do interessado. O cabide de roupas (Figura 9.8c) reúne as formas icônicas de cabides convencionais de arame e de camisetas para pendurar, secar e aquecer camisas. Aplica calor e tensão para desamassar o tecido e elimina com eficiência dois estágios do tédio que é lavar e passar roupas. O calor é criado por uma barra de indução que aquece um fino filamento que corre ao longo da borda externa. A luminária (Figura 9.8d) é feita em uma única peça de plástico. Então, a lâmpada pode ser atarraxada diretamente no

plástico, o que reduz o design à sua forma mínima. Ela pode ser colocada sobre uma mesa ou usada como luminária de teto. O secador de cabelo (Figura 9.8e) prescinde de um cabo, o que o torna menor e mais leve — para viagem. A ênfase está na portabilidade e é refletida no enrolamento e no modo de ligação inteligente do fio elétrico. O design pode ser produzido por um processo de moldagem de uma etapa, com saídas de ar integradas e nenhuma linha divisória visível entre as partes.

Ligas amorfas de LiquidMetal

LiquidMetal® é uma nova liga metálica que compete com o plástico e a cerâmica de um modo que antes era difícil para os metais. O material, uma combinação de titânio, berílio, cobre, níquel e zircônio, é fundido por um processo que permite acabamento de superfície e detalhes iguais ou melhores do que os proporcionados pelo processo de moldagem de plásticos por injeção. Devido aos valores de dureza próximos aos da cerâmica, o material pode obter e manter um acabamento espelhado, com a possibilidade da conformação

Figura 9.9 - LiquidMetal
As possibilidades criadas por novas estruturas metálicas (imagem por cortesia da IDEO).



de detalhes em um nível micro. Por fim, suas propriedades mecânicas como parte de uma estrutura de paredes finas o transformam em uma mola superior ou uma dobradiça integral (ou incorporada).

Para manipular esses atributos, o material foi representado como a superfície e a estrutura de um telefone celular delgado (Figura 9.9). O telefone foi projetado para se dobrar sem uma dobradiça separada. Outros conceitos incluíram um fecho metálico para bolsas semelhante ao Ziploc e uma embalagem de perfume de metal flexível.

Tecido eletrônico da Eleksen

Esse projeto começou como uma exploração de material dos exclusivos atributos de um tecido inteligente que podia perceber a localização em três dimensões — esse projeto foi denominado “Fabrications”. O tecido (*fabric*) combina fibras condutoras em uma trama tradicional. O produto final entregue foi um teclado de tecido que também podia servir como caixa de proteção para o PDA (Figura 9.10). A Eleksen fabrica o material, a Logitech fabrica o teclado — Key-Case. Esses produtos eram populares quando os PDAs eram populares, e de certo modo tornaram-se temporariamente obsoletos em razão da facilidade de utilizar teclados tradicionais (QWERTY) ou de 9 teclas (T9) no telefone celular ou smartphone.

Para que o equipamento comece a funcionar, o usuário simplesmente desdobra o teclado e o liga ao equipamento, que ativa o teclado. O teclado é confortável de usar em qualquer contexto ou sobre qualquer superfície. Os usuários podem controlar



Figura 9.10
Fabrications

Um tecido que é funcional, surpreendente e conveniente (imagem por cortesia da IDEO).

comportamentos como rolagem ou repetir ações pressionando as teclas durante mais tempo. O teclado é feito de silicone e tecido; é rijo o suficiente para uso diário e é fácil de limpar. Pesa menos de 142 gramas e tem 5 milímetros de espessura. Também pode ser usado como travesseiro depois de uma longa noite de trabalho.

Conclusões

Muitas vezes é difícil conseguir informações sobre novos materiais e certos setores industriais são mais rápidos na adoção de novos materiais do que outros, mas aqui, na verdade é o designer que tem a maior influência. Designers que querem conhecer uma fábrica por dentro, explorar novas tecnologias, conversar com cientistas de materiais e fazer perguntas, são os mais bem-sucedidos. Novos materiais são apenas o ponto de partida, há muitas possíveis aplicações no design de produtos superfícies inesperadas, experiências únicas, funções simples ou comportamentos significativos.

Leitura adicional

Antonelli, P. *Mutant Materials in Contemporary Design*. Nova York: Museum of Modern Art, 1995. (Uma publicação do MoMa que acompanhou a extensiva resenha de materiais presentes em produtos publicada em 1995.)

Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. e Wadley, H. N. G. *Metal Foams: A Design Guide*. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. (Um estudo sobre a coleta e reunião de informações sobre espumas metálicas no estágio inicial de sua comercialização, com o intuito de estimular sua adoção e utilização.)

Juracek, J. A. *Surfaces, Visual Research for Artists, Architects and Designers*. Londres: Thames & Hudson, 1996. (Uma curiosa compilação de imagens de superfícies texturizadas, castigadas e deformadas pelo tempo, de centenas de materiais.)

Lesko, J. *Materials and Manufacturing Guide: Industrial Design*. John Wiley & Sons, 1999. (Descrições resumidas, desenhos e fotografias de materiais e processos de fabricação, com úteis matrizes de características, escritas por um consultor com muitos anos de experiência em design industrial.)

Manzani, E. *The Material of Invention*. Londres: The Design Council, 1989. (Descrições curiosas do papel dos materiais no design e na invenção.)

MaterialConnexion. Um serviço de informações sobre materiais com sede em Nova York (www.materialconnexion.com).

Seymour, R. Uma contribuição à exposição “Winning the Design of Sports”, Glasgow, Reino Unido, publicada por Laurence King, Londres, 1998. (Uma compilação de artigos escritos por designers que resume seus métodos e ideias.)

Capítulo 10

Conclusões





A inspiração — capacidade de estimular o pensamento criativo — tem muitas fontes. Uma delas é o estímulo inerente a materiais, que, desde o início dos tempos, levou os seres humanos a lidar com eles e lhes dar alguma utilidade, usando a própria criatividade para escolher função e forma de modos que melhor explorassem os atributos desses materiais. Os mais evidentes exemplos são as propriedades de engenharia — densidade, resistência, resiliência, condutividade térmica e outros; são esses atributos que habilitam o design seguro e econômico dos produtos.

A considerável importância econômica do projeto técnico em qualquer sociedade desenvolvida sempre deu alta prioridade ao desenvolvimento de materiais e processos que atendessem a necessidades técnicas; há métodos estabelecidos para os escolher, amplamente ensinados e extensivamente documentados em livros didáticos e softwares. Mas um material tem outros atributos também: cor, textura, toque, uma espécie de “caráter” derivado das formas nas quais pode ser conformado; da capacidade de integração com outros materiais; do modo como envelhece com o tempo; da maneira como as pessoas se sentem em relação a

ele. Tais atributos também podem estimular a criatividade — o tipo de criatividade que dá a um produto sua personalidade, que o torna satisfatório e até mesmo prazeroso.

Ao escrevermos este livro, procuramos reunir linhas de pensamento sobre a seleção de materiais que servissem tanto ao projeto técnico quanto ao design industrial. A seleção do projeto técnico será assunto de outro livro; neste, a ênfase está mais dirigida ao design industrial. O que aprendemos? Em primeiro lugar, que um material tem muitas dimensões: uma dimensão técnica, que é a vista pelo engenheiro; uma dimensão econômica — o papel que

desempenha quanto ao valor que agrega aos produtos; uma dimensão ecológica, vista pelo ambientalista; uma dimensão estética, percebida pelos sentidos de visão, tato, audição; e uma dimensão que deriva de suas características, do modo como o material é percebido, de suas tradições, da cultura de sua utilização, de suas associações e personalidade.

Os atributos de estética e percepção são menos fáceis de definir do que os técnicos, mas ainda assim é essencial captá-los de algum modo se quisermos que o papel que desempenham — que, obviamente, é importante — seja comunicado e discutido. Há palavras para descrever atributos visuais, táteis e acústicos; e, até certo ponto, eles até podem ser quantificados. No caso de percepções e emoção, é mais difícil. Algumas delas, talvez, possam ser identificadas — o ouro é quase universalmente associado à riqueza, o aço à resistência, o granito à permanência, os plásticos à modernidade... pensando bem, até essas são incertas. O modo como pensamos em materiais ou em materialidade depende de contexto, cultura, demografia, estilo, tendência e outros. É difícil para as pessoas falarem especificamente sobre os materiais que são usados para fazer as coisas que compram; é tarefa do designer expressar a materialidade de cada objeto. Essa materialidade é o modo como construímos conexões tangíveis entre a marca que é representada, o objeto que é criado e a experiência que é habilitada. Portanto, concluímos: materiais têm uma personalidade intrínseca, embora difícil de se ver até que entre em foco por meio do design de produto, que

pretende contar uma história. A história deve ser relevante e significativa para os consumidores, tornando-se real por meio dos materiais e processos de fabricação que nos inspiram e são então especificados.

A primeira etapa no design de produtos é a da identificação de um conceito, uma nova ideia, os princípios de design no qual o produto será baseado. Na segunda — visualização —, as características desejadas são desenvolvidas com a utilização de esboços desenhados à mão, modelos e recursos gráficos de computação para definir com mais precisão as restrições de configuração, tamanho, funcionalidade e personalidade, tal como descrito no Capítulo 6. É na terceira etapa — materialização — que os materiais e processos são escolhidos; protótipos, construídos e testados; e o projeto final aprovado.

Essa escolha é orientada não apenas por requisitos técnicos, mas também por requisitos de estética, percepção, emoção e personalidade. Para concluir a escolha com êxito, precisamos de métodos de seleção flexíveis e que possam tratar com diligência informações de tipos variados. Esse raciocínio resultou na estrutura de informações apresentada no Capítulo 7. Um material pode ser caracterizado por seu nome, por seus atributos técnicos e estéticos. Pode ser indexado, por assim dizer, pelos processos que podem conformá-lo e pelos produtos em que é utilizado. O projeto de produto leva em conta amplas intenções, que influenciam cada decisão de projeto, incluindo a escolha de materiais; assim, os materiais podem se associar às intenções do design por meio de produtos.

Os produtos também têm atributos estéticos e percebidos que são ponderados no design; materiais também podem ser associados a esses atributos. E as experiências que temos com produtos criam atributos emocionais e a personalidade de certo material. No caso dos materiais, esse não é o único modo de organizar as informações que os designers de produto precisam, mas sim uma escolha que funciona — é prático e ao mesmo tempo inspirador. É proveitoso observar os materiais dentro do contexto de estruturas e superfícies que conhecemos e entendemos no mundo dos produtos — as coisas que nos cercam. Em termos de estrutura para seleção de materiais, isso permite vários métodos.

O design de produto tem um componente técnico que é de vital importância — ninguém quer um produto que não funciona; métodos de análise consagrados cuidam do assunto. A análise é de menor ajuda na seleção dos outros aspectos do design (industrial ou de produto) — que dependem muito de como consideramos os sentidos (visual, tátil, acústico) e de atributos percebidos (emoção, personalidade).

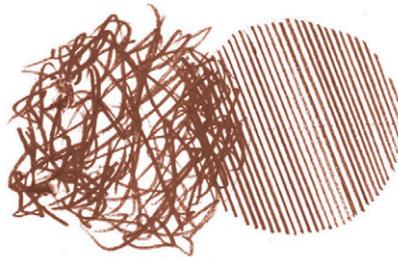


Figura 10.1 –
Estrutura e caos
Equilibrar estrutura e caos é fundamental na seleção inovadora de materiais.

Nesse caso, métodos que utilizam julgamentos de similaridade, analogia ou simplesmente curiosidade (“busca aleatória”) são mais produtivos.

O caminho dos requisitos de projeto até a especificação do produto raramente é linear; quase sempre é tortuoso, e reúne determinadas informações por um método, outras por outros métodos, combinando-as em uma solução que — embora baseada em informações existentes — pode ser inteiramente nova. Há aqui certa estrutura, mas também um certo grau de caos (Figura 10.1). Sem métodos estruturados, a seleção de materiais não chega a lugar nenhum. Mas, sem um pouco de loucura e caos, as soluções realmente inovadoras podem passar despercebidas. Equilibrar estrutura e caos é fundamental na seleção inovadora de materiais.

Apêndice A: Exercícios para os olhos e para a mente

Apresentamos a seguir alguns exercícios. A maioria pode ser feita individualmente, mas há aqueles que devem ser resolvidos em grupo. Alguns precisam de um suprimento de materiais. A lista é organizada de acordo com o conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 1

Materiais no mundo real. Examine a utilização, em produtos e estruturas, de uma classe de material da seguinte lista:

Madeiras
Cerâmicas

Vidro
Polímeros

Metais
Têxteis

Procure exemplos de sua utilização visitando lojas, observando produtos e estruturas nas ruas, estações e museus. Prepare comentários, com esboços em vez de fotografias, que revelem o modo como o material foi usado, as formas que ele permitiu e as associações e percepções que sua utilização criou.

Capítulo 2

Autópsia do produto. Examine detalhadamente um produto de sua escolha, observando como os materiais foram usados, fazendo o possível para identificar o material e o modo como foi processado. Examine como as escolhas de design usadas para o interior do produto influenciaram sua forma externa. Até que ponto a forma externa expressa a função do produto?

Associações significativas. Analise as respostas à Pergunta 3 (considerando que há respostas disponíveis de — digamos — dez participantes).

1. Examine as respostas julgando o grau de concordância dos participantes com as associações.
2. Utilize métodos estatísticos para identificar escolhas de associação com um grau significativo comum.
3. Utilize análise de agrupamento para reunir materiais com associações por similaridade.

Tipos de inovação. O exemplo de USB nesse capítulo analisou o *pen drive* na estrutura para inovação. Examine novamente os outros produtos na mesma estrutura.

Capítulo 3

Contar uma história visual. Identifique um produto e o ambiente no qual ele será usado. Reúna imagens, amostras, desenhos esquemáticos e outros materiais que sugiram conceito e monte-os em um painel semântico.

Associações de materiais. O que você pensa quando vê algo feito de ouro? Você poderia — porque o ouro é caro — associá-lo com riqueza e

luxo; ou talvez — porque é um símbolo visível de riqueza — com extravagância e poder; ou — em razão de sua total resistência a ataques químicos — com estabilidade e longevidade. Quais associações você ligaria aos seguintes materiais? Pergunte: “O que você pensa quando vê algo feito de...”

Aço usinado?	Chumbo?	Madeira de cerejeira polida?
Aço inoxidável?	Polietileno?	Plástico com uma superfície de madeira?
Aço enferrujado?	Náilon?	Mármore?
Alumínio escovado?	Diamante?	Vidro?

Evolução do produto. Explore a evolução de um produto documentando a história de seu design (exemplos foram dados no Capítulo 3). Informe os modos como as escolhas de material, processamento e tratamento de superfície foram usados para cumprir requisitos técnicos e estéticos e criar associações e percepções. Comece com suas próprias observações, e então procure informações em livros sobre a história do design e em revistas e catálogos contemporâneos. Entre os produtos que estão bem-documentados por esses meios, citamos:

Rádios	Bicicletas	Canetas
Aspiradores de pó	Telefones celulares	Carros
Esquis	Computadores pessoais	

Capítulo 4

Série cromática. Desenvolva uma série cromática de materiais, como Itten sugeriu a seus alunos no curso da Bauhaus. A série cromática mais reconhecível é a das cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, violeta. Essa série proporciona uma estrutura limitada e uma representação visual de um amplo espectro de cores. O mesmo é necessário para guiar designers em uma ampla faixa de materiais disponíveis.

A internet é verde. Mantendo o foco na sustentabilidade, pesquise qualquer um ou todos os itens seguintes para um material e/ou processo de fabricação e/ou categoria de produto selecionada:

1. Legislação ambiental e seu impacto sobre a escolha de material.
2. Ferramentas de software para ajudar na obediência à Diretriz EuP (*Energy-using Products*), à diretiva de alcance e à diretiva WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment Directive*).
3. Esquemas de troca de créditos de carbono e seus sucessos e fracassos.

Capítulo 5

Materiais e fabricação: Procure cinco exemplos de produtos que mostrem expressão por meio de materiais, conformação, junção, acabamento de superfícies e manufatura, em geral.

Capítulo 6

Variações sobre um tema. Faça desenhos esquemáticos para um produto para mostrar como seria sua aparência se feito com cada um dos vários

materiais citados. Por exemplo, desenhe uma escrivadinha feita de metal, de um polímero, de vidro e de madeira.

Inspiração que vem dos materiais. Faça uma sessão de *brainstorm* sobre utilizações que poderiam ser atribuídas a um material comum, ou a um material novo ou incomum (se disponível). Ambas as soluções, funcional e estética, são possíveis. Escolha uma das ideias que surgiram na sessão de *brainstorm* e continue a desenvolvê-la experimentando o material no papel que foi escolhido. Descreva as características da ideia e como o material contribui para essas características. (O projeto requer amostras de materiais e é melhor fazê-lo com um grupo de indivíduos que estão tentando obter o mesmo resultado.)

Capítulo 7

Novo design para um produto. Examine detalhadamente um produto, identificando a função dos sistemas que ele contém, bem como a do componente individual. Explore alternativas — como uma ou mais funções poderiam ser obtidas de outras formas? Seria possível fazer um novo projeto para os mesmos componentes usando outros materiais? Quais seriam as mudanças permitidas por essas alterações no número de partes no produto e no design de sua forma externa?

Capítulo 8

Metáforas de materiais. Um “ferro” é usado para passar roupas amassadas. Seu nome vem do material de que é feito. De modo semelhante um “vidro” é um produto que compartilha seu nome com seu material. O que — se você pudesse projetá-lo — seria feito de...

Alumínio?
Policarbonato?
Bambu?

Polietileno?
Níquel?
Cobre?

Zinco?
Náilon?

Capítulo 9

Criando associações com materiais. Você foi contratado para projetar um *rack* que acomode CDs para um nicho, um estúdio ou uma casa, usando a escolha do material para despertar associações na mente do comprador ou usuário. Quais materiais (cores, acabamentos, estilos) você escolheria para sugerir que o *rack* seja...

Moderníssimo, tecnicamente avançado?
Amigável ao meio ambiente?
Fácil de usar, não ameaçador?

Desejável para crianças?
Durável, robusto?

Capítulo 10

Projetos de design. Desenvolva uma configuração para um projeto técnico (ou de engenharia). Pesquise o histórico (esclarecendo a tarefa), imagine e desenvolva conceitos por visualização (com desenhos esquemáticos) e por materialização (com a construção de um modelo). Estime o custo.

Apêndice B: Mapas de materiais selecionados

Diagrama 1 – Módulo de elasticidade/densidade

Diagrama 2 – Resistência/densidade

Diagrama 3 – Tenacidade à fratura/módulo de elasticidade

Diagrama 4 – Módulo de elasticidade/resistência

Diagrama 5 – Coeficiente de perda de energia/módulo de elasticidade

Diagrama 6 – Dilatação térmica/condutividade térmica

Os seis diagramas mostrados são mapas de atributos técnicos. Eles mostram as ilhas e continentes, por assim dizer, que são ocupados e os oceanos entre eles que são vazios. Partes desses oceanos podem ser preenchidas com a fabricação de compósitos, estruturas sanduíches e outros materiais configurados (espumas, por exemplo) que combinam as propriedades de dois ou mais materiais isolados — aqui ainda existem águas não mapeadas. Outras partes não podem mesmo ser alcançadas, por razões fundamentais que têm a ver com a física do modo como os átomos estão ligados em sólidos.

Os diagramas formam parte de um conjunto maior que pode ser encontrado no texto auxiliar deste (Ashby, 2005); eles foram construídos usando o software CES Edu (2009). Algumas das denominações foram abreviadas por questão de espaço: assim, tsPoliéster é poliéster termofixo (termoset), tpPoliéster é termoplástico e elPoliéster é elastomérico; fPU é uma espuma de poliuretano flexível e rPU é espuma rígida, sPU uma espuma estrutural, ocPU é de célula aberta e ccPU é de célula fechada.

Diagrama I – Módulo de elasticidade, E, e densidade, ρ

Se um sólido é deformado elasticamente, volta à sua forma original quando solto. Os átomos dos sólidos são mantidos juntos por ligações atômicas — imagine-as como pequenas molas que ligam os átomos. Se as molas são difíceis de estirar, o sólido é rígido; se são fáceis de estirar, o sólido é flexível. O módulo de Young é uma medida da rigidez ou flexibilidade das ligações. Metais e cerâmicas são rígidos; polímeros são muito mais flexíveis. Espumas e elastômeros são ainda mais flexíveis, e por uma nova razão: sua estrutura permite deflexão adicional (curvatura da parede da célula, rearranjo molecular) que, não obstante, é recuperada quando as cargas deixam de agir sobre o material.

Os espaçamentos interatômicos em materiais não variam muito: estão todos dentro de um fator de 3 em relação a 0,3 nm (3×10^{-10} m). As densidades de materiais — a massa por unidade de seu volume — variam de um modo muito mais amplo, simplesmente porque alguns átomos são pesados (cobre, ferro — e, portanto, aço) e outros são leves (hidrogênio, carbono — e, portanto, polímeros como o polietileno, $(\text{CH}_2)_n$).

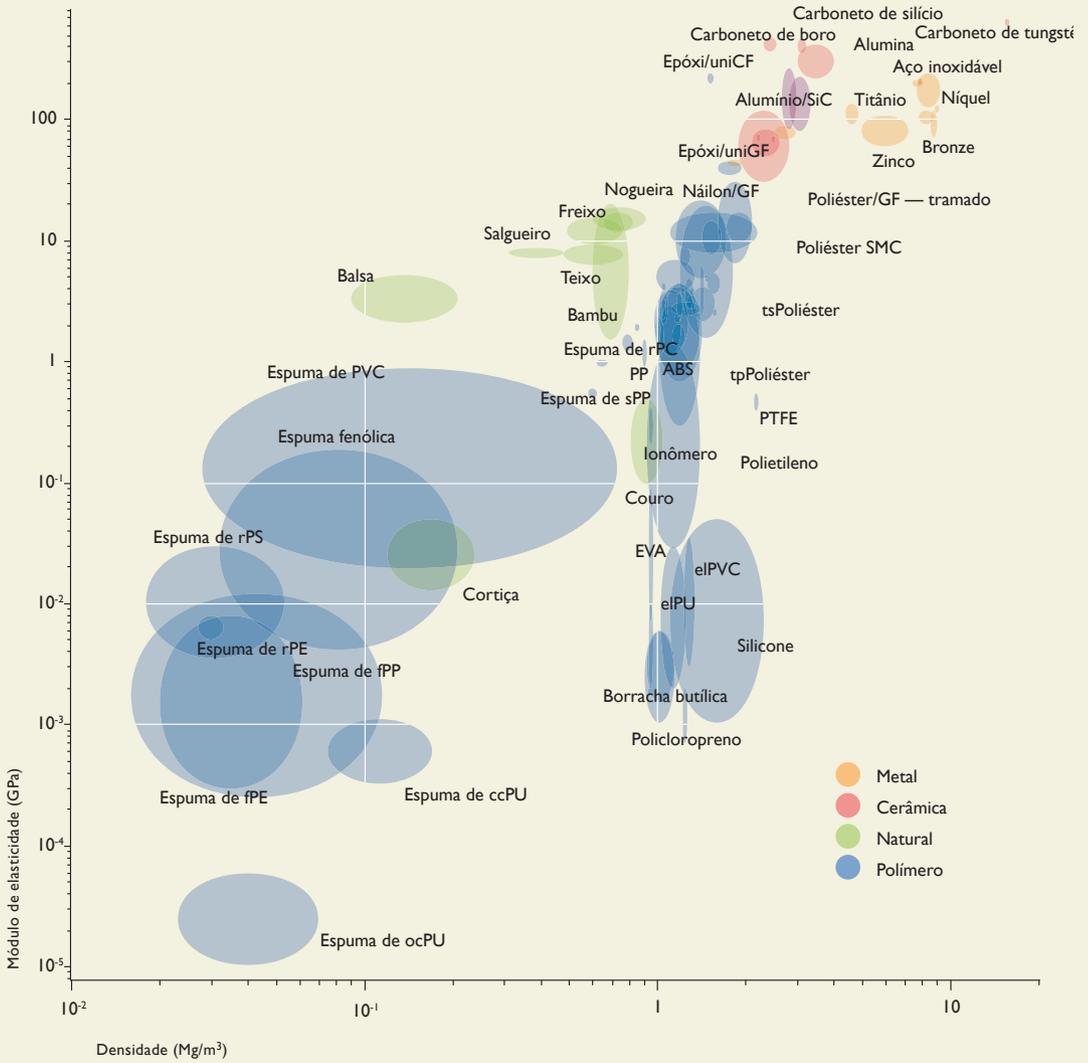


Diagrama 2 – Resistência, σ , e densidade, ρ

Resistência é diferente de rigidez — imagine-a como uma medida da força necessária para romper ligações atômicas. Em materiais frágeis (vidros, cerâmicas), romper significa exatamente isso: o sólido sofre fratura. Mas em materiais dúcteis (metais, muitos polímeros), as ligações se rompem, os átomos ou moléculas se movem, novas ligações se formam e o material fica exatamente como era antes, mas com um novo formato. Essa capacidade de formar ligações novamente resulta em ductilidade e, por consequência, na capacidade de ser conformado por laminação, extração por tração, moldagem e estiramento.

“Resistência”, nesse caso, significa o desvio de 0,2% na tensão de escoamento para metais. No caso dos polímeros é a tensão na qual a curva tensão-deformação se torna acentuadamente não linear — tipicamente uma tensão em torno de 1%. Para cerâmicas e vidros, é a resistência ao esmagamento sob compressão; lembre-se de que essa é aproximadamente 15 vezes maior do que a resistência à fratura sob tração. Para os elastômeros é a resistência à ruptura.

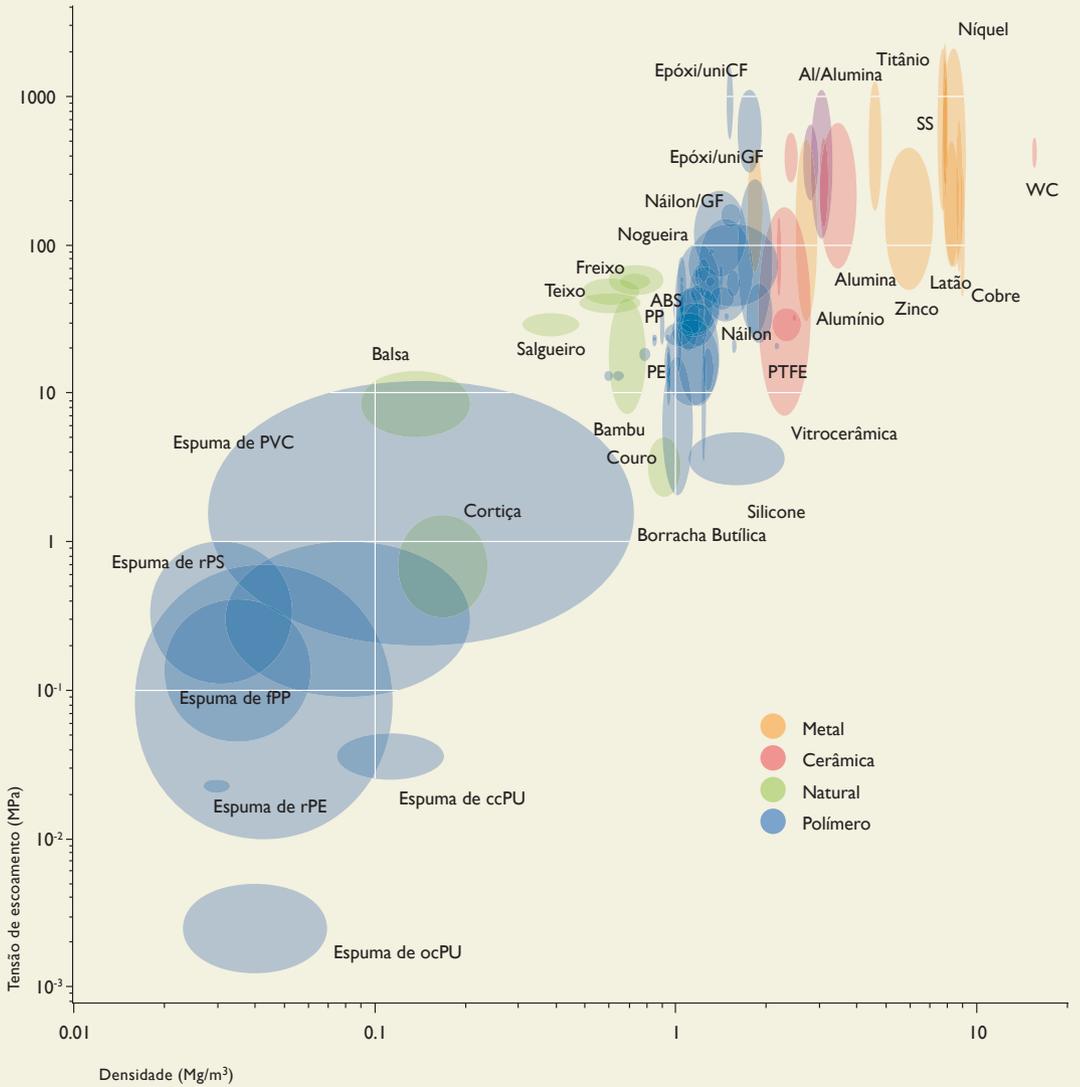


Diagrama 3 – Tenacidade à fratura, K_{IC} , e módulo de elasticidade, E

Se você der um talho na borda de uma embalagem de celofane ou arranhar a superfície de uma chapa de vidro, ela trincará ou se romperá por causa do talho ou do arranhão. Se você fizer o mesmo com cobre ou aço, não acontecerá a mesma coisa. Isso porque os dois primeiros materiais têm baixa tenacidade à fratura, K_{IC} , a propriedade que mede a resistência à propagação de uma trinca. Materiais com baixa tenacidade à fratura são fortes quando estão perfeitos (é por isso que é tão difícil rasgar o celofane de uma embalagem de CD ou a embalagem de um pacote de biscoitos), porém, tão logo a superfície seja danificada, é fácil rasgá-los. Materiais com alta tenacidade à fratura são tolerantes a trincas; ainda suportam cargas com segurança, mesmo quando trincados. O diagrama mostra a tenacidade à fratura, K_{IC} , em relação ao módulo de elasticidade E. A “tenacidade”, G, está relacionada com K_{IC} por $G = K_{IC}^2/E$ — mostrada como um conjunto de linhas diagonais.

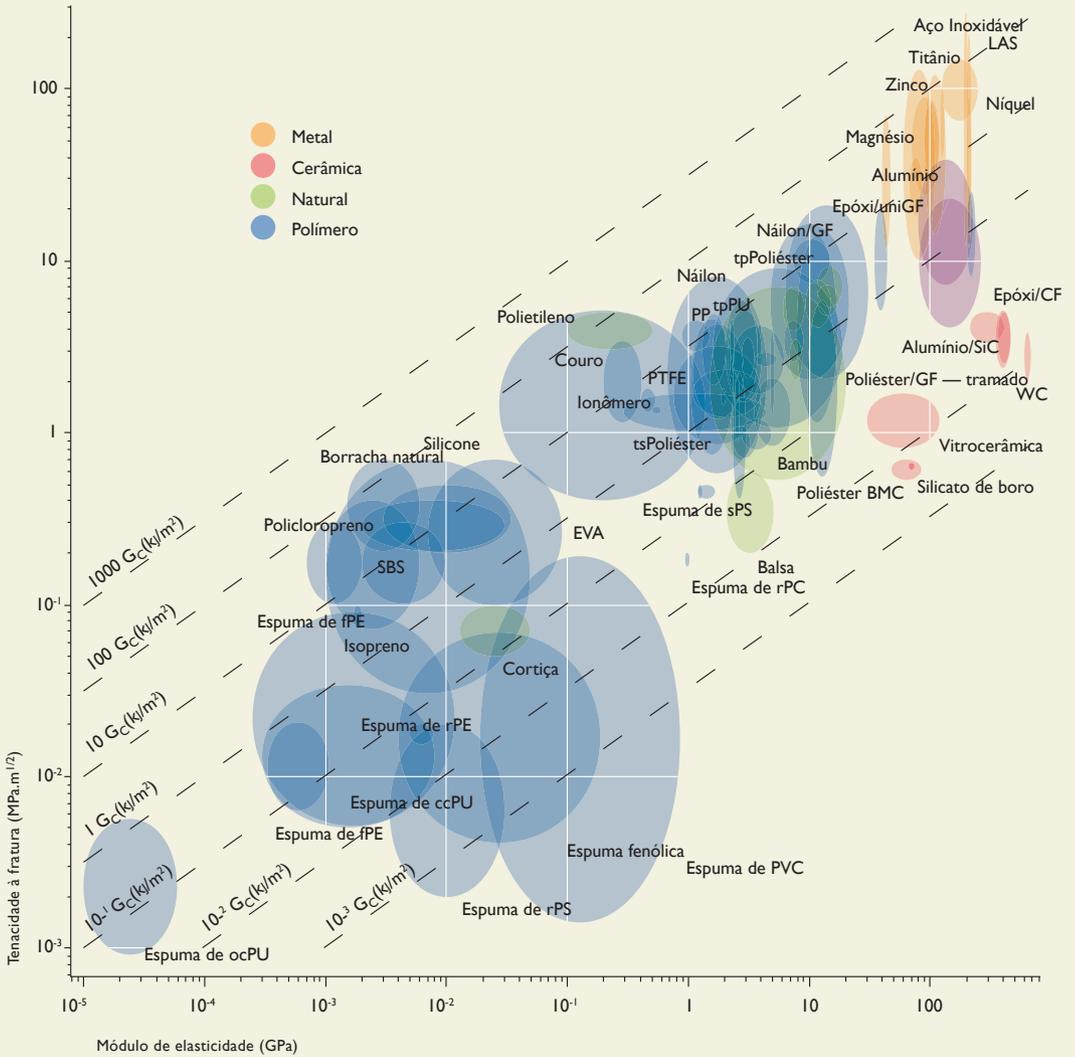


Diagrama 4 – Módulo de elasticidade, E, e resistência, σ_f

Aqui não há nenhuma propriedade nova. O valor do diagrama é que muitos resultados de design dependem de uma ou outra combinação de E e σ_f . Assim, a resiliência — a capacidade de ser curvado sem dano (como o couro) é medida pela combinação σ_f/E , mostrada como um conjunto de linhas de contorno no diagrama. A capacidade de armazenar e devolver energia elástica (característica na qual a borracha é boa) é medida por σ_f^2/E (não mostrada). Materiais com grandes valores dessas combinações têm bom desempenho nessas funções.

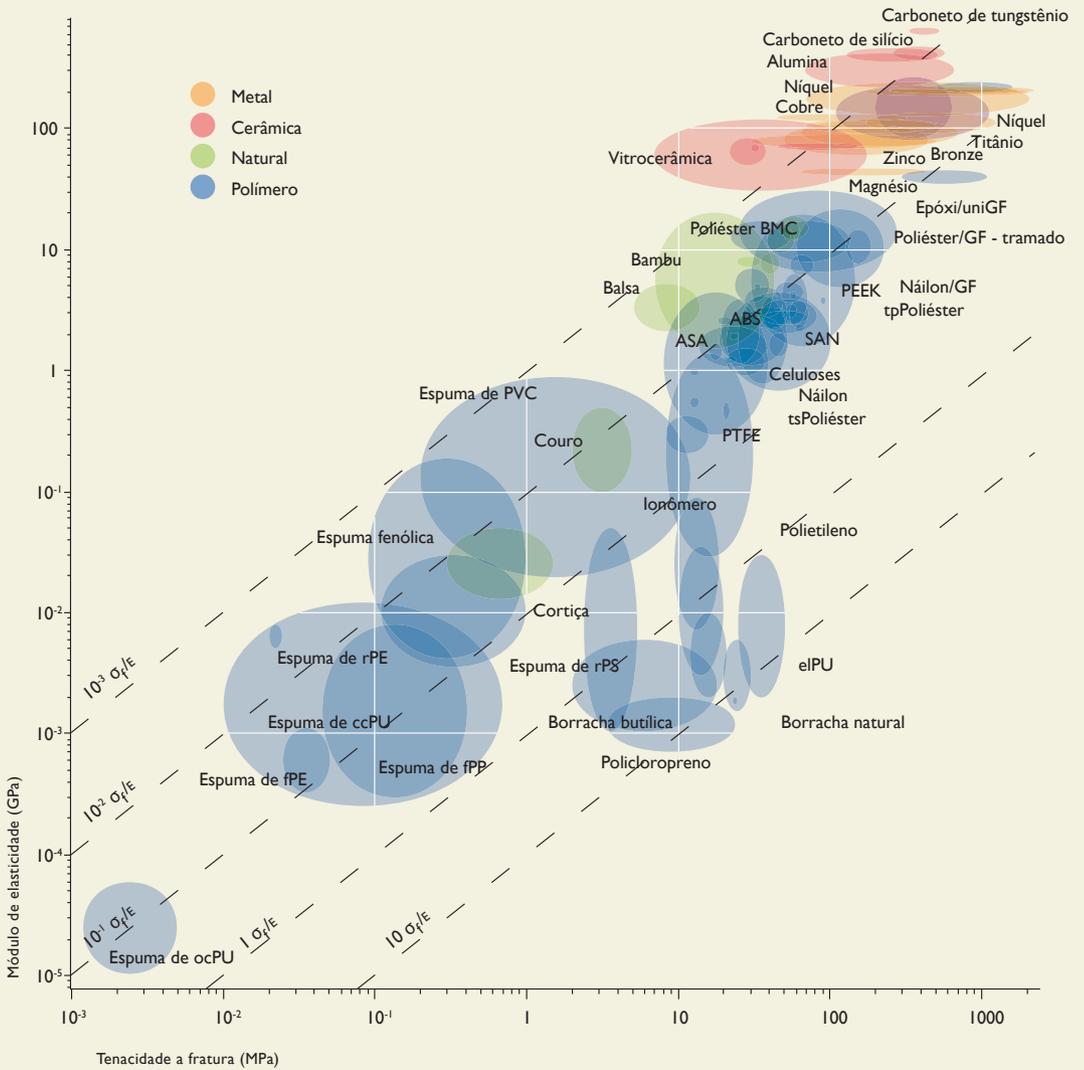


Diagrama 5 – Coeficiente de perda de energia, η , e módulo de elasticidade, E

Se uma bola de aço dura cair sobre a superfície de um material, ela quica de volta. A altura que ela alcança ao quicar é uma medida da perda de energia no material: quanto maior for a distância que ela alcançar ao quicar, menor é a perda. Materiais que têm baixo coeficiente de perda de energia devolvem quase toda a energia da bola, de modo que ela quicará muitas vezes (número que pode chegar a 1000) antes de ficar em repouso. Materiais que têm alta perda de energia levam a bola ao repouso quase imediatamente. Escolha materiais de baixo coeficiente de perda para molas, palhetas vibratórias, cordas para instrumentos musicais e sistemas de suspensão de precisão; escolha materiais com alto coeficiente de perda para amortecimento de vibrações.

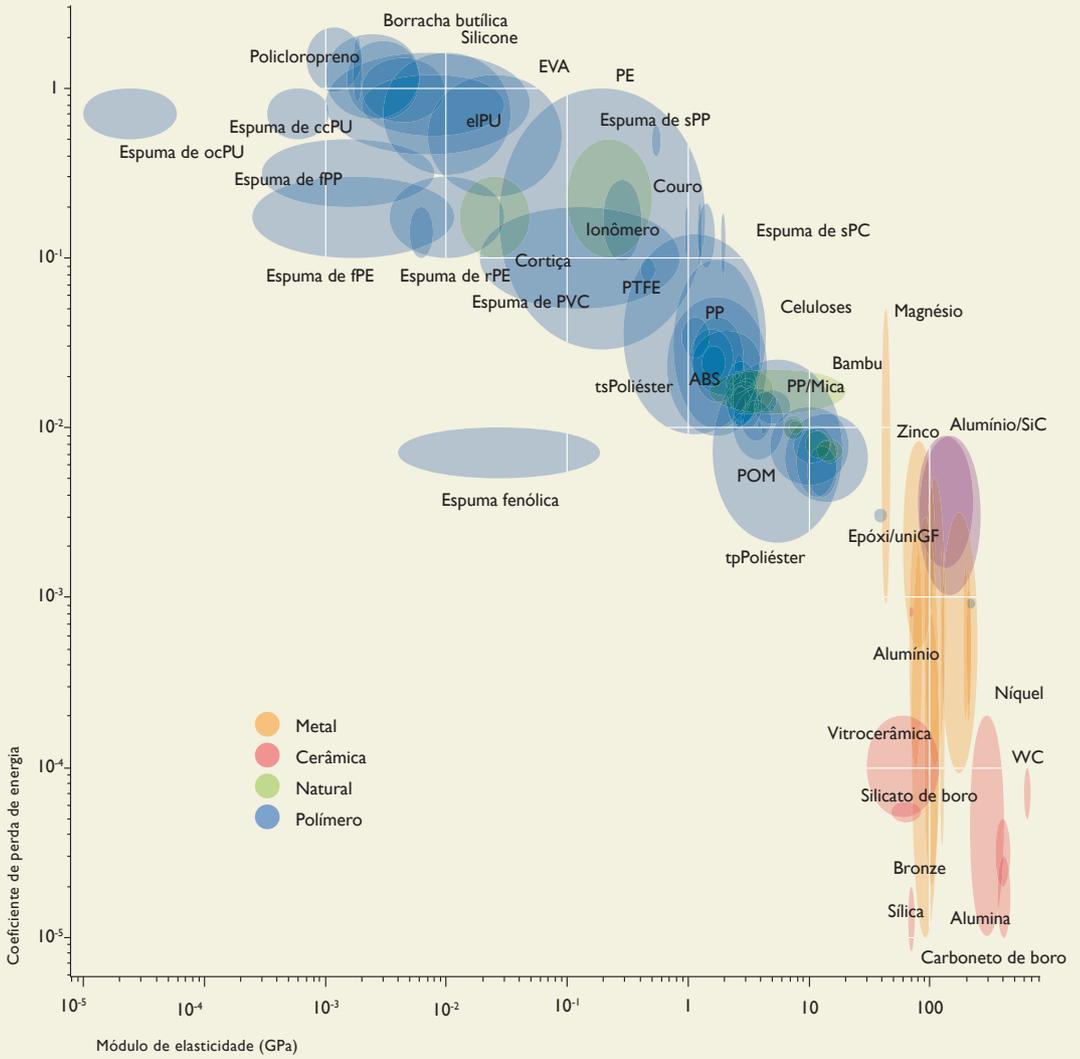
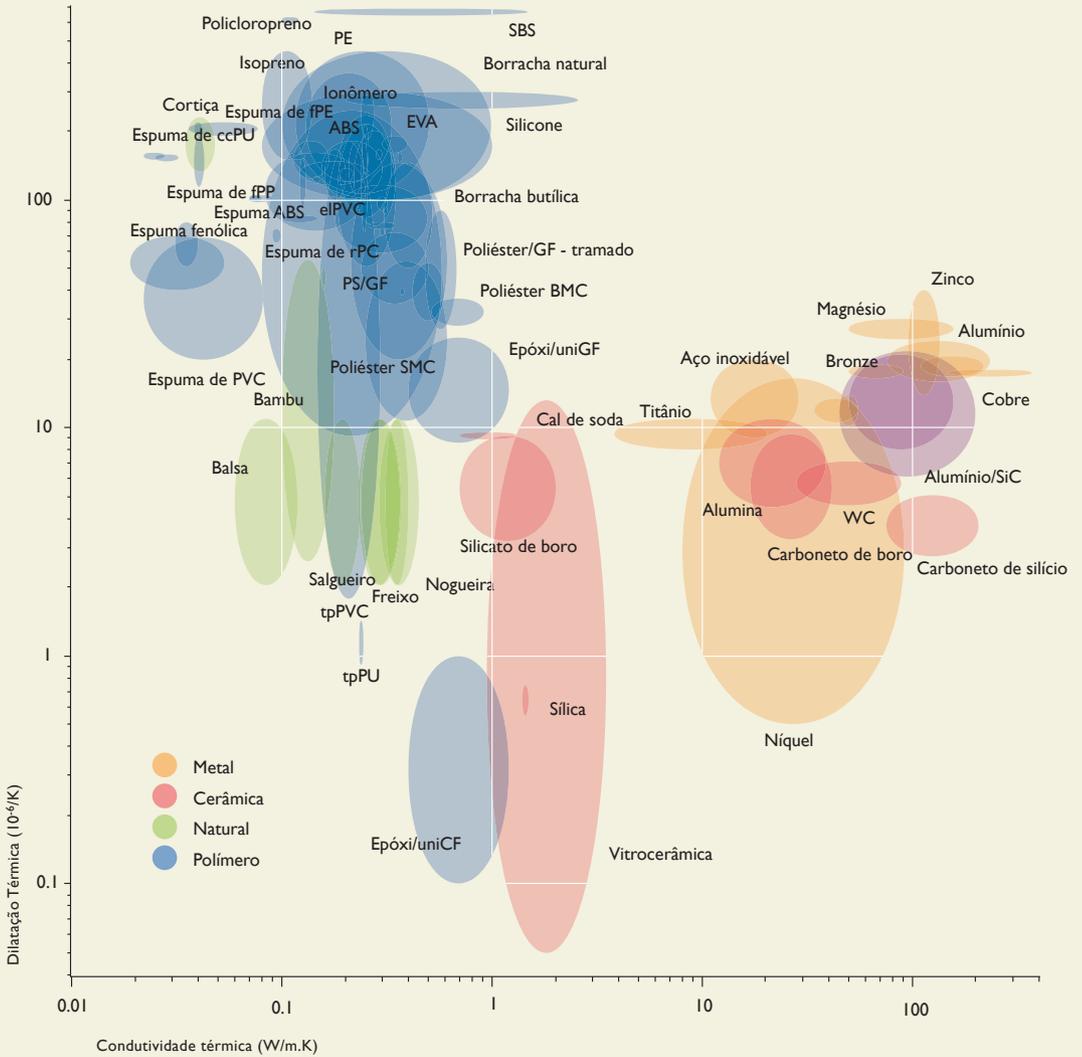


Diagrama 6 – Coeficiente de dilatação térmica, α , e condutividade térmica, λ

Dilatação e condutividade são as duas propriedades térmicas mais importantes para o design de produto. Elas variam muito: o diagrama mostra que metais e certas cerâmicas têm altas condutividades aliadas à baixa dilatação. Polímeros e elastômeros têm condutividades 1000 vezes menores, e se expandem no mínimo 10 vezes mais. É importante compatibilizar coeficientes de dilatação para unir materiais que serão usados em alta temperatura; se isso não for feito, aparecerão tensões prejudiciais quando houver mudança de temperatura. A alta condutividade térmica é valiosa em trocadores de calor e escoadouros de calor, e quando é exigida uma temperatura uniforme (por exemplo, painéis de cozinha). A baixa condutividade é valiosa quando a meta é o isolamento contra o calor.



Guia prático de referência para a inspiração

Produtos são feitos de materiais através de processos de manufatura. Há muitos materiais e processos, mas um pequeno grupo é responsável pela maioria das especificações no design de produtos. Este guia de referência reúne perfis de materiais e manufatura; retratos para o designer, por assim dizer. Os perfis, e as informações que eles contêm, podem ser encontrados pelo índice convencional no final do livro ou pela árvore hierárquica incluída na introdução a cada conjunto de perfis.

Os materiais e processos de manufatura mais comumente utilizados estão apresentados em um perfil de página inteira; os menos comuns estão agrupados e seus perfis resumidos.



Perfis de materiais

Materiais são a matéria-prima do design, e através da História ditaram as oportunidades e os limites do design. As idades (eras) em que o homem viveu levam os nomes dos materiais que ele usou: Pedra, Bronze, Ferro, Plástico e – hoje – Silício. Mas nos dias atuais não vivemos a idade de apenas um material; é a idade de uma imensa gama de materiais e das combinações que eles permitem. E as pessoas (seus clientes) estão mais conscientes das questões relacionadas à seleção de materiais em razão do surgimento da ideia da sustentabilidade. Nunca houve uma era na qual a evolução dos materiais tenha sido mais rápida e o âmbito de suas propriedades mais variado. O cardápio de materiais se expandiu com tanta rapidez que os designers podem ser perdoados por não saberem da existência de metade deles. Porém, para o designer, não saber é risco de fracasso: o que permite o design inovador é a exploração imaginativa de novos materiais ou de materiais aprimorados. Não há nenhuma razão para esperar que o ritmo do desenvolvimento de materiais ficará mais lento, portanto, essas lacunas podem ficar piores (ou melhores!).

Introdução	196
Leitura adicional	208

Polímeros

Polietileno (PE)	209
Polipropileno (PP)	210
Poliestireno (PS)	212
Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	214
Poliamida (PA), náilon	216
Polimetilacrilato (PMMA), acrílico	217
Policarbonato (PC)	218
Polioximetileno (POM), acetal	219
Politetrafluoretileno (PTFE)	220
Ionômeros	222
Celuloses (CA)	223
Polivinilcloro (PVC)	224
Poliuretano (PU)	225
Silicones	227
Poliésteres (PET, PBT, PETg)	228
Fenólicos	230
Outros elastômeros	232
Espumas de polímeros	236
Compósitos de polímeros	238

Metais

Aços-carbono	240
Aços inoxidáveis	242
Aços de baixa liga	243
Ligas de alumínio	244
Ligas de magnésio	245
Ligas de titânio	246
Ligas de níquel	247
Ligas de zinco	248
Cobre, latão, bronze	250

Outros

Cerâmicas	252
Vidro	254
Fibras	255
Materiais naturais	257

Novos materiais

Espumas de metal	259
Metais amorfos	260
Ligas memória de forma	262
Polilactida (PLA)	264
Poli-idroxialcanoatos (PHA, PHB)	265

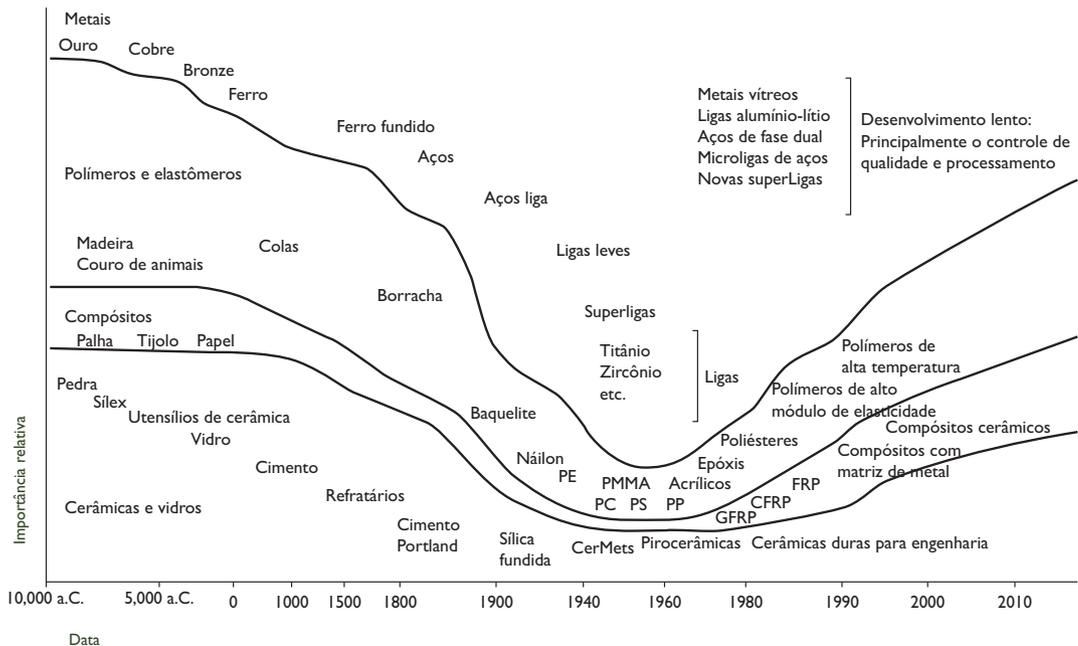
Evolução dos materiais

A figura apresentada na parte inferior desta página ilustra o padrão e o ritmo crescente da evolução dos materiais. Os materiais da pré-história (> 10000 a.C, a Idade da Pedra) eram cerâmicas e vidros, polímeros naturais e compósitos. As armas – sempre o ápice da tecnologia – eram feitas de madeira e sílex; construções e pontes de pedra e madeira, vestimentas de pele e de couro dos animais. O ouro e a prata de ocorrência natural estavam disponíveis no local, mas desempenhavam um papel apenas pequeno na tecnologia. A descoberta do cobre e do bronze e, então, do ferro (a Idade do Bronze, 3000 a.C a 1000 a.C, e a Idade do Ferro, 1000 a.C a 1620 d.C.) estimularam enormes avanços, substituindo as armas e ferramentas mais velhas, feitas de madeira e pedra. A tecnologia do ferro fundido (década de 1620) estabeleceu o domínio dos metais na engenharia; e o desenvolvimento dos aços (de 1850 em diante), ligas leves (década de 1940) e as ligas especiais então consolidaram sua posição. Na década de 1960, a expressão “materiais de engenharia” significava “metais”.

A evolução dos materiais de engenharia ao longo do tempo

A importância relativa nas idades da Pedra e do Bronze é baseada em avaliações de arqueólogos; a de 1960 se baseou em horas de ensino nas universidades do Reino Unido e dos Estados Unidos; a de 2020 na previsão da utilização de materiais em automóveis, feita por fabricantes.

Houve, é claro, desenvolvimentos nas outras classes de materiais: cimento Portland, refratários e sílica fundida entre as cerâmicas; borracha sintética, baquelite e polietileno entre os polímeros; mas a participação que eles tinham no mercado total de materiais era pequena. A partir de 1960 tudo isso mudou. A taxa de desenvolvimento de novas ligas metálicas agora é lenta; a demanda por aço e ferro fundido em alguns países até diminuiu. Os polímeros desbancaram os metais em um número crescente de mercados, entre eles os fundamentais para a indústria de manufatura de metais, como a automobilística. A indústria dos compósitos continua com forte



crescimento e as projeções do crescimento da produção de novas cerâmicas de alto desempenho sugerem substancial expansão também nesse setor.

Essa alta velocidade de mudança oferece oportunidades que o designer não pode se dar ao luxo de ignorar. As páginas a seguir contêm esboços do caráter dos polímeros, metais, cerâmicas, compósitos e materiais naturais comuns, destacando os aspectos de importância para o design. Em seguida são apresentados perfis de materiais específicos.

Polímeros

Embora os polímeros naturais – madeiras, lã, couro – sejam os materiais mais antigos do mundo, os polímeros comercializados hoje têm pouco do que lhes é natural; são a contribuição dos químicos ao mundo dos materiais. Quase todos são sintetizados do petróleo (embora não precisassem sê-lo) e resultados de combinações de átomos simples: carbono, hidrogênio, oxigênio, cloro e menos frequentemente nitrogênio e flúor.

Termoplásticos

Termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem novamente, voltando ao seu estado original, quando resfriados. A maioria aceita agentes corantes e reagentes, e muitos podem ser misturados para dar uma vasta gama de efeitos físicos, visuais e táteis. Sua sensibilidade à luz solar é reduzida com a adição de filtros UV, e sua inflamabilidade é diminuída com a adição de retardadores de chamas. Os termoplásticos comuns são apresentados na tabela ao lado. Entre eles estão as poliolefinas (polietileno, polipropileno), PVCs, poliestirenos, acrílicos e certos poliésteres (PET e PBT). Alguns são cristalinos, outros amorfos, alguns são uma mistura de ambos. As propriedades dos termoplásticos podem ser controladas pelo comprimento da cadeia (medida por seu peso molecular), pelo grau de cristalinidade e por mistura e plasticidade. À medida que o peso molecular aumenta, a resina se torna mais rígida, mais dura e mais resistente a produtos químicos, porém, é mais difícil moldá-la com seções de paredes finas. Para paredes finas, escolha uma resina de peso molecular baixo; para melhor desempenho, escolha uma com peso molecular mais alto. Polímeros cristalinos tendem a ter melhor resistência química, maior estabilidade em alta temperatura e melhor resistência à fluidez do que os amorfos. Para transparência, o polímero deve ser amorfo; cristalinidade parcial oferece translucidez. Os polímeros mais transparentes são acrílicos, PC, PS e PET.

Alguns polímeros cristalizam mais rapidamente do que outros: polietilenos cristalizam com rapidez, mas poliésteres cristalizam mais lentamente – permanecem amorfos sob taxas de resfriamento normais. Polímeros cristalinos têm um ponto de fusão mais alto, que deve ser ultrapassado se quisermos moldá-los. Polímeros amorfos, não; em vez disso, amolecem progressivamente e se tornam mais fluidos à medida que a temperatura ultrapassa a de transição do vidro; eles têm de ser aquecidos acima dessa temperatura para extrusão e moldagem por injeção. A força de processamento exigida para gerar fluidez diminui lentamente à medida que a temperatura ultrapassa a de transição do vidro. Polímeros amorfos têm

Polímeros termoplásticos

Acrlonitrila butadieno estireno (ABS)
 Celulose
 Ionômeros
 Poliamida (náilon, PA)
 Policarbonato (PC)
 Politertercetona (PEEK)
 Polietileno (PE)
 Polimetilmetacrilato (PMMA)
 Polioximetileno (POM)
 Polipropileno (PP)
 Poliestireno (PS)
 Politetrafluoretileno (PTFE)
 Polivinilcloro (tpPVC)
 Poliuretanos (tpPU)
 Poliésteres (PET, PETE, PBT)

mais resistência ao impacto e taxa de encolhimento no molde mais baixa. Polímeros semicristalinos têm taxa de encolhimento mais alta por causa da mudança de volume ocorrida na cristalização.

Orifícios e nervuras reduzem o efeito do encolhimento em uma peça termoplástica. Áreas próximas da canaleta de entrada do material tendem a encolher menos do que áreas mais afastadas. A taxa de encolhimento aumenta com a espessura das paredes e diminui com pressões de moldagem mais altas. Polímeros preenchidos com fibras encolhem menos na direção do fluxo porque as fibras se alinham nessa direção; o encolhimento na direção do contrafluxo é duas ou três vezes maior do que na direção do fluxo. Altas temperaturas de serviço podem causar encolhimento em alguns materiais semicristalinos. Reagentes ou aditivos são usados para definir certas propriedades dos compósitos como densidade, cor, retardamento de chamas/fumaça, resistência à umidade e estabilidade dimensional. A maioria dos termoplásticos pode ser reciclada.

Termofixos

Se você for do tipo “faça você mesmo”, certamente tem Araldite em sua caixa de ferramentas – dois tubos, um deles com uma resina pegajosa, o outro com um endurecedor ainda mais pegajoso. Se os misturarmos e aquecermos, eles reagem e produzem um polímero rígido, resistente e durável, que se fixa a qualquer coisa à qual for aplicado. A Araldite é o termofixo típico – resinas que se polimerizam quando catalisadas e aquecidas; quando são aquecidas novamente, não derretem – se degradam. Os termofixos comuns são apresentados na tabela ao lado. O primeiro termofixo comercial foi a Baelite, nome comercial de uma resina fenólica (baquelite, em português). Os termofixos poliuretanos são produzidos em maior volume; os poliésteres vêm em segundo lugar; fenólicos, epóxis e silicões em seguida, e – nenhuma surpresa – o custo aumenta na mesma ordem. Os epóxis são sistemas de duas partes que – quando misturados – provocam uma reação levemente exotérmica com ligações cruzadas. Os fenólicos produzem ligações cruzadas com a aplicação de calor ou combinação de calor e pressão. A vulcanização da borracha, catalisada pela adição de enxofre, pode transformar a borracha macia de uma luva de látex no sólido rígido da ebonite, dependendo do nível de ligações cruzadas. Uma vez conformados, os termofixos não podem sofrer conformação novamente.

Os termofixos têm mais estabilidade dimensional do que os termoplásticos; são usados onde é exigida resistência a alta temperatura e pouca ou nenhuma fluidez. A maioria é dura e rígida, mas podem também ser macios e flexíveis (por exemplo, a borracha natural e a borracha sintética, como já descrito). Fenólicos são usados principalmente onde são necessárias aplicações que devem obedecer a tolerâncias rigorosas, poliésteres (muitas vezes combinados com fibras de vidro), onde o que se quer é alta resistência e baixo encolhimento.

Os termofixos são conformados por moldagem a compressão, moldagem por transferência de resina, moldagem por injeção, pultrusão e fundição. Reproduzem o acabamento do molde e são relativamente livres de linhas de fluxo e marcas de escoamento, dependendo do desenho do molde – acabamentos de alto brilho, acetinados ou obtidos por jato de areia são

Polímeros termofixos

Epóxi
Fenólicos
Poliéster
Poliuretano (tsPU)
Cloreto de polivinila (tsPVC)

possíveis, e também aceitam a moldagem de letreiros em alto-relevo. A moldagem pode ser adaptada a baixo volume de produção com a utilização de métodos de baixo custo; mas volumes de produção mais altos, até um milhão ou mais, só são econômicos com moldes caros, que permitem aquecimento, resfriamento e extração rápidos. Fenólicos só podem ser moldados em preto ou marrom; compostos de ureia, melamina, alquídicos e poliéster estão disponíveis em uma gama mais ampla de cores. A fluidez de alguns termofixos antes da moldagem permite que eles adquiram detalhes delicados e penetrem entre fibras para criar compósitos. A maioria dos compósitos de polímeros de alto desempenho tem matrizes de materiais termofixos. Compostos de moldagem de pasta (massa) e moldagem de chapa (DMC e SMC) usam poliésteres; carbono ou vidro enrolado em filamento usam epóxis como matriz para obter o melhor desempenho de todos. Termofixos não podem ser reciclados.

Elastômeros

Elastômeros eram originalmente denominados “borrachas” porque podiam apagar marcas de lápis – mas essa é a menos importante de suas muitas propriedades notáveis e úteis. Diferentemente de qualquer outra classe de sólido, os elastômeros tendem a preservar sua forma quando são estirados – alguns até cinco ou mais vezes o seu comprimento original – e voltam a ela quando liberados. Isso permite conformabilidade – daí sua utilização em vedações e gaxetas. Elastômeros de alto índice de amortecimento recuperam a forma lentamente; os de baixo índice de amortecimento retornam repentinamente, devolvendo a energia absorvida no estiramento – daí sua utilização em molas, catapultas e objetos que quicam. A conformabilidade dá aos elastômeros alto coeficiente de atrito em superfícies ásperas, parte da razão (além do conforto) por que são utilizados em pneus de veículos e calçados. Elastômeros são facilmente transformados em espumas, o que oferece o caráter confortável das almofadas. Como espumas, sua capacidade de se conformar a qualquer formato pressionado contra eles é ainda maior.

Quase todos os sólidos de engenharia têm módulos de elasticidade (medida de rigidez) entre 1 e 1000 GPa. Elastômeros são muito menos rígidos – entre 0,0001 e 1 GPa. Essa baixa rigidez, sua capacidade de se estirar e reter sua forma original derivam de sua estrutura. As moléculas em um elastômero são longas cadeias de carbono ligadas uma à outra (ou, em silicões, cadeias de silício-oxigênio) com hidrogênio, nitrogênio, cloro ou flúor ligados nas laterais. A ligação entre os átomos de carbono para formar a cadeia é forte, mas a força de atração entre os ramos laterais de uma única molécula é fraca – de fato, à temperatura ambiente, essas ligações molécula a molécula em um elastômero se dissolvem. Nesse estado, o elastômero é um líquido muito viscoso, suas moléculas estão emaranhadas como um prato de espaguete cozido, e ele pode ser moldado. Então, é curado; a cura cria ligações fortes aleatórias entre moléculas, congelando o emaranhado em sua forma moldada. Grande parte do comprimento de qualquer molécula ainda pode deslizar sobre suas vizinhas, permitindo estiramento; porém, quando liberadas, os pontos de ligação amplamente espaçados puxam o emaranhado de volta à sua forma original. No caso da borracha natural,

Elastômeros

- Elastômeros acrílicos
- Borrachas butílicas (nr)
- Elastômeros clorados (Neoprene)
- Etileno-propileno (EPDM)
- Etilenovinilacetato (EVA)
- Elastômeros de fluorcarbono (Viton)
- Isopreno
- Borracha natural
- Nitrila (NBR, buna-n)
- Elastômeros de polibutadieno
- Elastômeros de polissulfeto
- Silicone
- Estireno-butadieno (SBS)
- Elastômeros termoplásticos (TPE, TPO)

Polímeros que são espumados

- Fenólicos
- Poliétileno
- Polipropileno
- Poliestireno
- Poliuretano



Quer reciclar?

Então esses símbolos são importantes. Polímeros são difíceis de identificar. Essas marcas identificam os seis polímeros mais comuns.

a cura é realizada por aquecimento com enxofre (“vulcanização”); em borrachas sintéticas o processo de cura é mais complexo, mas o efeito é o mesmo. Isso significa que os elastômeros são termofixos – uma vez curados, não podem ser remoldados, conformados novamente ou reciclados. Um grande problema quando se trata de pneus de automóveis. Pneus são os maiores consumidores isolados de elastômeros; em segundo lugar vêm os calçados, seguidos por roletes industriais, cintos, almofadas, roupas e equipamentos esportivos. Elastômeros são processados por fundição, calandragem, extrusão e espumação.

Há provavelmente mais de 1.000 graus de elastômeros. Os mais simples contêm somente carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio (elastômeros hidrocarbonetos). Tendem a ser vulneráveis a óleo, produtos químicos e radiação UV. Preenchê-los com negro de fumo (fuligem) ajuda a proteger contra UV. Substituir alguns dos átomos de hidrogênio por cloro ou flúor (elastômeros cloro/fluor carbono) contribui para maior estabilidade química. Estabilidade ainda maior é conseguida com a substituição do carbono por silício (elastômeros de silicone), mas o preço também aumenta significativamente. Como já dissemos, elastômeros são termofixos, mas podemos usar artimanhas para fazer com que se comportem, até certo ponto, como termoplásticos. Misturar ou copolimerizar moléculas de elastômero com um termoplástico como o Polipropileno, PP, pode resultar – se corretamente realizado – em grumos separados de elastômero mantidos juntos por uma película de PP (Santoprene). O material se comporta como um elastômero, mas se aquecido de modo a derreter o PP, pode ser moldado novamente e até reciclado.

Notas de design

As atitudes em relação aos polímeros – plásticos – mudaram nos últimos 70 anos. Na década de 1930, quando a baquelite já estava estabelecida, e celofane, PVC, Poliestireno, Plexiglas e náilons foram lançados, a liberdade de forma e cor desses materiais inspiraram jovens designers. Na década de 1950, eles eram abundantes e baratos, e o baixo custo dos materiais, bem como o custo de seu processamento, levaram a uma era de produtos descartáveis, de design ruim, que deram má fama aos plásticos. Entretanto, desde 1970, a utilização de polímeros em roupas, calçados, produtos domésticos e sistemas de transporte de alta qualidade criou um mercado atendido por designers inovadores que exploraram a imensa gama de formas, cores, acabamentos superficiais, translucidez, transparência, rigidez e flexibilidade dos polímeros modernos. Sua combinação com revestimentos e fibras (vidro, carbono, Kevlar) tem produzido uma gama de materiais leves com rigidez e resistência comparáveis às de metais, o que permitiu que penetrassem nos setores automobilístico, aeroespacial e marítimo.

Polímeros são mais conhecidos como fibras (náilon e fio de poliéster, cordas de polipropileno), películas (película aderente, sacolas de polietileno), peças inteiriças moldadas por compressão (móveis de plástico para jardins, carcaças de computadores) e espuma (embalagem de poliestireno, capacetes de bicicleta). Fibras de polímeros são muito mais fortes e mais rígidas do que seu equivalente em forma bruta por que o processo de repuxamento pelo qual são fabricadas orienta as cadeias de polímero ao longo do eixo da fibra.

Assim, as resistências do polipropileno e do polietileno repuxados – e acima de tudo, da aramida repuxada – em relação aos seus pesos, são maiores do que a do aço. Raramente as fibras de polímeros são usadas como tal – elas são mais utilizadas como reforço em resinas poliméricas, tramadas em tecidos ou entrelaçadas para a manufatura de cordas.

A facilidade de moldagem permite formas que, em outros materiais, só poderiam ser obtidas por caros métodos de montagem. Sua excelente usinabilidade permite a moldagem de formas complexas, resultando em fabricação barata de componentes integrados que antes eram formados por montagem de muitas partes. Misturar permite que as propriedades sejam “afinadas” de modo a cumprir requisitos de projeto específicos para rigidez, resistência e capacidade de processamento. Adições menores permitem outros ajustes de propriedades: aditivos que aumentam a plasticidade dão comportamento de couro; aditivos retardadores de chamas reduzem a inflamabilidade. Alguns polímeros, como o PPO, são usados quase exclusivamente em misturas (o PPO é difícil de ser processado sozinho); outros são usados em sua forma “pura”.

Muitos polímeros são baratos, tanto para comprar quanto para conformar. A maioria resiste bem a água, ácidos e álcalis, embora solventes orgânicos ataquem alguns deles. Todos são leves, e muitos são flexíveis. A cor e a liberdade de forma desses materiais permitem design inovador. Termoplásticos podem ser reciclados, e a maioria não é tóxica, embora seus monômeros sejam. As propriedades dos polímeros mudam rapidamente com a temperatura. Até mesmo em temperatura ambiente, muitos se tornam fluidos e mudam lentamente de forma sob carga; e quando resfriados podem se tornar frágeis. Em geral, os polímeros são sensíveis à radiação UV e a ambientes fortemente oxidantes, e precisam de proteção especial. Têm resistência elétrica e resistência dielétrica excepcionalmente boas. Quando espumados resultam em materiais isolantes com condutividade térmica quase tão baixa quanto a do ar sem movimento.

Por serem derivados do petróleo (um recurso não renovável) e difíceis de descartar ao final de sua vida útil (não se degradam facilmente) os polímeros têm sido condenados como agressivos ao meio ambiente. Isso não deixa de ser verdade, mas os problemas atuais podem ser resolvidos. Utilizar petróleo para fabricar polímeros é um uso primário melhor do que apenas queimá-lo como fonte de calor; o calor ainda pode ser recuperado de um polímero ao final de sua vida útil. Há alternativas para o petróleo: insumos primários para polímeros podem ser sintetizados de produtos agrícolas (em especial de amido e açúcar, via metanol e etanol). E termoplásticos – desde que não contaminados – podem ser (e são) reciclados.

Polímeros e compósitos baseados em polímeros são os setores que crescem mais rapidamente no mercado de materiais estruturais e de decoração. A pesquisa de polímeros biodegradáveis e polímeros sintetizados de produtos agrícolas secundários, tais como a lignina, está levando a novas gerações de produtos não agressivos ao meio ambiente. Polímeros com mais estabilidade térmica, rigidez, resistência e tenacidade estão em desenvolvimento. Mais animadora ainda é a crescente capacidade de agregar funcionalidade em polímeros. Polímeros eletroativos podem suportar momento de dipolo elétrico e assim serem influenciados por um campo elétrico, sendo usados

Classes de polímeros

Mais de 95% de todo o consumo de polímeros vêm dessas cinco classes.



Polietileno reciclado



ABS moldado e jateado com esferas

Etileno						
tpPE	elPE	Mistura de PE	Espuma de PE	Fibra de PE	Película de PE	Polipropileno
HDPE	TPO	PE/PP				Espuma de PP
LDPE	EPDM					Mistura de PP
LLDPE	CPE					Fibra de PP
VLDPE	EVA					Película de PP
Ionômeros						

Estireno				
tpPS	elPS	Espuma de PS	Mistura de PS	ABS
HIPS	SEBS			SAN
	SBR			ASA
				Mistura de ABS
				Espuma de ABS

Cloroeto de vinila		
elPVC	tpPVC	Película de PVC

Uretano			
Espuma de PU	tSPU	tpPU	elPU

Ésteres				
tpPoliéster	tsPoliéster	elPoliéster	Fibra de Poliéster	Película de Poliéster
PET	UP	TPES		
PBT				
PETE				

para microfones e alto-falantes. Polímeros óticamente ativos, que emitem luz quando excitados eletricamente, permitem displays de grande área e flexíveis. Polímeros de alta temperatura, embora caros, são suficientemente estáveis, de modo que podem ser usados para tubos múltiplos de distribuição de admissão e outros componentes de motores de combustão.

Há muitos tipos de polímeros e as relações entre eles podem ser confusas. Algumas delas são mostradas na página anterior. O polietileno é a mais simples das poliolefinas, mas mesmo ele pode ser manipulado de vários modos, iniciando como etileno, C₂H₄. Sua polimerização resulta em cadeias de CH₂-CH₂-CH₂-... Dependendo do catalisador, as cadeias podem ser curtas ou longas, lineares ou ramificadas. Uma vez polimerizadas, podem ser misturadas, espumadas e repuxadas em fibras ou películas. Analogamente, quando começarem com propileno, C₃H₆, em vez de etileno, uma diversidade semelhante de polipropilenos pode ser sintetizada.

O poliestireno tem possibilidades igualmente complexas; começa como estireno-etileno, composto químico em que um hidrogênio foi substituído por um anel de benzeno. Pode ser modificado para termoplástico ou elastômero, espumado ou misturado, e, por modificações químicas, transforma-se em ABS e seus derivados.

Também os poliésteres, PVCs e poliuretanos têm muitas possibilidades de combinações; seus limites se sobrepõem aos limites do termoplástico, do elastômero e do termofixo mais do que outras resinas. Os PVCs podem ser termoplásticos ou elastômeros; poliuretanos e poliésteres podem ser qualquer dos três; além disso, o poliuretano pode ser espumado e o poliéster obtido como película ou fibras. Essa diversidade pode confundir, mas a ampla gama de propriedades que ela permite é fonte de grande liberdade para o design.

Compósitos de polímeros

Compósitos são um dos grandes desenvolvimentos de materiais do século XX. Os que têm rigidez e resistência mais altas são feitos de fibras contínuas (vidro, carbono ou Kevlar®, uma aramida) embebidas em uma resina termofixadora (poliéster ou epóxi). As fibras suportam cargas mecânicas, ao passo que o material da matriz transmite as cargas para as fibras e proporciona ductibilidade e tenacidade, além de oferecer proteção contra danos causados pelo manuseio ou pelo ambiente. É o material da matriz que limita a temperatura de serviço e as condições de processamento. Compósitos de poliéster-vidro (GFRPS) são os mais baratos; os de epóxi-carbono (CFRPS) e de Kevlar®/epóxi (KFRPS) são os mais caros. Uma inovação recente é a utilização de termoplásticos como material da matriz, seja na forma de um tramado misto e barato de fibras de vidro e polipropileno (PP) termoconformado por fusão, seja como caras resinas termoplásticas de alta temperatura, por exemplo, PEEK, que permitem compósitos resistentes a alta temperatura e a impacto. Se os CFRPs e GFRPs de fibras contínuas são os reis e rainhas do mundo dos compósitos, a classe trabalhadora é o grupo de polímeros reforçados com material particulado de fibras de vidro ou carbono, ou ainda com partículas (enchimentos) de areia siliciosa, talco ou serragem de madeira. Eles são usados em quantidades muito maiores, frequentemente em produtos tão comuns que a maioria das pessoas não conseguiria adivinhar que são feitos de um compósito: carrocerias e painéis internos de carros, utensílios domésticos, móveis e acessórios. Hoje, seria difícil viver sem eles. As propriedades dos compósitos de fibras longas são fortemente influenciadas pela escolha da fibra e da matriz e pelo modo como são combinadas: a razão fibra/resina, o comprimento da fibra, a orientação da fibra, a espessura do laminado e a presença de agentes de união fibra-resina contribuem para melhorar a ligação. O vidro oferece alta resistência a baixo custo; o carbono tem resistência e rigidez muito altas e baixa densidade; o Kevlar® tem alta resistência e baixa densidade, é retardador de chamas e é transparente a ondas de rádio (diferentemente do carbono). Os poliésteres são as matrizes mais amplamente usadas, visto que oferecem propriedades razoáveis a custo relativamente baixo. As propriedades superiores dos epóxidos e o desempenho sob temperatura das poli-imidas podem justificar sua utilização em certas aplicações, mas elas são caras. A resistência de um compósito cresce com o aumento da razão fibra/resina e com a orientação das fibras paralelamente à direção da carga. Quanto mais longas as fibras, mais eficiente é o reforço em relação às cargas aplicadas, porém, fibras mais curtas são mais fáceis de processar e, por consequência, mais baratas. O aumento da espessura do laminado leva à redução da resistência e do módulo de elasticidade do compósito, visto que há maior possibilidade de vazios aprisionados na trama. Agentes de junção geralmente aumentam a resistência a tração. Condições ambientais afetam o desempenho dos compósitos: carregamentos de fadiga (ou cíclicos), umidade e calor reduzem a resistência permissível.

Notas de design

Compósitos de polímeros podem ser conformados por métodos de molde fechado ou aberto. Todos os métodos de molde fechado produ-

Compósitos de polímeros

CFRP
GFRP
KFRP



Emaranhado de fibras de celulose



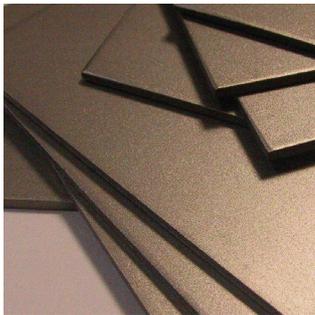
Fibras de vidro revestidas com PTFE

Metais

- Ligas de alumínio
- Ligas de cobre
- Ligas de magnésio
- Ligas de níquel
- Aços-carbono
- Aços de baixa liga
- Aços inoxidáveis
- Ligas de titânio
- Ligas de zinco

zem orientação da fibra na direção paralela às superfícies do molde (para extrusão, a orientação é paralela à superfície interna do orifício do molde). Quanto aos métodos de molde aberto, todos permitem orientação multidirecional da fibra paralelamente ao molde ou mandril, exceto a pultrusão, na qual as fibras são orientadas na direção paralela à superfície laminada e às placas do molde, e a calandragem, na qual elas são paralelas à superfície da chapa. Métodos de assentamento permitem completo controle da orientação da fibra; são usados para grandes produtos fabricados uma vez só e que não exigem alta razão fibra/resina. Laminação e calandragem conformam chapas; pultrusão é usada para produzir formas contínuas de seção transversal constante; e enrolamento de filamentos produz grandes itens ociosos como tubos, tambores e outros recipientes.

Juntas de materiais compósitos de fibra longa são frágeis porque as fibras não as abrangem. Dois ou mais laminados são normalmente unidos por adesivos e, para garantir a ligação adequada, é necessária uma sobreposição de 25 mm no comprimento para juntas de abas simples e duplas ou de 40–50 mm para juntas de tiras, escalonadas e biseladas. Orifícios em laminados reduzem dramaticamente a resistência a falha, dificultando a junção com elementos de fixação. A manufatura de compósitos demanda muita mão de obra. É difícil prever a resistência final e o modo de falha porque criar defeitos é fácil, mas percebê-los ou consertá-los é difícil.



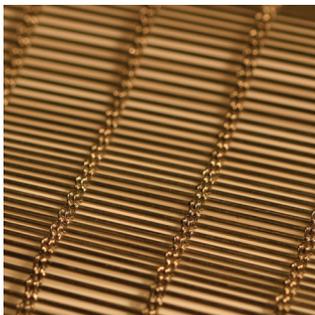
Chapa de titânio

Metais

A maioria dos elementos na tabela periódica é metal. Metais têm elétrons “livres” – elétrons que se movimentam dentro de um campo elétrico –, portanto, conduzem bem a eletricidade, refletem luz – e iluminados por trás são completamente opacos. Os metais usados em design de produtos são, quase sem exceção, ligas. Aços (ferro com carbono e uma profusão de outros elementos de liga para torná-los mais duros, mais tenazes ou mais resistentes à corrosão) são responsáveis por mais de 90% de todos os metais consumidos no mundo; o alumínio vem na sequência, seguido por cobre, níquel, zinco, titânio, magnésio e tungstênio.

Notas de design

Comparados com todas as outras classes de materiais, os metais são rígidos, fortes e duros, porém pesados. Têm pontos de fusão relativamente altos, o que permite que algumas ligas metálicas sejam usadas em temperaturas que chegam a 2200°C. Somente o metal ouro é quimicamente estável como metal; dada uma oportunidade, todos os outros reagirão com oxigênio ou enxofre para formar compostos que são mais estáveis do que o metal em si, tornando-os vulneráveis à corrosão. Há vários modos de evitar ou desacelerar isso até um nível aceitável, porém sempre demandam manutenção. Metais são dúcteis, o que permite que sejam conformados por laminação, forjamento, repuxamento e extrusão; são fáceis de usar com precisão e podem ser unidos de muitas maneiras diferentes. Isso permite uma flexibilidade de design com metais que só agora está sendo desafiada pelos polímeros.



Arame de aço inoxidável tramado

O desenvolvimento de metais e ligas continua. Ligas superplásticas têm uma propriedade exclusiva: sob a forma de chapa, podem ser formadas a vácuo ou termoconformadas como termoplásticos. Ligas memória de forma têm a capacidade de lembrar sua forma inicial mesmo quando muito deformadas, portanto, quicam como borracha – são usadas em termostatos, como molduras para lentes de óculos, armações para sutiãs e pequenos acionadores. Compósitos com matriz de metal (como alumínio com carboneto de silício) ampliam a faixa de propriedades dos metais, normalmente tornando-os mais rígidos, mais leves e mais tolerantes ao calor, mas seu custo limita suas aplicações. Estão surgindo técnicas para espumar metais que têm o potencial para capturar novos mercados. Não obstante, o *status* dos metais tem sido corroído durante as últimas décadas por outros materiais: polímeros em estruturas de pequena escala como utensílios domésticos, compósitos com base de polímero em carros, aeronaves e barcos; e cerâmicas em certas peças de motores e lâminas de corte. Porém, como observa Guy Nordenson, da empresa de engenharia Arup, “O desenvolvimento e a utilização de materiais são historicamente cíclicos. Provavelmente, mais do que ter ficado para trás, o trabalho com metais apenas não é muito divulgado”.

A produção primária de metais faz uso intensivo de energia. Muitos, entre eles alumínio, magnésio e titânio, exigem no mínimo duas vezes mais energia por unidade de peso (ou cinco vezes mais por unidade de volume) do que os polímeros comercializados. Porém, em geral podem ser reciclados, e a energia exigida para tal é muito menor do que a exigida para a produção primária. Alguns são tóxicos, em particular os metais pesados – chumbo, cádmio, mercúrio. Entretanto, alguns são tão inertes que podem ser implantados no corpo humano: aços inoxidáveis, ligas de cobalto e certas ligas de titânio, por exemplo.

Cerâmicas

Cerâmicas são materiais do passado, bem como do futuro. São os mais duráveis de todos os materiais – potes e ornamentos de cerâmica sobrevivem desde 5000 a.C. É a sua durabilidade, em particular em altas temperaturas, que gera o interesse nelas hoje. São excepcionalmente duras (diamante – uma cerâmica – é a mais dura de todas) e podem tolerar temperaturas mais altas do que qualquer metal. Cerâmicas são compostos inorgânicos cristalinos (ou parcialmente cristalinos); incluem as cerâmicas tradicionais, encontrada em utensílios domésticos, bem como as cerâmicas técnicas de alto desempenho. Todas são duras e frágeis, geralmente têm pontos de fusão altos e coeficientes de dilatação térmica baixos e a maioria é bom isolante elétrico. Cerâmicas tradicionais, com base de argila, sílica e feldspato, são macias e fáceis de moldar antes de queimadas; a queima cria uma fase vítrea que liga os outros componentes para criar tijolos, louça de pó de pedra, porcelanas, azulejos e telhas. Cerâmicas técnicas consistem em compostos puros ou quase puros, sintetizados por reações químicas; as mais comuns são alumina, carboneto de silício, nitreto de silício, carboneto de boro, nitreto de boro e carboneto de tungstênio.

Cerâmicas e vidro

- Alumina
- Carboneto de boro
- Carboneto de silício
- Carboneto de tungstênio
- Vidro de silicato de boro
- Vidro de sílica
- Vidro de cal de soda
- Vitrocerâmica



Espuma de alumina



Terracota

Cerâmicas têm, certamente, propriedades únicas. Seus baixos fatores de empacotamento atômico e altos pontos de fusão lhes dão baixo coeficiente de dilatação. As que são puras e completamente cristalinas têm alta condutividade térmica; impurezas e fases vítreas a reduzem muito. Quando perfeitas são extremamente fortes, mas minúsculas falhas, difíceis de evitar, se propagam como trincas quando o material é carregado a tração ou flexão, o que reduz drasticamente sua resistência; todavia, a resistência a compressão permanece alta (8 a 18 vezes mais alta do que a resistência a tração). A resistência a impacto é baixa. Tensões resultantes de choque térmico não são facilmente aliviadas por deformação plástica, portanto, grandes gradientes de temperatura ou choques térmicos podem causar falha.

Notas de design

O tamanho das peças de cerâmica comercial pode abranger desde pequenos componentes como isoladores de velas de ignição até grandes cones frontais para veículos que de reentrada na atmosfera. As altas temperaturas de ignição impedem a moldagem de encaixes de metal em cerâmicas. As formas devem ser mantidas o mais simples possível, com tolerâncias liberais. O encolhimento durante a secagem e a queima pode chegar a 25%. Bordas e quinas devem ter raios generosos, rebaixos e grandes seções não apoiadas devem ser evitados, formas simétricas e paredes de espessura uniforme são melhores, com um ângulo de tração de no mínimo 5 graus.

A maioria das cerâmicas técnicas começa como pós que são prensados, extrudados, moldados por injeção, com a utilização de um aglutinante de polímero. A peça “verde” resultante é usinada ou esmerilhada até a forma desejada, e então queimada (“sinterizada”). Metais podem ser fixados à cerâmica por adesivos, soldagem, brasagem ou encaixe durante a fase de encolhimento (desde que o metal esteja do lado externo, sob tração). Brasagem é mais forte do que adesivos ou soldagem e mais resistente à temperatura, porém, requer um revestimento metalizado como base para a liga de brasagem. Junções vitrificadas ou por difusão permitem unir cerâmica com cerâmica ou metal com cerâmica. A vitrificação pode ser aplicada a cerâmicas para obter uma superfície macia e brilhante; superfícies patinadas também são possíveis.

Cerâmicas tradicionais são muito conhecidas, como tijolos, telhas e ladrilhos, peças para banheiros (vasos sanitários, banheiras, pias) e louça doméstica. Cerâmicas técnicas são usadas como mancais, pás de turbinas, cames, ferramentas de corte, blocos de extrusão, bocais, vedações, filtros, cadinhos e bandejas, isoladores elétricos, substratos e esquadros de calor para circuitos eletrônicos.

Vidro

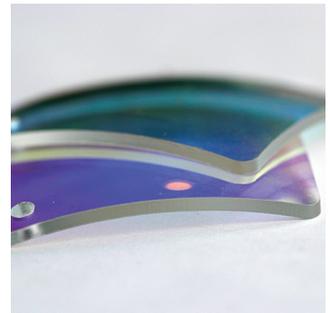
Descoberto pelos egípcios e aperfeiçoado pelos romanos, o vidro é um dos mais antigos materiais feitos pelo homem. Em grande parte de sua longa história era algo que só os ricos possuíam – como contas de vidro, ornamentos e recipientes e, é claro, vidro em utensílios de cerâmica sob a forma de acabamento vitrificado. Sua utilização em janelas começou no século XV, mas só foi amplamente disseminada no século XVII. Agora, é

claro, ele é tão universal e barato que – na forma de garrafas – o jogamos fora. Vidro é uma mistura de óxidos, principalmente sílica, SiO_2 , que não se cristalizam quando resfriados após fusão. Quando puro é límpido como cristal, mas é fácil de colorir com a adição de óxidos metálicos.

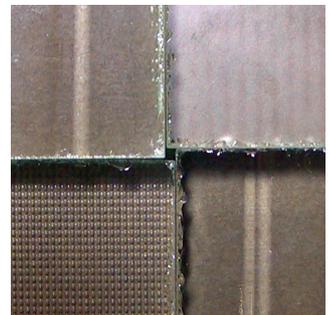
Notas de design

Vidro é formado por prensagem, moldagem por sopro, fundição centrífuga, repuxamento ou laminação e deve ser resfriado a uma taxa controlada para evitar tensões residuais. Pode ser fortalecido por resfriamento rápido de sua superfície ao ar – conhecido como vidro “temperado”; tensões de tração se acumulam no interior do vidro, criando tensões de compressão na superfície, o que aumenta a resistência ao impacto por um fator 4. Bulbos de lâmpadas elétricas são moldados em uma máquina que converte uma tira de vidro que se move rapidamente em até 10000 bulbos por hora. O vidro é unido por vitrificação (fundida), aperto ou adesivos. Um revestimento de prata dá aproximadamente 100% de reflexão da luz visível – o que é usado na maioria dos espelhos. Um revestimento espelhado de ouro pode refletir 90% de irradiação infravermelha.

A adição de óxidos metálicos produz vidro colorido. Níquel dá um matiz púrpura, cobalto dá azul, cromo dá verde, urânio dá amarelo esverdeado, ferro dá verde azulado. A adição de ferro dá um material que pode absorver comprimentos de onda na faixa do infravermelho, de modo que pode absorver radiação de calor. Partículas não metálicas, sem cor (fluoretos ou fosfatos) são adicionadas na proporção de 5–15% para produzir uma opalescência branca translúcida ou quase opaca em vidros e revestimentos de vidro. Vidro fotocromico muda de cor quando exposto a UV (que às vezes esmaece quando o vidro é aquecido); vidro fotossensível passa de límpido a opalescente quando exposto a UV ou aquecido. Vidro de filtro protege contra luz intensa e radiação UV – é usado em visores para soldagem. Revestimentos dicroicos e laminações leves dão modulação de cor.



Vidro com revestimento dicroico



Vidro texturizado

Leitura adicional

Amato, I. *Stuff, the Materials the World Is Made Of*. Nova York: Harper Collins, 1997. (Amato é um redator que escreve sobre ciência em jornais e o faz excepcionalmente bem. Esse livro é escrito em estilo jornalístico – fácil de ler, destaca o potencial, grande parte dele ainda não realizado, e depende muito de entrevistas com quem concordou em dá-las.)

Braddock, S. E. e O'Mahony, M. *Techno Textiles: Revolutionary Fabrics for Fashion and Design*. Londres: Thames and Hudson, 1998. (Esse livro apresenta informações sobre têxteis e tecidos de polímeros dadas pela indústria da moda a um público mais amplo de design.)

Cardarelli, F. *Materials Handbook*. Londres: Springer, 1987. (Como um manual de informações técnicas sobre materiais, esse livro apresenta informações sobre metais, semicondutores, supercondutores, cerâmicas, vidros, polímeros, elastômeros, minerais, rochas e madeiras.)

Colling, D. A. e Vasilos, T. *Industrial Materials*, v. I e II. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. (Um conjunto de livros que apresenta uma apresentação resumida de materiais – metais, polímeros, cerâmicas e compósitos.)

Dieter, G. (ed.). *ASM Handbook – Volume 20 Materials Selection and Design*. Materials Park: ASM International, 1997. (Um dos mais recentes de uma série de livros que abrange uma ampla gama de dados técnicos sobre materiais, agora disponível em CD para facilitar busca aleatória e dirigida.)

Emsley, J. *Molecules at an Exhibition*. Oxford: Oxford University Press, 1998. (Redação popular sobre ciências em seu melhor aspecto: inteligível, preciso, simples e claro. O livro é excepcional para sua faixa. A mensagem é que as moléculas – às vezes significando materiais – influenciam nossa saúde, as coisas que fazemos e as coisas que usamos.)

Fiell, C. e Fiell, P. *Industrial Design A–Z*. Colônia: Taschen GmbH, 2000. (Um resumo dos principais designers e empresas de design que inclui perfis de estilos particulares de design e materiais que tiveram significativa influência: alumínio, baquelite, fibra de carbono, cerâmicas, cromo, plásticos, compensados de madeira, Pyrex, borracha e metal tubular.)

Harper, C. A. *Handbook of Materials for Product Design*. Nova York: McGraw-Hill, 1999. (Esse manual contém muitos detalhes técnicos de aços, alumínio, titânio, polímeros, compósitos, borracha natural e sintética, elastômeros, cerâmicas e vidros; há também algumas informações sobre processos superficiais – revestimentos de metal, em particular –, junção de polímeros e elastômeros e materiais recicláveis.)

Lesko, J. *Industrial Design: Materials and Manufacturing Guide*. Nova York: John Wiley & Sons, 1999. (Um resumo de materiais e processos que são do interesse de designers industriais, focalizado nas informações técnicas relevantes para cada um.)

Polietileno (PE)

O que é? Polietileno ($(CH_2)_n$), sintetizado pela primeira vez em 1933, parece a mais simples das moléculas, mas a quantidade de modos possíveis de ligação das unidades $-CH_2-$ é grande. É a primeira das poliolefinas, os polímeros termoplásticos brutos responsáveis pela fração dominante de todo o consumo de polímeros. O polietileno é inerte e extremamente resistente à água doce e salgada, alimentos, e à maioria das soluções a base de água. Por isso é amplamente utilizado em produtos domésticos e recipientes para alimentos.

Notas de design O PE é produzido comercialmente como película, placa, haste, espuma e fibra. A fibra de PE repuxada tem excepcionais rigidez e resistência mecânicas, exploradas em utilizações geotexteis e estruturais. O polietileno é barato e particularmente fácil de moldar e fabricar. Aceita uma ampla gama de cores, pode ser transparente, translúcido ou opaco, tem um toque agradável, ligeiramente de cera, pode ser texturizado ou revestido com metal, mas é difícil de imprimir. É um bom isolante elétrico com baixa perda dielétrica, portanto, adequado para recipientes que vão ao forno micro-ondas.

Usos típicos Recipientes de óleo, cones de sinalização, garrafas de leite, brinquedos, engradados de cerveja, embalagem de alimentos, películas para acondicionamento a vácuo, tubos de apertar, roupas descartáveis, sacolas de plástico, *Tupperware*, tábuas para cortar carne, revestimento de papéis, isolamento de cabos, juntas artificiais e como fibra – cordas de baixo custo e reforço para fita adesiva de embalagem.

Materiais concorrentes Polipropileno, Poliestireno, ABS, SAN, EVA, ePVC, alumínio como folha e embalagem; folha de aço para latas.

O ambiente O PE obedece às normas da FDA – na verdade, é tão atóxico que pode ser inserido no corpo humano (válvulas coronárias, proteção para a junta dos quadris, artérias artificiais). Os processos de manufatura do PE, PP e PVC são relativamente eficientes em relação ao consumo de energia, o que os torna os polímeros comerciais que fazem uso menos intenso de energia. O PE pode ser produzido com recursos renováveis – álcool derivado da fermentação do açúcar ou do amido, por exemplo. Sua produtividade por quilograma ultrapassa em muito a da gasolina ou do óleo combustível, de modo que a produção a partir do petróleo não o deixará em desvantagem no futuro próximo. O polietileno é facilmente reciclado se não for revestido com outros materiais, e – se contaminado – pode ser incinerado e recuperar toda a energia que contém.

Observações técnicas O polietileno de baixa densidade (LDPE), usado para películas e embalagem, tem cadeias ramificadas que não se adensam bem, o que o torna menos denso do que a água. Polietilenos de média densidade (MDPE) e alta densidade (HDPE) têm cadeias mais longas e menos ramificadas, o que os torna mais rígidos e mais resistentes; são usados para recipientes e tubulações. O polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) é menos resistente a solventes orgânicos, porém, mesmo essas deficiências podem ser superadas convertendo-se sua superfície em um fluoropolímero por exposição a gás de flúor. Tratado desse modo (quando então é conhecido como “Super PE”), pode ser usado para tanques de gasolina em carros e resiste a óleo, fluidos de limpeza, cosméticos e a mais corrosiva das substâncias: concentrado de cola. Polietileno de densidade muito baixa (VLDPE) é semelhante a EVA e a PVC plasticizado.



Atributos do polietileno

Preço, \$/kg	1,10–4,00
Densidade, Mg/m ³	0,92–1,4

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,03–1,4
Alongamento, %	10–1400
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,40–5,16
Dureza Vickers, H _v	5–8
Tensão de escoamento, MPa	8–31
Temperatura de serviço, °C	–40–100
Calor específico, J/kg·K	1559–1916
Condutividade térmica, W/m·K	0,12–0,50
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	106–450

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	104–114
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	3–7
Abafado (0), Ressonante (10)	1–3
Macio (0), Duro (10)	5–7
Quente (0), Frio (10)	4–5
Brilho, %	5–136

Características

(em relação a outros polímeros)

Fácil de moldar
Durável
Baixo custo



Polipropileno (PP)

O que é? Polipropileno, PP, produzido comercialmente pela primeira vez em 1958, é o irmão mais novo do polietileno – uma molécula muito semelhante com preço, métodos de processamento e aplicação também semelhantes. Como o PE, também é produzido em quantidades muito grandes (mais de 30.000.000 t por ano em 2000), quantidade que cresce aproximadamente 10% por ano, e também como o PE, os comprimentos de suas moléculas e ramificações laterais podem ser ajustados por catalisadores inteligentes, o que dá controle preciso de resistência ao impacto e das propriedades que influenciam a moldagem e o repuxamento. Em sua forma pura, o Polipropileno é inflamável e se degrada à luz do sol. Retardadores de chama fazem com que queime lentamente e estabilizadores lhe dão extrema estabilidade, tanto em relação à radiação UV quanto em relação à água salgada e à maioria das soluções aquosas.

Notas de design O PP grau padrão é barato, leve e dúctil, mas tem baixa resistência. É mais rígido do que o PE e pode ser usado em temperaturas mais altas. As propriedades do PP são semelhantes às do HDPE, mas ele é mais rígido e funde a uma temperatura mais alta (165–170°C). A rigidez e a resistência podem ser melhoradas reforçando-o com vidro, greda ou talco. Quando repuxado como fibra, o PP tem resistência e resiliência excepcionais; isso, junto com sua resistência à água, o torna atraente para cordas e tecidos. É mais fácil de moldar do que o PE, tem boa transparência e pode aceitar uma gama de cores mais vívida. Avanços em catalisadores prometem novos copolímeros de PP com combinações mais atraentes de tenacidade, estabilidade e facilidade de processamento. Fibras monofilamento e fio ou corda multifilamento têm alta resistência à abrasão e são quase duas vezes mais fortes do que fibras de PE.

Usos típicos Cordas, polímeros de engenharia em geral, dutos de ar de automóveis, acondicionamento de pacotes em prateleiras e renovadores de ar, mobiliário de jardim, tanques de máquinas de lavar roupa, invólucros de pilhas úmidas, tubulação e conexões de tubulação, engradados para garrafas de cerveja, estruturas de cadeiras, dielétricos de capacitores, isolamento de cabos, chaleiras, para-choques de carros, vidros à prova de estilhaços, engradados, malas de viagem, grama artificial, roupas íntimas térmicas.

Materiais concorrentes Polietileno, Poliestireno, ABS, SAN; alumínio em folha e para embalagem, chapas de aço para latas.

O ambiente O PP é excepcionalmente inerte e fácil de reciclar, e pode ser incinerado para recuperar a energia que contém. O processo de manufatura do PP, assim como o do PE e do PVC é relativamente eficiente em relação ao consumo de energia, o que os torna os polímeros comerciais que fazem o menor uso de energia. Sua produtividade por quilograma ultrapassa em muito a da gasolina ou do óleo combustível, de modo que sua produção a partir do petróleo não o deixará em desvantagem no futuro próximo.

Observações técnicas Os muitos graus diferentes do polipropileno pertencem a três grupos básicos: homopolímeros (polipropileno, com uma faixa de pesos moleculares e, conseqüentemente, de propriedades),

Atributos do polipropileno

Preço, \$/kg	0,90–1,00
Densidade, Mg/m ³	0,89–0,92

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,90–1,55
Alongamento, %	100–600
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	3–4,5
Dureza Vickers, H _v	6–11
Tensão de escoamento, MPa	20,7–37,2
Temperatura de serviço, °C	–40–120
Calor específico, J/kg·K	1870–1956
Condutividade térmica, W/m·K	0,11–0,17
Dilatação térmica, 10 ^{–6} /K	122–180

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/KG	76–84
Potencial de reciclagem	Médio
Atributos estéticos	
Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	3–4
Macio (0), Duro (10)	6–7
Quente (0), Frio (10)	4
Brilho, %	20–94

Características

(em relação a outros polímeros)

Fácil de moldar
Durável e duro
Baixo custo

copolímeros (produzidos por copolimerização de propileno com outras olefinas como etileno, butileno ou estireno) e compósitos (polipropileno reforçado com mica, talco, vidro moído ou fibra de vidro) que são mais rígidos e resistem melhor ao calor do que os polipropilenos simples.



Poliestireno (PS)

O que é? Em sua forma mais simples o PS é frágil. Suas propriedades mecânicas são dramaticamente melhoradas por mistura com polibutadieno, porém, à custa de transparência ótica. O PS de alto impacto (10% polibutadieno) é muito mais forte mesmo em baixa temperatura (o que significa resistência até -12°C).

Notas de Design O PS vem em três tipos: como o material simples (“PS de uso geral”); como a variante de alto impacto, misturado com polibutadieno; e como espuma de poliestireno, a mais conhecida e mais barata de todas as espumas de polímeros. Todos são aprovados pela FDA para utilização como recipientes e embalagens para guardar alimentos. O PS de uso geral é fácil de moldar. A extrema limpidez, a capacidade de coloração, e o alto índice de refração lhe dão um quê de vidro, mas ele é frágil e fácil de trincar (lembre-se das caixas de CDs). É usado quando o que se procura é atratividade ótica e baixo custo, e quando a carga mecânica é leve: cosméticos compactos, vidros transparentes, porém descartáveis, cassetes de todos os tipos. Poliestirenos de médio e alto impacto trocam suas propriedades óticas pelas mecânicas. O PS de médio impacto, translúcido, aparece em comutadores e disjuntores elétricos, cabides e pentes. O PS de alto impacto – uma mistura de PPO e PS – é opaco, mas é rígido e enfrenta melhor baixas temperaturas do que a maioria dos plásticos; é encontrado em interiores de refrigeradores e freezers, e em travessas de alimentos, como as de margarina e iogurte. O PS pode ser espumado até uma densidade muito baixa (aproximadamente um terço da de todos os poliestirenos em espuma). Essas espumas têm baixa condução térmica e são baratas, e, portanto, são usadas para isolamento em casas, camisas para caldeiras a vapor, isolamento para copos descartáveis. São esmagadas sob cargas que não danificam objetos delicados (como aparelhos de TV ou o corpo humano), o que as torna boas para embalagens.

Usos típicos Copos descartáveis; acessórios de iluminação; brinquedos; modelos; em forma expandida – embalagem, isolamento térmico e telhas, gabinetes de aparelhos de TV, azulejos; travessas descartáveis; móveis; peças e recipientes moldados; caixas de CD, vidro descartável, lâminas de barbear, copos para bebidas quentes.

Materiais concorrentes Polietileno de alta densidade, polipropileno e papel revestido com polímero.

O ambiente A inflamabilidade da espuma de PS, e a utilização de CFCs como agentes de sopro no processo de espumação, já foi causa de preocupação. Novos retardadores de chamas permitem que as espumas de PS obedeçam aos padrões atuais da segurança contra incêndios, e os agentes de sopro CFC vêm sendo substituídos por pentano, CO_2 ou HFCs que não causam danos à camada de ozônio. O PS pode ser reciclado. O monômero, estireno, é irritante para os olhos e a garganta, mas nenhuma molécula de estireno sobrevive no polímero.

Observações técnicas Poliestireno, PS, é – como PE e PP – um membro da família das poliolefinas de termoplásticos moldáveis. No lugar de um dos átomos de H do polietileno ele tem um anel de benzeno – C_6H_5 . Isso resulta em uma molécula encaroçada que não se cristaliza, e o

Atributos do poliestireno

Preço, \$/kg	1,30–1,60
Densidade, Mg/m^3	1,04–1,05

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,28–3,34
Alongamento, %	1,2–3,6
Tenacidade à fratura, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	0,7–1,1
Dureza Vickers, H_v	9–16
Tensão de escoamento, MPa	28,72–56,2
Temperatura de serviço, $^{\circ}\text{C}$	–18–100
Calor específico, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	1691–1758
Condutividade térmica, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	0,12–0,13
Dilatação térmica, $10^{-6}/\text{K}$	90–153

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	101–110
Potencial de reciclagem	Baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7
Abafado (0), Ressonante (10)	4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4
Brilho, %	9–96

Características

(em relação a outros polímeros)

Oticamente límpido	
Fácil de espumar	
Baixo custo	

material resultante é transparente com alto índice de refração. O anel de benzeno absorve luz UV, o que é explorado na tela de proteção de PS para luzes fluorescentes, mas isso também faz com que o polímero perca a cor quando exposto ao sol.



Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O que é? O ABS é rígido, resiliente e fácil de moldar. Normalmente é opaco, se bem que agora alguns graus podem ser transparentes, e podem ser coloridos em cores vividas. Ligas ABS-PVC são mais rígidas do que o ABS padrão e, em graus autoextintores, são usadas para carcaças de ferramentas elétricas.

Notas de design O ABS tem a mais alta resistência ao impacto de todos os polímeros. É bom para colorir. É possível obter metálicos integrais (como o Plastics'Magix da GE). O ABS é resistente à radiação UV para aplicação ao ar livre se forem adicionados estabilizadores. É higroscópico (pode ser necessário secá-lo ao forno antes da termoconformação) e pode ser danificado por óleos de usinagem derivados de petróleo. O ASA (acrílico-estireno-acrilonitrila) tem brilho muito alto; sua cor natural é branco-gelo, mas há outras disponíveis. Tem boa resistência química e à temperatura e alta resistência ao impacto em baixas temperaturas. Há graus UL aprovados disponíveis. O SAN (estireno-acrilonitrila) tem os bons atributos de processamento do poliestireno, porém, mais resistência, mais rigidez e mais resistência a produtos químicos e ao calor. Se adicionada fibra de vidro, a rigidez pode ser aumentada dramaticamente. É transparente (acima de 90% na faixa da luz visível, porém, menor na faixa da luz UV) e tem boa cor. Dependendo da quantidade de acrilonitrila adicionada, pode variar de branco-água a amarelo-pálido, mas sem revestimento protetor, a luz do sol provoca amarelamento e perda de resistência, retardados por estabilizadores UV. Os três podem ser extrudados, moldados por compressão ou conformados em chapas que então são termoconformadas a vácuo. Podem ser unidos por soldagem ultrassônica ou de chapa quente, ou ligados com poliéster, epóxi, isocianato ou adesivos nitrilofenólicos.

Usos típicos ABS: carcaças de computadores e aparelhos de TV, telefones, misturadores de alimentos, aspiradores de pó, banheiras, bandejas de chuveiros, tubos, bagageiros, chuveiros, porta-cassetes, peças automotivas, capacetes de segurança, Legos, mouses de computador, trincos, aparelhos de barbear, cadeiras. SAN: carcaças de telefones, tigelas para processamento de alimentos, seringas médicas, tigelas para misturar, béquers, filtros de café, cassetes, invólucros de baterias industriais, escovas de dentes, embalagem de cosméticos, louças, recipientes para alimentos. ASA: painéis e botões de acionamento de eletrodomésticos, brinquedos, instrumentos médicos, espelhos retrovisores, mesas e cadeiras de jardim, acessórios para mangueiras, ferramentas de jardinagem, caixas de correio, cascos de barcos, pranchas de windsurf.

Materiais concorrentes Polietileno de alta densidade, polipropileno, borracha butílica, náilon.

O ambiente O monômero acrilonitrila é um material perigoso, quase tão venenoso quanto o cianeto. Uma vez polimerizado com estireno torna-se inofensivo. Alguns graus de ABS obedecem às regras da FDA e podem ser reciclados.

Observações técnicas O ABS é um terpolímero – um polímero obtido pela copolimerização de três monômeros: acrilonitrila, butadie-

Atributos do ABS

Preço, \$/kg	1,50–2,80
Densidade, Mg/m ³	1,01–1,21

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	1,1–2,9
Alongamento, %	1,5–100
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,2–4,2
Dureza Vickers, H _v	6–15
Tensão de escoamento, MPa	18,5–51
Temperatura de serviço, °C	-18–90
Calor específico, J/kg·K	1386–1919
Conductividade térmica, W/m·K	0,18–0,33
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	84,6–234

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	95–104
Potencial de reciclagem	Médio

Atributos estéticos

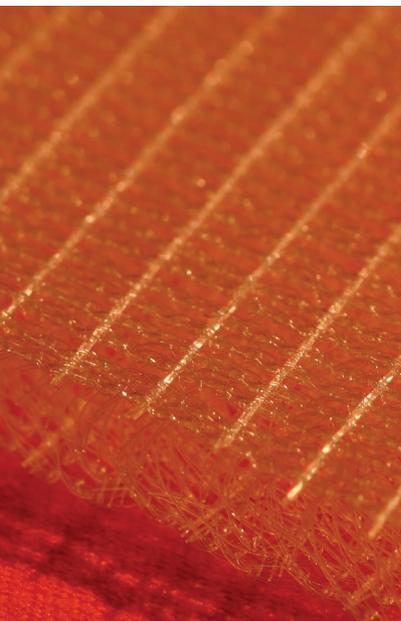
Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	3–4
Macio (0), Duro (10)	6–7
Quente (0), Frio (10)	4–5
Brilho, %	10–96

Características

(em relação a outros polímeros)

Durável e duro
Fácil de colorir
Fácil de moldar

no e estireno. A acrilonitrila dá resistência térmica e química, o butadieno semelhante à borracha dá ductilidade e resistência, o estireno dá uma superfície brilhosa, fácil de usinar e a custo mais baixo. No ASA, o componente butadieno (que oferece baixa resistência à radiação UV) é substituído por um éster acrílico. Sem a adição de butil, o ABS torna-se SAN – um material semelhante com menor resistência ao impacto e menor tenacidade.



Poliamida (PA), náilon

O que é? Em 1945, mal a guerra tinha acabado, os dois luxos mais apreciados eram cigarros e meias de náilon. O náilon (PA) pode ser repuxado em fibras tão finas quanto seda, e foi muito utilizado como seu substituto. Hoje, fibras mais novas corroeram a sua dominância no design de vestimentas, mas cordas de fibras de náilon, e náilon como reforço para borracha (em pneus de carros) e outros polímeros (PTFE, para telhados) continuam importantes. O náilon é usado no design de produtos para carcaças, molduras e cabos duros, e – reforçado com vidro – como mancais e outras peças que suportam cargas. Há muitos graus de náilon (Náilon 6, Náilon 66, Náilon 11, ...) cada um com propriedades ligeiramente diferentes.

Notas de design Náilons são duros, fortes e têm baixo coeficiente de atrito. Têm propriedades para uso em ampla faixa de temperatura (-80–120°C). São fáceis de moldar por injeção, usinar e acabar, podem ser ligados termicamente ou por ultrassom, ou unidos com adesivos de epóxi, fenolfomaldeídos ou poliéster. Certos graus de náilon podem ser eletro galvanizados permitindo metalização e a maioria aceita muito bem a impressão. Uma mistura de PPO/náilon é usada em paralamas e peças externas da carroceria de automóveis. Fibras de náilon são fortes, duras, elásticas, brilhantes, e são fáceis de enrolar em carretéis ou de misturar com outros materiais. Náilons absorvem até 4% de água; para evitar alterações dimensionais, eles devem ser condicionados antes da moldagem, o que permite que entrem em equilíbrio com umidade atmosférica normal. Náilons têm pouca resistência a ácidos fortes, agentes oxidantes e solventes, em particular em graus transparentes.

Usos típicos Engrenagens para serviços leves, buchas, rodas dentadas e mancais; carcaças para equipamentos elétricos, lentes, recipientes, tanques, tubulação, rodízios para móveis, conexões hidráulicas, protetores para pneus de bicicleta, garrafas de ketchup, cadeiras, cerdas de escovas de dentes, puxadores, cabos e trincos, mancais, embalagem de alimentos. Náilons são usados como adesivos de fusão a quente para encadernação de livros; como fibras – cordas, linhas de pesca, tapetes, estofamento de automóveis e meias; como fibras de aramida –, cabos, cordas, vestimenta de proteção, sacos para filtragem de ar e isolamento elétrico.

Materiais concorrentes Polipropileno, poliéster e ABS.

O ambiente Náilons não têm nenhum efeito tóxico conhecido, embora do ponto de vista biológico não sejam inteiramente inertes. Náilons são derivados de petróleo, embora inativos, mas isso não os deixará em desvantagem no futuro próximo. Com refinamento por catálise de poliolefinas, os náilons enfrentam competição cerrada de polímeros menos caros.

Observações técnicas A densidade, rigidez, resistência, ductibilidade e tenacidade dos náilons encontram-se todas próximas da média para polímeros não reforçados. A condutividade térmica e a dilatação térmica estão um pouco abaixo da média. Reforço com mineral, vidro moído ou fibra de vidro aumenta o módulo de elasticidade, a resistência e a densidade. O náilon semicristalino é distinguido por um código numérico para a classe do material, que indica o número de átomos de carbono entre dois átomos de nitrogênio na cadeia molecular. O material amorfo é transparente, o material semicristalino é branco opala.

Atributos do náilon

Preço, \$/kg	2,90–11,50
Densidade, Mg/m ³	1–1,42

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,67–4,51
Alongamento, %	4–1210
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,58–8,03
Dureza Vickers, H _v	6–28
Tensão de escoamento, MPa	20,7–101,6
Temperatura de serviço, °C	-80–120
Calor específico, J/kg·K	1421–2323
Condutividade térmica, W/m·K	0.18–0.35
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	50.4–216

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	110–120
Potencial de reciclagem	Médio

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	3–4
Macio (0), Duro (10)	6–7
Quente (0), Frio (10)	4–5
Brilho, %	65–150

Características

(em relação a outros polímeros)

Forte
Duro
Durável

Polimetilacrilato (PMMA), acrílico

O que é? Quando pensar em PMMA, pense em transparência. Acrílico, ou PMMA, é o termoplástico que mais se assemelha ao vidro em transparência e resistência às intempéries. O material tem uma longa história: descoberto em 1872, comercializado em 1933, sua primeira aplicação importante foi na proteção das carlingas dos bombardeiros durante a Segunda Guerra Mundial.

Notas de design Acrílico, ou PMMA, é duro e rígido, tanto quanto pode ser um polímero, fácil de polir, mas sensível a concentrações de tensão. Compartilha com o vidro certa fragilidade, algo que pode ser superado por mistura com borracha acrílica para resultar uma liga de alto impacto (HIPP-MA). PVC pode ser misturado com PMMA para a produção de placas duras e duráveis. O acrílico está disponível em placas, hastes ou tubos e pode ser conformado por fundição ou extrusão. A fundição celular usa placas de vidro e gaxetas como molde; permite a fundição de painéis límpidos e coloridos de até 4 polegadas de espessura. Na extrusão, grânulos de polímero fundido são forçadas a atravessar uma matriz para produzir uma ampla variedade de formas, de até 0,25 polegadas de espessura por chapa. Chapas de PMMA límpidas e coloridas se prestam a termoconformação, o que permite processamento barato. Um processo híbrido de manufatura das chapas, a fundição contínua, combina os benefícios físicos da fundição celular com a eficiência em custo da extrusão. Chapas obtidas por extrusão e fundição contínua têm mais tolerância de espessura do que chapas obtidas por fundição celular. O PMMA pode ser unido com epóxi, alfacianoacrilato, poliéster ou adesivos nitrilofenólicos. Risca com muito maior facilidade do que o vidro, mas isso pode ser parcialmente contornado com revestimentos.

Usos típicos Lentes de todos os tipos; carlingas e janelas de aeronaves; sinalização; banheiras residenciais; embalagens; recipientes; componentes elétricos; materiais de desenho; cabos de ferramentas; óculos de segurança; iluminação, lanternas traseiras de automóveis, cadeiras, lentes de contato, janelas, cartazes publicitários, produtos de dissipação estática; CDs.

Materiais concorrentes Policarbonato, Poliestireno, PVC, PET.

O ambiente Acrílicos são atóxicos e recicláveis.

Observações técnicas Polímeros são verdadeiramente transparentes somente se forem completamente amorfos – isto é, não cristalinos. A forma encaroçada da molécula de PMMA garante uma estrutura amorfa, e sua estabilidade oferece boa resistência a intempéries. O PMMA é atacado por ésteres, cetonas, ácidos e hidrocarbonetos, e tem baixa resistência a ácidos ou bases fortes, solventes e acetona.



Atributos do acrílico

Preço, \$/kg	1,70–2,40
Densidade, Mg/m ³	1,16–1,22

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,24–3,8
Alongamento, %	2–10
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,7–1,6
Dureza Vickers, H _v	16–21
Tensão de escoamento, MPa	53,8–72,4
Temperatura de serviço, °C	-50–100
Calor específico, J/kg·K	1485–1606
Condutividade térmica, W/m·K	0,08–0,25
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	72–162

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	97–105
Potencial de reciclagem	Baixo

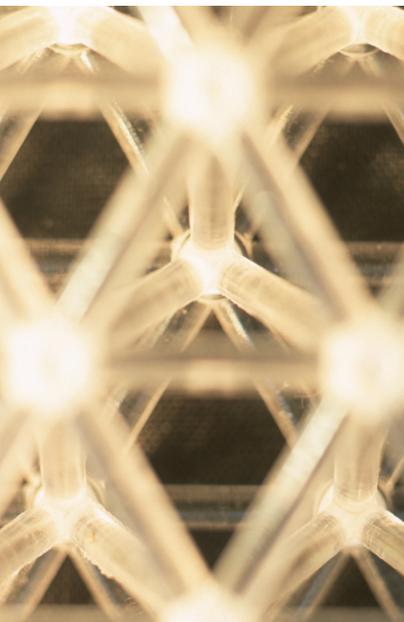
Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7
Abafado (0), Ressonante (10)	4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Oticamente límpido
Fácil de colorir
Resistente a UV



Policarbonato (PC)

O que é? O PC é um dos termoplásticos de “engenharia”, o que significa que tem melhores propriedades mecânicas do que os polímeros “comerciais” mais baratos. A família inclui os plásticos poliamida (PA), polioximetileno (POM) e politetrafluoretileno (PTFE). O anel de benzeno e o grupo carbonato $-OCOO-$ se combinam em PC puro e lhe dão suas características únicas de transparência ótica e boa tenacidade e rigidez, mesmo em temperaturas relativamente altas. Essas propriedades fazem do PC uma boa opção para aplicações como CDs, capacetes de segurança e carcaças para ferramentas elétricas. Para realçar ainda mais as propriedades do PC, é possível copolimerizar a molécula com outros monômeros (melhora o retardamento de chamas, o índice de refração e a resistência ao amolecimento), ou reforçar o PC com fibras de vidro (o que resulta em melhores propriedades mecânicas a altas temperaturas).

Notas de design A transparência ótica e a alta resistência ao impacto do PC tornam-o adequado para aplicações em vidros resistentes a tiros ou a estilhaçamento. É fácil de colorir. O PC é normalmente processado por extrusão ou termoconformação (técnicas que impõem restrições ao design), embora a moldagem por injeção seja possível. Quando se trata de um projeto para extrusão com PC, a espessura da parede deve ser a mais uniforme possível para evitar empenamento, e devem-se evitar também projeções e cantos vivos – características como espaços vazios e seções da matriz isoladas e sem apoio aumentam muito o custo do molde. A rigidez da peça final pode ser melhorada com a incorporação de sulcos ou nervuras em relevo. O PC pode ser reforçado com fibras de vidro para reduzir problemas de contração durante o resfriamento e melhorar o desempenho mecânico em altas temperaturas. Pode ser unido com adesivos, elementos de fixação ou solda.

Usos típicos CDs, carcaças para secadores de cabelo e ferramentas elétricas, torradeiras, impressoras, revestimento interno de refrigeradores, engrenagens mecânicas, painéis de instrumentos, capacetes de motocicleta, para-choques e peças da carroceria de automóveis, escudos de uso policial.

Materiais concorrentes Acetal, acrílico e poliéster.

O ambiente O processamento de termoplásticos de engenharia requer maior energia do que o dos plásticos comerciais; porém, fora isso, não causam nenhum outro dano ao ambiente. O PC pode ser reciclado se não for reforçado.

Observações técnicas A combinação do anel de benzeno com estruturas de carbonato em sua molécula dá ao polímero características únicas de alta resistência e notável tenacidade. O PC pode ser misturado com ABS ou poliuretano. O ABS/PC adquire suas características de retardador de chamas e resistência à radiação UV do policarbonato a um custo mais baixo do que o ABS. O PU/PC adquire sua rigidez do policarbonato e sua flexibilidade e facilidade de revestimento do poliuretano.

Atributos do policarbonato

Preço, \$/kg	3,80–4,30
Densidade, Mg/m ³	1,14–1,21

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,21–2,44
Alongamento, %	70–150
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	2,1–4,602
Dureza Vickers, H _v	17–22
Tensão de escoamento, MPa	59,1–69
Temperatura de serviço, °C	–40–120
Calor específico, J/kg·K	1535–1634
Condutividade térmica, W/m·K	0,19–0,22
Dilatação térmica, 10 ^{–6} /K	120,1–136,8

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	120–130
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7
Abafado (0), Ressonante (10)	4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Oticamente límpido
Forte
Duro

Polioximetileno (POM), acetal

O que é? O POM foi lançado no comércio pela DuPont em 1959 com o nome de Delrin. É semelhante ao náilon, mas é mais rígido e tem melhor resistência à fadiga e à água – porém, os náilons têm melhor resistência ao impacto e à abrasão. É raramente usado sem modificações: na maioria das vezes tem enchimento de fibra de vidro, aditivos retardadores de chamas ou é misturado com PTFE ou PU. Este último, mistura de POM/PU, tem boa tenacidade. O POM é usado quando os requisitos de boa moldabilidade, resistência à fadiga e rigidez justificam seu alto preço em relação aos polímeros de massa, como o polietileno, que são polimerizados de matérias-primas mais baratas com consumo de energia mais baixo.

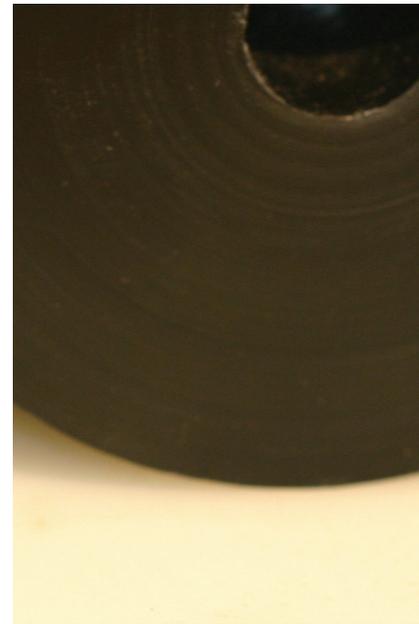
Notas de design O POM é fácil de moldar por moldagem por sopro, moldagem por injeção ou moldagem de chapas, mas a contração provocada pelo resfriamento limita a 0,1 mm a espessura mínima de parede recomendada para moldagem por injeção. O POM sai da fábrica cinzento, mas pode ser colorido. Pode ser extrudado para produzir formas de seção transversal constante como fibras e tubos. A alta cristalinidade resulta em maior contração no resfriamento. O POM deve ser processado na faixa de temperatura 190–230°C e pode ser necessário secá-lo antes da conformação, em função de suas propriedades higroscópicas. A junção pode ser feita por soldagem ultrassônica, mas o baixo coeficiente de atrito do POM requer métodos de soldagem que usam alta quantidade de energia e longa exposição ao ultrassom. A união com adesivos é uma alternativa. O POM também é um isolante elétrico. Sem copolimerização ou adição de grupos bloqueadores, o POM se degrada facilmente.

Usos típicos Carburadores de automóveis e trincos de portas, peças de videocassetes, engrenagens e mancais, cabos de ferramentas, peças hidráulicas, zíperes de roupas.

Materiais concorrentes Náilon, poliéster, PTFE.

O ambiente O acetal, como a maioria dos termoplásticos, é um derivado de petróleo, mas isso não configura ameaça imediata ao seu uso.

Observações técnicas A unidade repetida do POM é $-(CH_2O)_n$, e a molécula resultante é linear e de alta cristalinidade. Por consequência, o POM é fácil de moldar, tem boa rigidez e resistência à fadiga e é resistente à água. Em sua forma pura, o POM se degrada facilmente por despolimerização que começa nas extremidades da cadeia do polímero por um processo denominado *unzipping* (abrir o zíper). A adição de “grupos de bloqueio” nas extremidades das cadeias do polímero ou a copolimerização com éteres cíclicos como óxido de etileno impede o *unzipping* e, por consequência, a degradação.



Atributos do acetal

Preço, \$/kg	2,70–4,00
Densidade, Mg/m ³	1,39–1,43

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,35–6,27
Alongamento, %	10–75
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,71–4,2
Dureza Vickers, H _v	14–24
Tensão de escoamento, MPa	48,6–72,4
Temperatura de serviço, °C	-30–110
Calor específico, J/kg·K	1364–1433
Condutividade térmica, W/m·K	0,22–0,35
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	75–200

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	115–121
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7
Abafado (0), Ressonante (10)	4–5
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Baixo atrito
Resistente ao desgaste
Resistente à água



Politetrafluoretileno (PTFE)

O que é? O PTFE (Teflon) é um membro da família fluoroplástica, que inclui o clorotrifluoretileno, CTFE ou CFE, o fluoreto de polivinila, PVF₂ e o fluoreto de polivinilideno PVF₂. O PTFE tem coeficiente de atrito excepcionalmente baixo, repele a água e é extremamente estável. Foi comercializado pela primeira vez no final da década de 1940 com o nome de Teflon. Utensílios de cozinha antiaderentes (Tefal = Teflon coated aluminum [Alumínio revestido com Teflon]) exploram sua inércia química, sua estabilidade térmica e sua capacidade de repelir água – a razão por que nada adere a ele. É caro, em se tratando de polímeros, mas é usado em aplicações de alto valor (painéis antiaderentes, capas de chuva de GoreTex; artérias artificiais).

Notas de design O PTFE é 2,7 vezes mais denso do que o polietileno e 12 vezes mais caro. Porém, é muito mais resistente a ataques químicos; pode ser usado com segurança de -270 a 250°C. Tem coeficiente de atrito notavelmente baixo e excepcional capacidade de resistir à água e a outros líquidos. Todos os fluoroplásticos são brancos, e até certo grau, translúcidos. Dão resistência de longo prazo a ataques de todo tipo, incluindo radiação ultravioleta. O PTFE em si tem um toque caracteristicamente macio, de cera, em parte por causa do baixo coeficiente de atrito. É um excelente isolante elétrico, com baixa perda dielétrica. Pode ser “espumado” para dar uma película leve e microporosa que repele água em estado líquido, mas permite a passagem do vapor de água – o princípio do GoreTex. As propriedades mecânicas do PTFE não são notáveis, mas ele pode se tornar mais resistente à abrasão com adição de cerâmica inerte, e pode ser reforçado com vidro, náilon ou fibras de Kevlar® para adquirir uma “pele” semelhante a couro de excepcional tenacidade e resistência, inclusive a intempéries (explorada em tetos sob tração). Unir o PTFE é difícil; métodos térmicos ou ultrassônicos são bons; é possível usar adesivos de epóxi, nitrilofenólicos e de silicone.

A utilização de derivados de GoreTex em tecidos está se expandindo. O tamanho dos poros nesses tecidos pode ser controlado para rejeitar não somente água, mas bactérias, com potencial para vestimentas de proteção para cirurgias, e contra certos tipos de armas biológicas.

Usos típicos Encapamento de fios e cabos elétricos; fita isolante de alta qualidade; revestimento interno anticorrosão para tubulações e válvulas; revestimentos de proteção; vedações e gaxetas; mancais e esquis de baixo coeficiente de atrito; telhados translúcidos e proteção atmosférica para outros polímeros (por exemplo, ABS); produtos antiaderentes para a cozinha; tecidos que repelem água.

Materiais concorrentes Polietileno para baixo atrito, PVC para uso externo em telhados e blindagem.

O ambiente O PTFE não é inflamável e é aprovado pela FDA. Como todos os termoplásticos, o PTFE simples pode ser reciclado. Mas, quando transformado em superfícies antiaderentes, ou em GoreTex, os aditivos formados impedem sua posterior reciclagem.

Observações técnicas O flúor é o mais reativo dos gases; porém, combinado com carbono para formar politetrafluoretileno, PTFE, torna-se

Atributos do PTFE

Preço, \$/kg	13,90–15,90
Densidade, Mg/m ³	2,14–2,2

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,4–0,55
Alongamento, %	200–400
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	5–7
Dureza Vickers, H _v	59–65
Tensão de escoamento, MPa	19,7–21,7
Temperatura de serviço, °C	-270–250
Calor específico, J/kg·K	1014–1054
Condutividade térmica, W/m·K	0,24–0,26
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /J	126–216

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	180–195
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

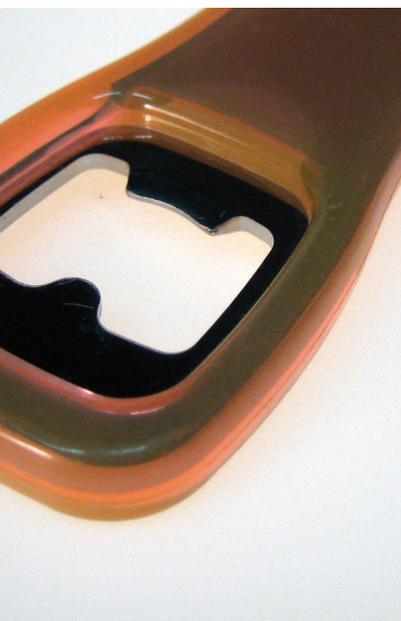
Tom grave (0), Tom agudo (10)	5
Abafado (0), Ressonante (10)	2–3
Macio (0), Duro (10)	6
Quente (0), Frio (10)	5
Brilho, %	85–95

Características

(em relação a outros polímeros)

Extremamente durável
Altas temperaturas
Baixo atrito

a mais estável das moléculas, resistente a praticamente tudo, exceto calor excessivo. Tem coeficiente de atrito excepcionalmente baixo em comparação com o do aço, o que o torna atraente para mancais e – na forma dispersa – como lubrificante.



Ionômeros

O que são? Ionômeros, lançados pela DuPont em 1964, são termoplásticos flexíveis, mas com ligações iônicas cruzadas, às quais deve seu nome. Seu caráter termoplástico permite que sejam processados por moldagem por sopro, moldagem por injeção e termoconformação, e aplicados como revestimentos. Porém, resfriados abaixo de 40°C, adquirem a característica de termofixos: alta resistência, boa adesão e estabilidade química.

Notas de design Ionômeros são muito duros, têm alta resistência à tração e excelente resistência ao impacto, ao rompimento, à gordura e à graxa, e à abrasão. A limpidez ótica também é bastante alta. Na maioria das vezes são produzidos como películas. Os ionômeros têm aderência a quente notavelmente alta (10 vezes a do LDPE). Sua resistência às intempéries é semelhante à do PE e, como o PE, podem ser estabilizados com a adição de negro de fumo. A permeabilidade também é semelhante à do PE, exceto no caso do dióxido de carbono, para o qual sua permeabilidade é mais baixa. A flexibilidade à baixa temperatura é excelente, mas eles não devem ser usados em temperaturas acima de 70°C. Em razão da natureza iônica de suas moléculas, os ionômeros têm boa adesão a folhas de metal, náilon e outras películas usadas para embalagem. Folhas e revestimento por extrusão são comuns. Ionômeros têm mais permeabilidade ao vapor úmido (devido à baixa cristalinidade) do que o polietileno, são facilmente vedados a quente e conservam sua resiliência em uma ampla faixa de temperatura.

Usos típicos Embalagem de alimentos, solas de calçados esportivos com inserções de metal, botas de esqui, carcaças de patins de gelo, acolchoados para a prática de luta romana, isolamento de tubulações térmicas, suportes para placas de automóveis, capas de bolas de golfe, para-choques automotivos, embalagens de salgadinhos, blisters e garrafas.

Materiais concorrentes LDPE, poli-isopreno.

O ambiente Ionômeros têm propriedades semelhantes às dos termofixos, mas podem ser reciclados – uma combinação atraente.

Observações técnicas Ionômeros são copolímeros de etileno e ácido metacrílico. Alguns graus contêm sódio e têm propriedades óticas e resistência superiores às da gordura e da graxa; alguns contêm zinco e têm melhor adesão. As ligações iônicas cruzadas são estáveis à temperatura ambiente, mas se rompem se aquecidas acima de aproximadamente 40°C. As vantagens das ligações cruzadas são observadas na tenacidade e rigidez à temperatura ambiente. Em altas temperaturas aparecem as vantagens dos termoplásticos lineares – facilidade de processamento e reciclabilidade.

Atributos dos ionômeros

Preço, \$/kg	1,40–1,60
Densidade, Mg/m ³	0,93–0,96

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,2–0,42
Alongamento, %	300–700
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,14–3,43
Dureza Vickers, H _v	2–5
Tensão de escoamento, MPa	8,27–15,9
Temperatura de serviço, °C	-30–70
Calor específico, J/kg·K	1814–1887
Condutividade térmica, W/m·K	0,24–0,28
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	180–306

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	115–120
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	5–6
Abafado (0), Ressonante (10)	2–3
Macio (0), Duro (10)	6
Quente (0), Frio (10)	4–5
Brilho, %	20–143

Características

(em relação a outros polímeros)

Forte
Duro
Baixa permeabilidade

Celuloses (CA)

O que é? Celulose é amido; é um dos principais polímeros estruturais existentes em plantas (especificamente madeira ou algodão). Essas fibras naturais são tratadas com ácidos para produzir uma resina, um processo denominado “esterificação”. O acetato de celulose (CA), o butirato de acetato de celulose (CAB) e o proprionato de acetato de celulose (CAP) são três materiais de celulose comuns. O CA combina tenacidade, transparência e uma textura superficial natural. Algumas resinas de celulose são biodegradáveis e permitem a utilização em envelopes com janelas transparentes que podem ser descartados como se fossem feitos só de papel.

Notas de design Materiais de celulose têm boa transparência ótica (até 90%) e boas propriedades mecânicas; são frequentemente usados em produtos cujo acabamento superficial é importante. Podem ser translúcidos, transparentes ou opacos e vêm em uma gama de cores incluindo a perolada, a opaca e a metálica. Materiais de celulose são antiestáticos e, portanto, a poeira não adere à sua superfície. Têm superfícies brilhantes e um efeito de autopolimento que permite que os riscos desapareçam com o uso. As celuloses podem ser formuladas para uso externo. Acetatos de celulose têm alta permeabilidade ao vapor e limitada resistência ao calor; sua capacidade de isolamento elétrico e sua estabilidade dimensional são ruins; a absorção de água é alta em comparação com a do PVC. Comparados com o CA, o CAB e o CAP são ligeiramente mais macios, têm densidades mais baixas e temperaturas de distorção a quente também mais baixas, e fluem com mais facilidade. CAB e CAP têm faixa de temperatura de operação mais ampla (0–60°C). Em massa, o acetato de celulose muitas vezes tem uma leve coloração marrom-amarelada, mas também pode adquirir transparência branca de água. A celulose é facilmente transformada em fibras, tecidos e películas, conhecidas sob o nome comercial de Rayon. Tem excelentes propriedades de fluidez, portanto, adapta-se bem à moldagem por injeção, mas a resina tem de ser mantida seca. Há celuloses com graus de fluidez mais rígidos para extrusão e produção de películas e chapas. Esses polímeros também são alguns dos melhores para cortar, enrolar e moer. CAB é bom para termoconformação.

Usos típicos Película de embalagem, óculos de sol, óculos de segurança, brochuras laminadas, cabos de ferramentas, cabeças de martelo, chaves de fenda elétricas, película fotográfica, teclas de máquinas de escrever, blisters, pentes, presilhas e assemelhados para cabelos.

Materiais concorrentes Acrílicos, polietileno, policarbonato.

O ambiente Celulose – um material natural e renovável – é um dos ingredientes de polímeros com base de celulose. Entretanto, o processamento envolve produtos químicos que criam um problema de descarte. A maioria dos polímeros com base de celulose queimam com facilidade e exigem proteção contra chamas vivas. Alguns são biodegradáveis.

Observações técnicas Graus de materiais de celulose variam com a elevação do nível de tratamento com ácido ou com a adição de plastificadores. Aumentar o plastificador aumenta a fluidez e a tenacidade, mas reduz a resistência à fluência. Mas essa falta de resistência à fluência pode ser usada como vantagem em moldagem, quando as peças podem ser resfriadas com rapidez porque as tensões serão aliviadas bem rapidamente.



Atributos das celuloses

Preço, \$/kg	3,40–3,90
Densidade, Mg/m ³	0,98–1,4

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,75–4,1
Alongamento, %	5–100
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,85–3,20
Dureza Vickers, H _v	18–15
Tensão de escoamento, MPa	24,8–52,4
Temperatura de serviço, °C	-10–60
Calor específico, J/kg·K	1386–1665
Condutividade térmica, W/m·K	0,13–0,34
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	118,8–360

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	120–126
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	3–4
Macio (0), Duro (10)	6–7
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Um biopolímero
Transparente
Duro



Polivinilcloro (PVC)

O que é? PVC – Vinil – é um dos polímeros mais baratos e mais versáteis e – junto com o polietileno – o mais utilizado dos polímeros, e a epítome do seu caráter multifacetado. Em sua forma pura – como um termoplástico, tpPVC –, ele é rígido e medianamente duro; o baixo preço faz dele um plástico de engenharia eficiente em custo onde não são encontrados extremos de serviço. A incorporação de plasticizadores cria o PVC flexível, o ePVC, um material com propriedades semelhantes às do couro e da borracha e usado como um substituto para ambos. Por comparação, quando reforçado com fibras de vidro resulta em um material que é suficientemente rígido, forte e duro para ser usado em telhados, assoalhos e painéis de edifícios. O PVC, tanto o rígido, quanto o flexível, podem ser espumados para produzir painéis estruturais leves e estofamento para carros e uso doméstico. A mistura com outros polímeros amplia ainda mais a faixa de propriedades: os discos de vinil eram feitos de um copolímero de cloreto/acetato de vinila; garrafas e películas moldadas a sopro são um copolímero de cloreto/acetato de vinila.

Notas de design Em sua forma pura o PVC é pesado, rígido e frágil. Plasticizadores podem transformá-lo de um material rígido em um material que é quase tão elástico e macio quanto a borracha. O PVC plasticizado é usado como um substituto barato para o couro – pode-se fazer com que ele adquira textura e cores parecidas com as do couro. É menos transparente do que PMMA ou PC, mas também custa muito menos, portanto, é amplamente usado em recipientes transparentes, descartáveis. O PVC está disponível como película, chapa ou tubo. Podem ser unido com adesivos de poliéster, epóxi ou poliuretano. Tem excelente resistência a ácidos e bases, e boas propriedades como vedação contra gases atmosféricos, mas pouca resistência a alguns solventes.

Usos típicos tpPVC: tubos, acessórios, perfis, sinalização rodoviária, embalagem de cosméticos, canoas, mangueiras de jardim, assoalhos, janelas e blindagem de vinil, discos, bonecas, tubos de vinil de uso médico. ePVC: couro artificial, isolamento de fios elétricos, películas, chapas, tecidos, estofamento de automóveis.

Materiais concorrentes Polietileno e Polipropileno, PTFE para soluções em coberturas de alto desempenho.

O ambiente O monômero cloreto de vinila é extremamente agressivo, o que resultou em pressão para a interrupção de sua produção. Porém, se adequadamente controlado, o processamento é seguro e o polímero PVC não tem nenhum efeito nocivo. Todavia, o descarte pode ser um problema: a degradação térmica libera cloro, HCl e outros componentes tóxicos, e, portanto, requer incineração especial a alta temperatura por medida de segurança.

Observações técnicas O PVC pode ser um termoplástico ou um termofixo. Há muitos tipos de PVC: PVC rígido expandido, tipo I, tipo II, CPVC, mistura acrílico/PVC, PVC límpido.

Atributos do PVC

Preço, \$/kg	1.00–1.20
Densidade, Mg/m ³	1.3–1.58

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,14–4,14
Alongamento, %	11,93–80
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,46–5,12
Dureza Vickers, H _v	10–15
Tensão de escoamento, MPa	35,4–52,1
Temperatura de serviço, °C	–20–70
Calor específico, J/kg·K	1355–1445
Condutividade térmica, W/m·K	0,15–0,29
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	1,8–180

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	77–83
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Resistente à corrosão
Baixo custo
Resiliente

Poliuretano (PU)

O que é? Pensar em poliuretanos é pensar em materiais e tecidos macios, que esticam (Lycra® ou Spandex®), mas eles também podem ser semelhantes ao couro ou rígidos. Como o PVC, os poliuretanos têm graus termoplásticos, elastoméricos e termofixos. São fáceis de espumar; cerca de 40% de todo o PU é transformado em espuma por mistura com um agente insuflador. Os graus das espumas podem ser de células abertas ou fechadas, microcelulares ou de filtro. O PU é um material versátil.

Notas de design Espumas de PU são baratas, fáceis de conformar, e têm bom desempenho estrutural e boa resistência a hidrocarbonetos. A maioria dos PUs espumáveis são termofixos, portanto, são conformados por fundição em vez de moldagem a quente, o que resulta em ótimos acabamentos superficiais e potencial para formas intrincadas. Em forma sólida, os PUs podem ser produzidos como chapas, ou em formas maciças. Para aplicações de suporte de cargas como correias de transmissão e correias transportadoras, os tpPUs são reforçados com náilon ou fibras de aramida, adquirindo flexibilidade com alta resistência. Os tpPUs podem ter uma ampla faixa de durezas, pontos de amolecimento e capacidades de absorção de água. São processados do mesmo modo que o náilon, mas são consideravelmente mais caros. Fibras de tpPU são duras, semelhantes a arame e têm ponto de amolecimento baixo em comparação com o náilon; têm sido usados como cerdas de escovas. Fibras de elPU são muito mais comuns – são usadas em vestuário e produtos flexíveis sob as marcas registradas Spandex® ou Lycra®. Espumas de elPU são usadas para colchões, assentos de móveis e embalagem; espumas mais rígidas aparecem como proteção contra acidentes em automóveis e, na forma de baixa densidade (95% de gás) como material isolante em refrigeradores e freezers. Essas resinas flexíveis são boas em sistemas laminados nos quais se exige amortecimento. O elPU é amorfo, o tpPU é cristalino; o elPU é normalmente fundido ou repuxado, o tpPU é normalmente moldado por injeção ou extrudado. Elastômeros de poliuretano têm excepcional resistência mecânica (até 48 MPa) e à abrasão, baixa resistividade à compressão e boa resistência a combustíveis. Têm propriedades de utilização de -55°C a 90°C. A espuma de PU é normalmente processada por moldagem por injeção e reação: a resina e o endurecedor são misturados e injetados em um molde onde reagem e se fixam. O PU pode ser ligado com adesivos de poliuretano, nitrila, neoprene, epóxis e cianoacrilatos. Tem boa resistência a hidrocarbonetos, degrada-se em muitos solventes e queima lentamente ao fogo.

Usos típicos Acolchoados e assentos, embalagem, solas de calçados de corrida, pneus, rodas, mangueiras de combustível, engrenagens, mancais, rodas, para-choques de carros, adesivos, revestimento de tecidos para infláveis, correias de transmissão, diafragmas, revestimentos resistentes à lavagem a seco, móveis, isolamento térmico em refrigeradores e freezers; como elastômeros: rodas de caminhão, calcanhars de calçados, para-choques, correias transportadoras e matrizes para conformação de metais.

Materiais concorrentes Náilon, acetal, borracha natural, espumas de poliestireno.

Atributos do tpPU

Preço, \$/kg	5,44–6,01
Densidade, Mg/m ³	1,12–1,24

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	1,31–2,07
Alongamento, %	60–550
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,84–4,97
Dureza Vickers, H _v	16–22
Tensão de escoamento, MPa	40–53,8
Temperatura de serviço, °C	-30–80
Calor específico, J/kg·K	1554–1616
Condutividade térmica, W/m·K	0,24–0,24
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	90–144

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	110–118
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–7
Abafado (0), Ressonante (10)	3–4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4–5
Brilho, %	100

Características

(em relação a outros polímeros)

Flexível	
Duro	
Durável	

O ambiente O PU é sintetizado do diisocianato e um poliéster ou poliéter. O diisocianato é tóxico e exige precauções durante a produção. O PU em si é inerte e não tóxico. Houve uma época em que a inflamabilidade da espuma de PU e a utilização de CFCs como agentes de insuflação no processo de espumação foram um motivo de preocupação. Agora, novos retardadores de chamas significam que as espumas de PU obedecem aos padrões vigentes de proteção contra incêndio, e os CFCs foram substituídos por CO₂ e HFCs, que não causam dano à camada de ozônio.

PUs termoplásticos podem ser reciclados (PUs termofixos não podem), e quando toda a vida útil acaba, são incinerados para recuperar calor. A legislação para a devolução de embalagens e problemas de descarte pode ser uma desvantagem para o PU.

Observações técnicas Quase todos os poliuretanos são copolímeros de grupos ligados de poliéster, álcoois e isocianato. Dependendo da mistura, os poliuretanos podem ser macios e elásticos (Lycra®, Spandex®) ou quase rígidos (solas de calçados de corrida, assoalhos), o que faz do PU um dos polímeros mais versáteis.

Silicones

O que são? Silicones são materiais de alto desempenho e alto custo. Têm baixa resistência, mas podem ser usados em uma faixa de temperatura excepcional (-100–300°C), têm grande estabilidade química e uma combinação incomum de propriedades (Silly Putty® é um elastômero de silicone – quica quando cai no chão, mas flui se simplesmente o deixarmos sobre a mesa).

Notas de design Silicones são os mais quimicamente estáveis de todos os elastômeros, com boas propriedades elétricas, mas resistência relativamente baixa (até 5 MPa). Resinas de silicone são caras e difíceis de processar. Têm propriedades como as da borracha natural, mas uma estrutura química completamente diferente. Fibras de vidro e outros enchimentos são comumente usados como reforço. As peças resultantes têm resistência relativamente baixa, mas alta resistência ao calor. Para compósitos de fibra de vidro, as propriedades mecânicas são melhores com uma resina fenólica ou de melamina, mas as propriedades elétricas são melhores com silicone. Aplicações elétricas e de alta temperatura predominam em sua utilização. São quimicamente inertes, não absorvem água e podem ser usados em equipamentos cirúrgicos ou de processamento de alimentos e vedações. Silicones podem ser produzidos como fluidos, adesivos, revestimentos, elastômeros, resinas de moldagem e agentes de liberação do molde. Porém, têm vida curta na prateleira (3–6 meses). Fluidos de silicone foram os primeiros silicones comerciais, usados como lubrificantes em uma ampla faixa de temperatura (-75–450°C). Adesivos de silicone podem ser produzidos como líquidos ou em pasta.

O silicone RTV foi desenvolvido, em primeiro lugar, porque preenchia o molde rapidamente – alguns segundos em altas temperaturas. Elastômeros de silicone podem ser curados ao ar, curados a frio (com a adição de um catalisador) ou curados a quente; podem ser puros ou carregados com negro de fumo para dar condutividade. Resinas de silicone para moldagem são compostas com enchimentos inertes que permitem a produção de peças flexíveis com alta resistência ao calor.

Usos típicos Isolamento de fios e cabos elétricos, agentes de liberação de moldes, revestimento de tecidos para limpar lentes, vedações, gaxetas, adesivos, anéis de vedação (*o-rings*), isolamento, encapsulamento e envaseamento (*potting*) de circuitos eletrônicos, equipamentos cirúrgicos e de processamento de alimentos, bicos de mamadeiras, implantes de mamas, toucas de natação e vedações para óculos de natação.

Materiais concorrentes Poliuretanos, EVA.

O ambiente A produção de silicones faz uso intensivo de energia – embora eles não sejam derivados de petróleo. Não podem ser reciclados.

Observações técnicas Silicone e elastômeros de fluorossilicone têm longas cadeias de grupos ligados de O-Si-O-Si- (que substituem as cadeias -C-C-C-C- em elastômeros com base de carbono), com cadeias laterais de metil (CH₃) ou flúor (F). Alguns são sólidos relativamente rígidos, outros são elastômeros.



Atributos do silicone

Preço, \$/kg	7,20–17,20
Densidade, Mg/m ³	1,1–2,3

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,001–0,05
Alongamento, %	0,8–5,3
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,03–0,7
Tensão de escoamento, MPa	2,4–5,5
Temperatura de serviço, °C	-100–300
Calor específico, J/kg·K	1050–1300
Condutividade térmica, W/m·K	0,2–2,55
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	250–300

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	175–190
Potencial de reciclagem	Baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	1–4
Abafado (0), Ressonante (10)	0–1
Macio (0), Duro (10)	3–4
Quente (0), Frio (10)	4–6

Características

(em relação a outros polímeros)

Extremos de temperatura	
Durável	
Baixo atrito	



Poliésteres (PET, PBT, PETg)

O que são? O nome poliéster vem da combinação de “polimerização” e “esterificação”. Poliésteres saturados são termoplásticos – exemplos: PET, PBT, PETg; têm boas propriedades mecânicas a temperaturas de até 160°C. O PET é límpido como cristal, impermeável à água e ao CO₂, mas deixa passar um pouco de oxigênio. É duro, forte, fácil de conformar, unir e esterilizar – permitindo reutilização. Quando chega ao fim de sua primeira vida, pode ser reciclado como fibras e materiais pelucidos usados em roupas e tapetes. Poliésteres insaturados são termofixos; são usados como o material da matriz em compósitos de fibra de vidro/poliéster. Elastômeros de poliéster são resilientes e esticam até 45% no comprimento; têm boa resistência à fadiga e conservam a flexibilidade em baixas temperaturas.

Notas de design Há quatro graus de poliésteres termoplásticos: não modificados, retardadores de chamas, reforçados com fibra de vidro e recheados com mineral. Graus não modificados têm alto alongamento; graus retardadores de chamas são autoextintores; graus reforçados com fibra de vidro (como Rynite®) são alguns dos polímeros mais duros, mas há problemas com a estabilidade dimensional; e graus recheados com mineral são usados para contrabalançar o empenamento e a contração, se bem que com alguma perda de resistência. O PET usado em recipientes de bebidas gasosas pode suportar a pressão interna, é reciclável e é mais leve do que o vidro. A permeabilidade ao oxigênio é superada por um sanduíche com uma camada de álcool polietilvinilideno entre duas camadas de PET, o que dá um material multicamadas que ainda pode ser moldado a sopro. O poliéster pode ser ópticamente transparente, límpido, translúcido, branco ou opaco; é fácil colorir a resina.

Poliésteres termofixos são as resinas mais baratas para fazer compósitos de fibra de vidro ou de carbono, mas têm resistência mais baixa do que os epóxios. Podem ser formulados para cura à temperatura ambiente ou acima. Modificações podem melhorar a resistência química, a resistência à radiação UV e a resistência ao calor sem alterar muito a facilidade de processamento. Elastômeros de poliéster têm módulos de elasticidade relativamente altos e são mais fortes do que os poliuretanos. Têm boas propriedades de fluidez e baixa contração, boa resistência a óleos e fluidos. O poliéster pode ser transformado em material condutivo com a adição de 30% de fibra de carbono. Sob a forma de fita, o Mylar® é usado para gravação magnética de som. Resinas de termofixos sem enchimento são normalmente usadas como revestimentos superficiais, mas tendem a ser frágeis. Uma advertência: poliésteres termofixos corroem o cobre.

Usos típicos Película decorativa, balões metalizados, filme fotográfica, fita de vídeo, recipientes de bebidas gaseificadas e utensílios de cozinha que podem ser levados ao forno, velas de *windsurf*, cartões de crédito, tapetes, vestuário, escovas, botes, varas de pescar, painéis internos de automóveis.

Materiais concorrentes Vidro, acrílico, poliestireno, policarbonato.

O ambiente A fabricação de garrafas de PET consome menos energia do que a de vidro do mesmo volume, e são muito mais leves – economizam energia se devolvidas. Garrafas de paredes grossas podem ser

Atributos do tpPoliéster

Preço, \$/kg	1,25–2,5
Densidade, Mg/m ³	1,19–1,81

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	1,6–4,4
Alongamento, %	1,3–5
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	1,05–9,16
Dureza Vickers, H _v	11–40
Tensão de escoamento, MPa	30–40
Temperatura de serviço, °C	-20–160
Calor específico, J/kg·K	1160–1587
Condutividade térmica, W/m·K	0,28–0,58
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	115–170

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	89–95
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	6–8
Abafado (0), Ressonante (10)	4–6
Macio (0), Duro (10)	7–8
Quente (0), Frio (10)	4–5

Características

(em relação a outros polímeros)

Versatilidade	
Barato	
Forte e Duro	

reutilizadas; garrafas de paredes finas podem ser recicladas – e são, particularmente, nos Estados Unidos.

Observações técnicas Poliésteres são fabricados por uma reação de condensação entre um álcool como o etílico (presente na cerveja) e um ácido orgânico como o ácido acético (vinagre). Os dois reagem, liberam água e formam um éster. PET, PBT e PCT não têm ligações cruzadas e, portanto, são termoplásticos. Os poliésteres que são usados como polímeros de matriz em peças maciças e compostos para moldagem de chapas são termofixos.



Fenólicos

O que são? A baquelite, comercializada em 1909, provocou uma revolução no design de produto. Era rígida, razoavelmente forte, podia ser colorida (se bem que em tons esmaecidos) e – acima de tudo – era fácil de moldar. Produtos que antes eram feitos à mão com madeiras, metais ou materiais exóticos como o marfim, agora podiam ser moldados com rapidez e baixo custo. Houve uma época em que a produção de fenólicos ultrapassou a de PE, PS e PVC combinados. Agora, embora a razão tenha mudado, os fenólicos ainda desempenham um papel único. São rígidos, quimicamente estáveis, têm boas propriedades elétricas, são resistentes ao fogo e fáceis de moldar – e são baratos.

Notas de design Resinas fenólicas são duras, toleram calor e resistem à maioria dos produtos químicos, exceto álcalis fortes. Fenólicos laminados com papel têm excelentes propriedades elétricas e mecânicas e são baratos; preenchidos com algodão, a resistência mecânica aumenta e a superfície usinada é mais bonita; recheados com vidro, a resistência mecânica novamente aumenta e a resistência química melhora. Enchimentos desempenham três papéis: extensores (como serragem de madeira e mica) são baratos e reduzem o custo; enchimentos funcionais adicionam rigidez, resistência ao impacto e limitam o encolhimento; reforços (como fibras de vidro, grafite e polímeros) aumentam a resistência, mas o custo também aumenta. Fenólicos sem enchimento são suscetíveis a encolhimento quando expostos ao calor durante certo período de tempo, resinas trabalhadas com vidro são menos suscetíveis. Têm boa resistência à fluidez, e se autoextinguem em incêndios.

Fenólicos podem ser fundidos (acessórios para iluminação e disjuntores residenciais) e estão disponíveis como hastes e placas. Impregnados em papel (Nomex®) e tecidos (Tufnol®), têm excepcional durabilidade, resistência química e propriedades de suporte. Fenólicos aceitam tinta, eletro galvanização e sobrecamadas de melamina.

Usos típicos Quadros de distribuição elétrica, arruelas isolantes, peças perfuradas intrincadas (fenólicos com algodão laminado), engrenagens, pinhões, mancais, buchas (fenólicos com algodão laminado), gaxetas e vedações (fenólicos com vidro), usados para unir materiais por atrito como lonas de freios, talões de pneumáticos, cabos de facas, pesos de papel, bolas de bilhar, tomadas e interruptores domésticos, telefones, tomadas e interruptores residenciais, telefones, tampas de caixas de fusíveis, cabeçotes de distribuidores, cabos e alças de frigideiras e painéis, cabeçotes esféricos para máquinas de escrever, assentos para vasos sanitários. Como espuma, a resina fenólica é usada em painéis de construção; sua boa resistência é um atrativo particular.

Materiais concorrentes Epóxi, poliéster, silicone.

O ambiente Fenólicos, como todos os termofixos, não podem ser reciclados.

Observações técnicas Resinas fenólicas são formadas por condensação, gerando água durante o processo, envolvendo uma reação entre fenol e formaldeído para formar uma resina estágio A. Reagentes, corantes, lubrificantes, produtos químicos para produzir ligações cruzadas são adicionados

Atributos dos fenólicos

Preço, \$/kg	0,90–1,20
Densidade, Mg/m ³	1,24–1,32

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	2,76–4,83
Alongamento, %	1,5–2
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,79–1,21
Dureza Vickers, H _v	8–15
Tensão de escoamento, MPa	27,6–49,68
Temperatura de serviço, °C	-20–160
Calor específico, J/kg·K	1467–1526
Condutividade térmica, W/m·K	0,141–0,152
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	120,1–124,9

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	94–100
Potencial de reciclagem	Baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7
Abafado (0), Ressonante (10)	4
Macio (0), Duro (10)	7
Quente (0), Frio (10)	4

Características

(em relação a outros polímeros)

Retardador de chamas	
Durável	
Forte e duro	

para formar a resina estágio B. Então, essa resina é fundida a quente e sob pressão, convertendo-se no produto final – uma resina estágio C – ou em um polímero somente com ligações cruzadas.

Outros elastômeros

Borracha natural

Os nativos do Peru conhecem a borracha natural há muitos séculos, e agora a borracha é uma das principais exportações da Malásia. Fez a fortuna de Giles Macintosh que, em 1825, inventou uma capa de chuva revestida de borracha à prova d'água, que ainda ostenta o seu nome. O látex, a seiva da seringueira, adquire ligações cruzadas (é vulcanizada) por aquecimento com enxofre; a quantidade de ligações cruzadas determina as propriedades. É o mais amplamente usado de todos os elastômeros – mais de 50% de toda a quantidade produzida.

Notas de design A borracha natural é um elastômero de uso geral excelente e barato, com grande capacidade de estiramento e propriedades que permitem o uso de -50°C a 115°C , mas com pouca resistência a óleo, oxidação, ozônio e UV. Tem baixa histerese – e, portanto, quica muito.

Usos típicos Pneus, molas, vedações, isoladores de choques e brinquedos.

Elastômeros butadieno-estireno (SBS, SEBS, SBR, BUNA-S)

Elastômeros butadieno-estireno são copolímeros de butadieno e estireno. Ultrapassam todas as outras borrachas sintéticas em volume de utilização.

Notas de design Elastômeros butadieno-estireno têm baixo custo e propriedades semelhantes às da borracha natural, embora com menor resistência; por isso exigem reforço.

Usos típicos Predominantemente pneus, mangueiras e vedações.

Borrachas butílicas (NR)

Borrachas butílicas são materiais sintéticos cujas propriedades são parecidas com as da borracha natural.

Notas de design Borrachas butílicas têm boa resistência a abrasão, ruptura e flexão, permeabilidade a gases excepcionalmente baixa e propriedades de utilização até 150°C . Têm constante dielétrica e coeficiente de perda baixos, o que as torna atraentes para aplicações elétricas.

Usos típicos Tubulações internas, cintos, mangueiras, isolamento de cabos elétricos, encapsulamento.

Isopreno

Isopreno é uma borracha natural sintética, processada do mesmo modo que a borracha butílica.

Notas de design O isopreno tem baixa histerese e alta resistência à ruptura, o que o torna saltador e duro.

Usos típicos Os mesmos da borracha butílica.

Elastômeros acrilatos

Elastômeros acrilatos são feitos de butilacetato ou etilacetato.

Notas de design Elastômeros acrilatos têm boa resistência a óleo, mas baixa resistência à ruptura; têm propriedades de uso até 200°C .

Usos típicos Vedações, gaxetas, *o-rings* para transmissão automotiva.

Elastômeros de nitrila (NBR, BUNA-N)

Elastômeros de nitrila são copolímeros de acrilonitrila e butadieno.

Notas de design Elastômeros de nitrila têm excelente resistência a óleos e combustíveis, e conservam boa flexibilidade em baixas temperaturas (-30°C), bem como em temperaturas elevadas.

Usos típicos Peças para poços de petróleo, mangueiras de combustível para automóveis e aeronaves, acoplamentos flexíveis, cilindros de impressão, roletes, bombas de diafragmas.

Elastômeros de polibutadieno

Elastômeros de polibutadieno têm excepcional desempenho à baixa temperatura.

Notas de design O polibutadieno tem excepcionais resiliência e resistência à abrasão, que mantém até -70°C , mas com baixa resistência química.

Usos típicos Geralmente misturado com outros polímeros para melhorar o desempenho à baixa temperatura; núcleos para bolas de golfe sólidas.

Elastômeros de polissulfeto

Elastômeros de polissulfeto têm a mais alta resistência a óleo e gasolina.

Notas de design Polissulfetos têm excelente resistência química e ao envelhecimento, baixa permeabilidade a gases, embora com pouca resistência.

Usos típicos Mangueiras de óleo e combustível, gaxetas, arruelas, diafragmas, vedação e calafetação, e adesivos.

Elastômeros Propileno-Etileno (EP, EPM, EPDM)

Elastômeros propileno-etileno são copolímeros dos dois monômeros que compõem seu nome.

Notas de design Elastômeros propileno-etileno têm boa resiliência, mínima deformação por compressão e boa resistência a produtos químicos, intempéries e UV. Propriedades de uso até 177°C .

Usos típicos Isolamento elétrico, calçados, cintos, mangueiras.



Elastômeros de Etileno-Acetato de Vinila (EVA)

Elastômeros de etileno-acetato de vinila são construídos ao redor do polietileno. São macios, flexíveis e duros e conservam essas propriedades até -60°C. Reagentes melhoram a dureza e a rigidez, mas com alguma degradação de outras propriedades. EVAs misturam-se bem com PE em razão de sua similaridade química.

Notas de design O EVA está disponível em tons pastéis ou profundos, tem boa claridade e brilho. Tem boas propriedades de vedação, pouco ou nenhum odor, resistência à radiação UV e é aprovado pela FDA para contato direto com alimentos. A tenacidade e a flexibilidade são conservadas mesmo em baixas temperaturas e tem boa resistência a trincas sob tensão e boa resistência química. O EVA pode ser processado pela maioria dos processos termoplásticos normais: coextrusão para películas, moldagem a sopro, moldagem rotacional, moldagem por injeção e moldagem por transferência.

Usos típicos Tubos de uso médico, embalagens de leite, chopeiras, sacolas, películas aderentes, sacos para congelamento, película extrudada e laminada, fechos, bandejas de gelo, gaxetas, luvas, isolamento de cabos elétricos, peças infláveis, calçados de corrida.

Elastômeros clorados (Hypalon®, Neoprene)

Hidrocarboneto clorado e polietileno clorado são os principais da família de elastômeros não aplicados em pneus.

Notas de design Hidrocarbonetos clorados são caracterizados por excepcional resistência química, capacidade de ser colorido e propriedades de uso até 175°C. Alguns têm baixa permeabilidade a gases e baixa histerese, o que minimiza o aquecimento sob cargas cíclicas, e resistem à queima.

Usos típicos Revestimentos internos de tanques, correias transportadoras e sincronizadoras, solas de sapatos, *o-rings*, vedações e gaxetas, invólucros de cabos, apoios para controle de vibração, diafragmas, coxins para veículos guiados automaticamente mangueiras e tubulações que ficam sob o capô, calçados, vestimentas à prova d'água.

Elastômeros de fluorocarbono (Viton®, Fluorel®, Kalrez® e Perfluoro)

Elastômeros fluorocarbono são baseados em poliolefinas nas quais alguns dos átomos de hidrogênio foram substituídos por flúor. São mais pesados do que hidrocarbonetos simples, porém, muito mais resistentes ao calor e a produtos químicos.

Notas de design Elastômeros fluorocarbono têm excepcional resistência a produtos químicos, oxidação, solventes e calor – mas também são caros. Têm propriedades de uso até 250°C, mas tornam-se frágeis abaixo de -20°C e têm resistências apenas modestas.

Usos típicos Gaxetas de freios, diafragmas, mangueiras e *o-rings*.

Elastômeros termoplásticos (TPE)

Elastômeros termoplásticos são excepcionais por que podem ser moldados e extrudados em equipamentos-padrão de processamento de

polímeros, sua sucata pode ser fundida novamente, e produtos fabricados com eles podem ser reciclados. Entre eles citamos copolímeros de estireno (Kraton), poliuretanos (Hytrol, Ritefeox, Ecdel®) e polipropileno misturado com elastômeros (Santoprene®, Geolast®).

Notas de design TPEs permitem rápido processamento por métodos-padrão de termoplásticos, e reciclabilidade.

Usos típicos Para-choques, calçados esportivos, mangueiras, diafragmas, roletes, vedações para utilização automotiva e em arquitetura.

Atributos de elastômeros selecionados

	EVA	policloropreno	SBS
Preço, \$/kg	1,15–1,29	1,4–4,29	2,50–2,70
Densidade, Mg/m ³	0,93–0,96	1,23–1,25	0,94–0,95
Atributos técnicos			
Módulo de elasticidade, GPa	0,007–0,09	0,001–0,02	0,02–0,01
Alongamento, %	730–900	100–800	450–500
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,1–0,7	0,1–0,3	0,1–0,3
Tensão de escoamento, MPa	9,5–19	3,4–24	12–21
Temperatura de serviço, °C	–20–60	–50–110	–50–120
Calor específico, J/kg·K	1900–2200	2000–2200	2000–2200
Condutividade térmica, W/m·K	0,3–0,4	0,1–0,12	0,14–1,49
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	160–190	605–625	660–675
Atributos ecológicos			
Conteúdo de energia, MJ/kg	95–101	115–124	105–111
Potencial de reciclagem	Baixo	Baixo	Baixo
Atributos estéticos			
Tom grave (0), Tom agudo (10)	3–5	1–2	2–3
Abafado (0), Ressonante (10)	1–2	0–1	0–1
Macio (0), Duro (10)	4	3	3–4
Quente (0), Frio (10)	5	4	4–6
Brilho, %	17–123		
Transparente?	Não	Não	Sim
Translúcido?	Não	Não	Sim
Opaco?	Sim	Sim	Sim
Características (em relação a outros polímeros)			
	Flexível	Resiliente	Translúcido
	Boas propriedades de vedação	Resistente à ruptura	Fácil de colorir
	Podem ser reciclado	Resistente a produtos químicos	Baixo custo



Espumas de polímeros

O que são elas? Materiais sólidos são demasiadamente sólidos para conforto e segurança. Se você quiser relaxar em luxo almofadado e não se machucar quando bater em alguma coisa, então tenha sempre muitas espumas ao seu redor. Espumas são fabricadas por expansão e solidificação controladas de um material líquido ou fundido por meio de um agente insuflador; é possível usar agentes insufladores físicos, químicos e mecânicos. O material celular resultante tem densidade, rigidez e resistência mais baixas do que o material de origem por uma quantidade que depende de sua densidade relativa – a fração em volume de sólido na espuma. Espumas podem ser macias e flexíveis, mas também podem ser duras e rígidas. Espumas de células abertas absorvem fluidos e podem ser usadas como filtros; espumas de células fechadas dão poder de flutuação. Espumas denominadas “estruturais” ou “sintéticas” formam uma casca superficial densa durante o processamento, produzida por espumação em molde frio.

Notas de design Espumas de polímeros têm características que as tornam adequadas para acolchoar e amortecer, gerenciar energia e para controle acústico ou isolamento térmico. Para acolchoar ou amortecer, os requisitos são conforto e longa vida; espumas de poliuretano têm sido usadas para isso, mas a preocupação com sua inflamabilidade e durabilidade limita sua utilização em móveis. Gerenciamento de energia e embalagem exigem a capacidade de absorver energia a uma tensão de compressão constante e controlada; nesse caso são usadas espumas de poliuretano, polipropileno e poliestireno. Controle acústico requer a capacidade de absorver som e amortecer vibrações. Todas as espumas de poliuretano, poliestireno e polietileno são usadas para isso. Isolamento térmico requer longa vida útil; espumas de poliuretano eram comuns, mas agora foram substituídas por fenólicas e poliestirenos. Quando é necessária proteção contra incêndio, são usadas espumas fenólicas.

Espumas elastoméricas microcelulares com células pequenas e películas de revestimento integral são usadas para controle de choque e vibração. O EVA e o PVC expandidos são exemplos amplamente usados em calçados. Extrusões espumadas têm menos restrições de projeto do que perfis sólidos porque o encolhimento é desprezível. O padrão em redemoinho nas superfícies de peças espumadas que formam casca é eliminado com a utilização de alta pressão ou pintura.

Componentes feitos de espumas estruturais têm alta razão rigidez/peso, boa absorção de som, alta resistência ao impacto, mas baixa resistência à tração. Nervuras, protuberâncias e alças de reforço podem ser incluídas em peças sem causar problemas de moldagem. Reforço com fibra de vidro é possível e melhora o desempenho estrutural, mas reduz a facilidade de moldagem.

Polímeros podem ser espumados no local, moldados por injeção, extrudados, termoconformados, laminados ou fundidos. A moldagem por injeção sob baixa e alta pressão usa grânulos de material termoplástico aos quais é adicionado um agente de insuflação. A moldagem por injeção e reação é usada com polímeros termofixos, normalmente o poliuretano. A fundição de espumas, em particular de uretanos, usa moldes baratos de borracha de silicone ou de epóxi, o que viabiliza a produção de baixos volumes. Poliuretanos, epóxis, fenólicos e poliésteres também podem ser

fundidos e moldados por injeção e reação. A espumação reduz a utilização de material e aumenta a rigidez à flexão sem aumentar o peso.

A espuma de polietileno é leve, tem absorção de água desprezível e pode ser usada em forma de chapa ou película; é usada em isolamento térmico e de fios elétricos e em embalagens de alta qualidade. A espuma de poliestireno, muito usada em embalagem, é processada por moldagem de espuma expandida, extrusão, moldagem por injeção, moldagem por compressão, moldagem a sopro ou termoconformação. A espuma de poliuretano, a mais amplamente utilizada das espumas de elastômeros, forma casca durante a produção, mas não dura muito, não pode ser reciclada e não é amiga do ambiente. Desenvolvimentos na tecnologia de produção de espumas de poliuretano, como as da ICI Waterlily, superam essas desvantagens. As espumas mais comuns têm base de ABS, poliestireno, PVC, poliuretano, polietileno e fenólicos.

Usos típicos Espumas rígidas: carcaças para computadores, paletes, invólucros para baterias, estruturas para cadeiras; gabinetes para aparelhos de TV, remos, cubas de pia, paralamas, malas de viagem, cascos de barcos e carrocerias de veículos de recreação baratos, flotação, filtração, isolamento térmico. Espumas flexíveis: almofadas, embalagem, acolchoados, assentos.

Atributos de espumas de polímeros

	Espumas flexíveis	Espumas rígidas
Preço, \$/kg	1–9	2–50
Densidade, Mg/m ³	0,03–0,1	0,07–0,5

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,0001–0,01	0,05–0,5
Alongamento, %	10–100	2–10
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,002–0,1	0,01–0,1
Dureza Vickers, H _v	–	0,1–1,2
Tensão de escoamento, MPa	0,02–0,07	0,4–12
Temperatura de serviço, °C	70–110	80–150
Calor específico, J/kg·K	1750–2260	1120–1910
Condutividade térmica, W/m·K	0,04–0,08	0,03–0,6
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	115–220	20–70

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	150–190	150–180
Potencial de reciclagem	Baixo	Baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	1–2	3–4
Abafado (0), Ressonante (10)	1–2	3–4
Macio (0), Duro (10)	1–2	3–4
Quente (0), Frio (10)	8–9	8–9

Características (em relação a outros polímeros)

Macias	Rígidas e leves
Resilientes	Flutuantes
Absorvem energia	Absorvem energia

Compósitos de polímeros

Polímeros/fibra de vidro (GFRP)

GFRP, o primeiro dos compósitos de fibras moderno, foi desenvolvido após a Segunda Guerra Mundial como um material leve com alta resistência e rigidez. É feito de fibras de vidro contínuas ou picadas em uma matriz de polímero – normalmente poliéster ou epóxi. Epóxi é mais caro do que poliéster, porém de melhores propriedades. Fibras de vidro são muito mais baratas do que fibras de carbono ou Kevlar®, e, portanto, são amplamente usadas apesar de sua rigidez mais baixa do que a do carbono e menor resistência do que a do Kevlar® (as de vidro são responsáveis por 98% do mercado de fibras).

Notas de design A rigidez do GFRP é limitada pelo módulo de elasticidade relativamente baixo das fibras de vidro. O material da matriz limita o ambiente operacional a menos de 120°C. A umidade pode degradar as propriedades. Fibras curtas e descontínuas podem dar resistência à tração de quase 50% a da fibra contínua correspondente a um custo de processamento consideravelmente reduzido. Os GFRPs podem ter enchimentos e ser coloridos sob encomenda. Para reduzir a possibilidade de deslaminagem, trincas e rachaduras, é preciso evitar vazios, mudanças abruptas de seção e cantos vivos. Há diversos graus de fibra de vidro, diferentes em composição e propriedades. O vidro E é o reforço padrão. O vidro C tem melhor resistência à corrosão do que o vidro E; os vidros R e S têm melhores propriedades mecânicas do que o E, mas são mais caros. O vidro AR resiste a álcalis, o que permite que seja usado para reforçar cimento. Resinas termofixas, como poliésteres e epóxidos, são normalmente fornecidas sob a forma de xaropes viscosos que umedecem as fibras e nelas penetram e se fixam quando misturados com o catalisador. Resinas termoplásticas como o polipropileno ou a poliamida são sólidas que ficam macias com aquecimento; a dificuldade é conseguir com que se misturem bem com o vidro.

Usos típicos Cascos de barcos, assentos de trem, vasos de pressão, componentes automotivos, equipamentos esportivos, acessórios de cozinha e banheiro.

Polímeros/fibra de carbono (CFRP)

CFRPs são os materiais da indústria do esporte e da indústria aeroespacial. São feitos de fibras de carbono embebidas em uma matriz de polímero, normalmente epóxi ou poliéster. Fibras de carbono têm resistência e rigidez muito altas, e são leves – muito mais leves do que as de vidro. Isso faz dos CFRPs o compósito preferido para aplicações aeroespaciais, estruturais e outras que exigem alto desempenho. Epóxi é mais caro do que o poliéster concorrente, mas oferece melhores propriedades e melhor adesão às fibras, resultando em um compósito com excelente resistência à fadiga. O CFRP está sendo utilizado cada vez mais como substituto do alumínio em estruturas de naves aeroespaciais para reduzir o peso – a Força Aérea dos Estados Unidos vem usando aeronaves com componentes estruturais de CFRP desde 1972.

Notas de design O carbono tem módulo de elasticidade mais alto do que o do vidro e é muito mais caro, o que limita o CFRP a aplicações

nas quais a alta rigidez é importante. Normalmente é preto por causa da cor das fibras, mas a matriz pode ser tingida. Para reduzir a possibilidade de deslaminção, trincas e rachaduras, é preciso evitar vazios, mudanças abruptas de secção e cantos vivos. Os CFRPs têm boa resistência à fluidez e à fadiga, baixa dilatação térmica, baixo coeficiente de atrito e desgaste, características de amortecimento de vibrações e estabilidade ambiental. Podem ser condutores de eletricidade, o que os torna opacos a ondas de rádio. São usados principalmente como reforço de fibras contínuas para resinas epóxi e, mais recentemente, em resinas termoplásticas como PP ou PEEK. As fibras são classificadas em quatro graus: alto módulo de elasticidade (HM), alta resistência (HS), módulo de elasticidade ultra-alto (UHM) e resistência ultra-alta (UHS) – com custo crescente nessa ordem. Resinas termofixas como poliésteres e epóxidos são normalmente fornecidas sob a forma de xaropes viscosos que umedecem as fibras e nelas penetram, e se fixam quando misturados com o catalisador. Como ocorre com o CFRP, a matriz limita a temperatura máxima de utilização do compósito a 120°C, e pode absorver água – não são boas em ambientes quentes e úmidos.

Usos típicos Estruturas de aeronaves, barcos, carros de corrida, raquetes de tênis, varas de pescar, hastes de tacos de golfe, bicicletas de alto desempenho.

Atributos de compósitos de polímeros (quase isotrópicos)

	GFRP	CFRP	KFRP
Preço, \$/kg	9–20	50–61	120–140
Densidade, Mg/m ³	1,75–1,95	1,55–1,6	1,37–1,40

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	21–35	50–60	23–30
Alongamento, %	0,8–1	0,3–0,35	0,3–0,4
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	6–25	6–15	6–40
Dureza Vickers, H _v	12–22	12–23	10–21
Tensão de escoamento, MPa	200–500	500–1050	130–150
Temperatura de serviço, °C	140–220	140–220	120–200
Calor específico, J/kg·K	1000–1200	900–1000	510–680
Condutividade térmica, W/m·K	0,4–0,5	1,3–2,6	0,20–0,26
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	8,6–11	2–4	9,4–15

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	250–300	600–800	400–500
Potencial de reciclagem	Baixo	Baixo	Baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	5–6	7–8	5–6
Abafado (0), Ressonante (10)	4–5	5–6	4–5
Macio (0), Duro (10)	6–7	7–8	6–7
Quente (0), Frio (10)	5–6	5–6	5–6

Características (em relação a outros polímeros)

Baixo custo	Rígido e leve	Excepcionalmente leve
Resistente à corrosão	Forte e leve	Rígido e forte
Resistente a impacto	Durável	Duro



Atributos dos aços-carbono

Preço, \$/kg	0,40–0,60
Densidade, Mg/m ³	7,8–7,9

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	200–216
Alongamento, %	4–47
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	12–92
Dureza Vickers, H _v	120–650
Tensão de escoamento, MPa	250–1755
Temperatura de serviço, °C	–70–360
Calor específico, J/kg·K	440–520
Condutividade térmica, W/m·K	45–55
Dilatação térmica, 10 ⁶ /K	10–14

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	57–72
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	9
Abafado (0), Ressonante (10)	6–7
Macio (0), Duro (10)	9
Quente (0), Frio (10)	9
Refletividade, %	59

Características

(em relação a outros metais)

Rígido e forte
Duro
Barato

Aços-carbono

O que são? Pensar em aço é pensar em rodovias, plataformas de petróleo, caminhões-tanques e arranha-céus. E aquilo em que pensamos não é apenas aço, é aço-carbono. Esse é o metal que tornou tudo isso possível – nada mais é ao mesmo tempo tão forte, tão duro, tão facilmente conformado – e tão barato.

Notas de design Aços-carbono são ligas de ferro com carbono. Aços de baixo carbono, ou aços “doces”, são os que têm o menor teor de carbono – menos que 0,25%. São relativamente macios, fáceis de laminar como placas, perfis em duplo tê (I) ou hastes (para concreto armado) e são os mais baratos dos metais estruturais – são esses que são usados em escala gigantesca como armação (reforço), em edifícios de estrutura de aço, em chapas navais e assemelhados. O aço de médio teor de carbono (0,25–0,5% de carbono) endurece quando resfriado rapidamente em água (“temperado”) – uma qualidade que dá grande controle sobre as propriedades. A capacidade de endurecimento (*hardenability*) mede o grau de endurecimento possível em seções grossas; aços-carbono comuns têm baixa capacidade de tempera – elementos de liga adicionais são usados para aumentá-la (veja Aços de Baixa Liga). Aços-carbono de médio teor de carbono são usados em enorme escala para trilhos de ferrovias; há muitas outras aplicações de menor volume. Aços de alto teor de carbono (0,5–1,6% de carbono) atingem dureza ainda maior, suficiente para utilização em ferramentas de corte, talhadeiras e cabos, e “cordas de piano” – as cordas de metal de pianos e violinos. Para quantidades maiores de carbono, temos ferro fundido (1,6–4% de carbono), fácil de fundir, mas com propriedades não tão boas quanto as do aço.

Usos típicos A utilização de aços de baixo teor de carbono é tão ampla que nenhuma lista seria completa. Concreto armado, perfis estruturais para construção, chapas para telhados e coberturas, painéis de carrocerias de automóveis, latas e produtos de chapas prensadas dão uma ideia do escopo de aplicações. Aços de médio teor de carbono são os materiais de construção e da engenharia em geral, de eixos e engrenagens, mancais, bielas e virabrequins. Aços de alto teor de carbono são usados para ferramentas de corte, mancais de alto desempenho, manivelas e eixos, molas, facas, machados de alpinismo e patins para patinação no gelo.

Materiais concorrentes Em muitas aplicações os aços-carbono simplesmente não têm concorrência. Onde o que se busca é maior capacidade de endurecimento e maior desempenho, os aços de baixa liga desbancam os aços-carbono. Onde extrema resistência à corrosão é necessária, os aços inoxidáveis assumem a liderança – mas são caros.

O ambiente A energia gasta na produção do aço é comparativamente mais baixa – por unidade de peso, aproximadamente a metade gasta na produção de polímeros; no entanto, por unidade de volume, consome duas vezes mais. Aços-carbono são fáceis de reciclar e a energia consumida para tal é pequena.

Observações técnicas As duas classificações-padrões para aços, os padrões AISI e SAE, agora são uma só. No sistema SAE-AISI, cada aço tem um código de quatro dígitos. Os dois primeiros dígitos indicam os

principais elementos de liga. Os outros dois dígitos dão o teor de carbono em centésimos de porcentagem. Assim, as designações dos aços-carbono comuns são 10xx, 11xx, 12xx ou 14xxx, dependendo da quantidade de manganês, enxofre e fósforo que contêm. As designações dos aços-carbono comuns de baixo teor de carbono são 1015, 1020, 1022, 1117, 1118; as dos aços-carbono comuns de médio teor de carbono são 1030, 1040, 1050, 1060, 1137, 1141, 1144 e 1340; as dos aços comuns de alto teor de carbono são 1080 e 1095.



Aços inoxidáveis

O que são eles? Aços inoxidáveis são ligas de ferro com cromo, níquel e – muitas vezes – quatro ou cinco outros elementos. O processo de obtenção de ligas transforma o aço-carbono comum – que enferruja e tende à fragilidade abaixo da temperatura ambiente – em um material ao qual nada disso acontece. De fato, a maioria dos aços resiste à corrosão na maior parte dos ambientes normais, e continuam dúcteis às mais baixas temperaturas.

Notas de design O aço inoxidável deve ser usado eficientemente para justificar seu custo mais alto, explorando sua alta robustez e alta resistência à corrosão. O projeto econômico usa perfis simples, laminados e finos, soldas ocultas para eliminar acabamentos, e acessos adequados à fabricação (como para a usinagem quando ela se faz necessária). O acabamento superficial pode ser controlado por laminação, polimento ou jateamento. Aços inoxidáveis são selecionados, em primeiro lugar, por sua resistência à corrosão, em segundo lugar, por sua resistência mecânica e, em terceiro lugar, por sua facilidade de fabricação. A maioria dos aços inoxidáveis é difícil de curvar, trefilar e cortar, exigindo baixas velocidades de corte e ferramentas de geometria especial. Estão disponíveis em chapas, tiras, placas, barras, fios e tubulações, e podem ser soldados ou brasados com facilidade. É possível soldar aço inoxidável, mas o metal de enchimento deve ser selecionado para garantir composição equivalente de modo a manter a resistência à corrosão. Os da série 300 são os mais aptos à soldagem; e os da série 400 são os menos aptos à soldagem.

Usos típicos Vagões ferroviários, caminhões, trailers, equipamentos para processar alimentos, pias, fogões, utensílios de cozinha, cutelaria, louças rasas, detalhes arquitetônicos em metal, equipamentos de lavanderia, equipamentos de processamento químico, peças para motores a jato, instrumentos cirúrgicos, componentes para fornos e caldeiras, peças para queimadores de óleo combustível, equipamentos para processamento de petróleo, equipamentos para a indústria de laticínios, equipamentos para tratamento térmico, acabamentos automotivos.

Materiais concorrentes Aço-carbono eletrolgalvanizado ou pintado; ligas com base de níquel; titânio e suas ligas.

O ambiente Aços inoxidáveis são aprovados pela FDA – de fato, eles são tão inertes que podem ser implantados no corpo humano. Todos podem ser reciclados.

Observações técnicas Aços inoxidáveis são classificados em quatro categorias: as séries 200 e 300 de ligas austeníticas (Fe-Cr-Ni-Mn), a série 400 de ligas ferríticas (Fe-Cr), as ligas martensíticas (Fe-Cr-C) também fazem parte da série 400, e ligas obtidas por têmpera por precipitação ou PH (Fe-Cr-Ni-Cu-Nb) cujas designações começam com S. Aços inoxidáveis austeníticos têm excelente resistência a marcas e à corrosão e não são magnéticos (uma forma de identificá-los). O aço inoxidável grau 304 é típico: 74% de ferro, 18% de cromo e 8% de níquel. Neste caso, o cromo protege por criar uma película protetora de Cr_2O_3 em todas as superfícies expostas. O níquel estabiliza a austenita cúbica de face centrada, dando ductibilidade e resistência em altas e baixas temperaturas.

Atributos dos aços inoxidáveis

Preço, \$/kg	1,20–8,50
Densidade, Mg/m ³	7,4–8,1

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	189–210
Alongamento, %	0,5–70
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	12–280
Dureza Vickers, H _v	130–600
Tensão de escoamento, MPa	170–2090
Temperatura de serviço, °C	–270–850
Calor específico, J/kg·K	400–530
Condutividade térmica, W/m·K	11–29
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	9–20

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	83–115
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	6–7
Macio (0), Duro (10)	9
Quente (0), Frio (10)	7–8
Refletividade, %	60–80

Características

(em relação a outros metais)

Durabilidade	
Extremos de temperatura	
Rígidos e fortes	

Aços de baixa liga

O que são? O ferro puro é um metal macio. Adicione carbono e trate-o a quente da maneira correta e você pode obter um material que é quase tão duro e frágil quanto o vidro ou tão duro e dúctil quanto uma chapa de caldeira. “Tratamento a quente” significa aquecer o aço até aproximadamente 800°C para dissolver o carbono, e então resfriá-lo rapidamente (quase sempre mergulhando-o em água fria) e “temperá-lo” – reaquecer o material até uma temperatura mais baixa e mantê-lo nessa temperatura. O resfriamento rápido transforma o aço em “martensita” dura e frágil; a têmpera lenta restaura a tenacidade e reduz a dureza. O controle do tempo e da temperatura de têmpera dá o controle das propriedades. É uma maravilha o que 1% de carbono pode fazer. Mas (e sempre tem um “mas”) a taxa de resfriamento naquele momento inicial tem de ser rápida – mais de 200°C/segundo para aços-carbonos comuns. Não há nenhuma dificuldade para transformar a superfície de um componente em martensita, mas o interior esfria mais lentamente porque o calor tem de ser conduzido para fora. Se o componente tiver mais do que alguns milímetros de espessura, há um problema – o interior não esfria com suficiente rapidez – que é resolvido por uma liga. Adicione um pouco de manganês, Mn, níquel, Ni, molibdênio, Mo ou cromo, Cr, e a taxa de resfriamento crítica cai, o que permite que as seções espessas endureçam e então sejam temperadas. Aços ligados para essa finalidade são denominados “aços de baixa liga”, e a propriedade que eles têm é denominada “capacidade de têmpera” (*hardenability*).

Notas de design Aços de baixa liga podem ser tratados a quente – a maioria dos outros aços-carbono não – e são usados somente para aplicações nas quais a dureza ou a resistência é um aspecto importante, em particular em grandes seções. Eles têm maior resistência à abrasão, tenacidade mais alta e melhor resistência a altas temperaturas do que os aços-carbonos comuns. Aços-liga com teor de carbono de 0,30 e 0,37% são usados para resistência moderada e grande tenacidade; 0,40–0,42% para resistência mais alta e boa tenacidade; 0,45–0,50% para alta dureza e resistência com tenacidade moderada; 0,50–0,62% para dureza (molas e ferramentas); 1% para alta dureza e resistência à abrasão (rolamentos de esferas ou roletes).

Usos típicos Molas, ferramentas, rolamentos de esferas, roletes, virabrequins, engrenagens, bielas.

Materiais concorrentes Aços-carbono, aços inoxidáveis.

O ambiente A fabricação de aços não é particularmente intensiva em energia, e eles são fáceis de reciclar.

Observações técnicas O sistema AISI-SAE para aços de baixa liga funciona do mesmo modo que para os aços-carbono comuns. Cada aço tem um código de quatro dígitos; os dois primeiros dígitos indicam os principais elementos da liga, os outros dois dão o teor de carbono em centésimos de porcentagem. Aços típicos são os de níquel-cromo-molibdênio, cuja designação é 43xx, mas os elementos de liga podem ser qualquer um dos seguintes: mais de 2% de silício, mais de 0,4% de cobre, mais de 0,1% de molibdênio, mais de 0,5% de níquel, mais de 0,5% de cromo.



Atributos dos aços de baixa liga

Preço, \$/kg	0,40–0,90
Densidade, Mg/m ³	7,8–7,9

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	201–217
Alongamento, %	3–38
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	14–210
Dureza Vickers, H _v	140–700
Tensão de escoamento, MPa	245–2255
Temperatura de serviço, °C	–70–660
Calor específico, J/kg·K	410–530
Condutividade térmica, W/m·K	34–55
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	10,5–13,5

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	60–83
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	9–9
Abafado (0), Ressonante (10)	6–8
Macio (0), Duro (10)	9
Quente (0), Frio (10)	8–9
Refletividade, %	40–60

Características

(em relação a outros metais)

Excepcionalmente fortes
Rígidos
Relativamente baratos



Ligas de alumínio

O que são elas? Houve uma época em que o alumínio era tão raro e precioso que o Imperador Napoleão III da França tinha um conjunto de talheres feito desse material que lhe custou mais do que se fosse de prata. Mas isso foi em 1860; hoje, 150 anos depois, colheres de alumínio são coisas que jogamos fora – um testemunho de nossa capacidade de sermos tecnicamente criativos e ao mesmo tempo perdulários. O alumínio, a primeira das “ligas leves” (com magnésio e titânio), é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre (depois do ferro e do silício), mas extraí-lo demanda muita energia. Ele acabou sendo o segundo metal mais importante na economia (o aço é o primeiro), e o principal esteio da indústria aeroespacial.

Notas de design Ligas de alumínio são leves, podem ser fortes e é fácil trabalhar com elas. O alumínio puro tem condutividade elétrica e condutividade térmica notáveis (o cobre é o seu único concorrente) e é relativamente barato – embora seu preço seja mais do que duas vezes o do aço. É um metal reativo – em forma de pó pode explodir –, mas quando em massa, forma-se uma película de óxido (Al_2O_3) em sua superfície que o protege contra a corrosão por água e ácidos (mas não por álcalis fortes). Ligas de alumínio não são boas para superfícies deslizantes – elas arranham a superfície – e a resistência à fadiga das ligas de alta resistência é ruim. O alumínio quase puro (ligas da série 1000) é usado para pequenos utensílios e conexões; ligas de alta resistência são utilizadas na indústria aeroespacial (séries 2000 e 7000); e ligas de média resistência que podem ser extrudadas são usadas nos setores automotivos e da engenharia em geral (série 6000).

Usos típicos Engenharia aeroespacial; engenharia automotiva; chassis fundidos em matriz para eletrodomésticos e eletrônicos; forros e divisórias para a construção civil em construções; chapas para recipientes e embalagem; latas de bebida; condutores elétricos e térmicos.

Materiais concorrentes Magnésio, titânio, CFRP para estruturas leves; aço para latas; cobre para condutores.

O ambiente O minério de alumínio é abundante. A extração do alumínio demanda muita energia, mas ele é fácil de reciclar com baixo custo em energia.

Observações técnicas Até 1970, as designações de ligas de alumínio forjado eram uma confusão; em muitos países elas eram simplesmente numeradas na ordem de seu desenvolvimento. O International Alloy Designation System (IADS), agora amplamente aceito, dá a cada liga forjada um número de quatro dígitos. O primeiro dígito indica o principal (ou os principais) elemento da liga. Assim, a série 1xxx descreve alumínio não ligado; a série 2xxx contém cobre como o principal elemento de liga, e assim por diante. A esses números de série é adicionado um sufixo F, O, H, ou T que indica o estado de endurecimento ou tratamento a quente. Na designação da AAUS para ligas fundidas, o primeiro dígito indica o grupo da liga. No grupo 1xx.x, os dois dígitos seguintes indicam a pureza; nos outros grupos indicam os elementos da liga. Nos grupos 2xx.x a 9xx.x, os dois dígitos seguintes são simplesmente números seriais. O dígito à direita do ponto decimal indica a forma do produto: 0 significa “fundidos”, 1 significa “lingote”.

Atributos das ligas de alumínio

Preço, \$/kg	1,30–5,70
Densidade, Mg/m ³	2,50–2,95

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	68–88,5
Alongamento, %	1–44
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	18–40
Dureza Vickers, H _v	20–150
Tensão de escoamento, MPa	30–510
Temperatura de serviço, °C	–270–180
Calor específico, J/kg·K	857–990
Condutividade térmica, W/m·K	76–235
Dilatação térmica, 10 ⁶ /K	16–24

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	235–335
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	5–8
Macio (0), Duro (10)	8–9
Quente (0), Frio (10)	9–10
Refletividade, %	80–92

Características

(em relação a outros metais)

Leves
Resistentes à corrosão
Fáceis de reciclar

Ligas de magnésio

O que são elas? Magnésio é o segundo do trio dos metais leves (com seus parceiros alumínio e titânio) destacando-se fortemente por essa característica: o peso de uma carcaça de computador feita de magnésio mal chega a dois terços do peso de uma feita de alumínio. Ele e seus parceiros são os esteses da engenharia aeroespacial.

Notas de design A grande demanda por equipamentos eletrônicos leves e compactos (*laptops*, telefones celulares) e veículos leves (rodas, peças de metal no interior dos automóveis) inspirou os designers a considerar as ligas de magnésio com mais atenção do que nunca, e isso estimulou a produção e provocou uma queda nos preços. O que elas oferecem? O magnésio tem baixa densidade, bom amortecimento mecânico, condutividade térmica muito melhor do que a do aço, condutividade elétrica não tão boa quanto a do cobre, mas ainda a ser destacada. Sobrevive bem no ambiente protegido de uma casa ou escritório, mas sofre grande corrosão em água salgada e ácidos; até o suor é suficiente para manchá-lo. O magnésio é inflamável, mas isso só é problema quando em forma de pó ou de chapa muito fina. Custa mais do que o alumínio, mas nada que se compare com o preço do titânio. É fácil de usinar, porém, em razão de sua baixa rigidez, as peças devem estar firmemente presas durante o processo. Ligas de magnésio destinam-se a finalidades de conformação específicas. Algumas (como a AZ31B) são boas para extrusões. Outras (AZ63, AZ92 E AM100) foram formuladas para fundição por cera perdida; as da faixa AZ91 são usadas para fundição em molde. A maioria das ligas de magnésio pode ser soldada usando métodos TIG ou MIG; e tanto a junção por soldagem como por adesivos é viável. Soldagem a pontos e soldagem por costura são possíveis, mas somente para aplicações sob baixa tensão; rebitar é melhor, desde que sejam utilizados rebites de alumínio para evitar corrosão galvânica.

Usos típicos Indústria aeroespacial; indústria automotiva; equipamentos esportivos; recipientes para combustível nuclear; amortecimento de vibrações e blindagem de máquinas-ferramenta; fundidos para carcaças de motores; rodas de automóveis; escadas; carcaças para equipamentos eletrônicos, equipamentos de escritório e cortadores de grama.

Materiais concorrentes Titânio, alumínio, CFRP.

O ambiente O magnésio é o quinto metal mais abundante na crosta terrestre, e o terceiro nos oceanos – e pode ser extraído economicamente de ambos (o mar Morto, espesso de tantos sais nele dissolvidos – é a melhor fonte de todas). Porém, sua extração demanda muita energia, consumindo três vezes mais por unidade de peso do que os polímeros comerciais, e quase duas vezes mais do que o alumínio. Pode ser reciclado, e a reciclagem mal usa um quinto da energia despendida na extração.

Observações técnicas O sistema de classificação da American Society for Testing Materials (ASTM) é o mais amplamente usado. Nesse sistema, as duas primeiras letras indicam os principais elementos da liga. A letra correspondente ao elemento presente em maior quantidade vem em primeiro lugar; se as quantidades forem iguais, vêm em ordem alfabética. As letras são seguidas por números que representam as composições nominais dos principais elementos da liga em porcentagem de peso arredondada até o número inteiro mais próximo; assim, AZ91 significa a liga com 90% Mg, 9% Al e 1% Zn.



Atributos das ligas de magnésio

Preço, \$/kg	2,60–11,40
Densidade, Mg/m ³	1,73–1,95

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	40–47
Alongamento, %	1,5–20
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	12–70
Dureza Vickers, H _v	35–135
Tensão de escoamento, MPa	65–435
Temperatura de serviço, °C	–40–300
Calor específico, J/kg·K	950–1060
Condutividade térmica, W/m·K	50–156
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	24,6–30

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	300–500
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	3–6
Macio (0), Duro (10)	8
Quente (0), Frio (10)	8–9
Refletividade, %	68

Características

(em relação a outros metais)

Excepcionalmente leve
Fáceis de fundir em molde
Resistência adequada



Ligas de titânio

O que são elas? Titânio é o sétimo metal mais abundante na crosta terrestre, mas extrair o metal do óxido no qual ele ocorre naturalmente é particularmente difícil. Isso faz do titânio, o terceiro membro do trio de ligas leves, de longe o mais caro dos três (mais do que dez vezes o preço do alumínio). Apesar disso, a utilização do titânio está crescendo, impulsionada por suas notáveis propriedades. Tem alto ponto de fusão (1660°C), é leve e – embora reativo – resiste à corrosão da maioria dos produtos químicos, protegido por uma fina película de óxido em sua superfície. Ligas de titânio são excepcionalmente fortes para seu peso, e podem ser usadas a temperaturas de até 500°C – pás de compressão de turbinas de aeronaves são feitas desse material. Elas têm condutividade térmica e elétrica inusitadamente baixas e baixos coeficientes de dilatação.

Notas de design Ligas de titânio são caras e exigem processamento a vácuo para impedir a reação com o oxigênio, que as torna frágeis. Porém, elas são extraordinariamente fortes, leves e resistentes à corrosão, tanto que o titânio puro pode ser implantado no corpo humano para reparar ossos quebrados. Normalmente, o titânio é ligado com alumínio e vanádio (Ti com 8% Al 6%V, ou simplesmente Ti–6–4) para dar um material que pode ser forjado e usinado e ainda assim ter boa resistência à fluidez. A ductilidade das ligas de titânio é limitada – chapas não podem ser facilmente curvadas até raios menores do que 1,5 vez sua espessura. Podem ser soldadas – com dificuldade – mas são fáceis de unir por difusão. A tendência à miniaturização de eletrônicos comerciais dá ao titânio uma importância crescente no design de produtos. Agora as carcaças de telefones celulares e computadores portáteis são tão finas que os polímeros não conseguem suportar a tensão de deformação – não são rígidos nem fortes o suficiente. A resistência e a baixa densidade do titânio o tornam – apesar de seu custo – um substituto atraente.

Usos típicos Pás de turbinas de avião; aplicações aeroespaciais em geral; engenharia química; trocadores de calor; bioengenharia; área médica; tanques de combustível para mísseis; trocadores de calor, compressores, carcaças de válvulas, implantes cirúrgicos, ferragem náutica, equipamento para produção de polpa de papel, carcaças para telefones celulares e computadores portáteis.

Materiais concorrentes Magnésio, alumínio, CFRP

O ambiente A extração de titânio de seus minérios demanda muita energia. Podem ser reciclados desde que não estejam contaminados com oxigênio.

Observações técnicas Há quatro grupos de ligas de titânio: ligas α ligas quase α , ligas α - β e ligas β . As ligas α são hcp, as ligas β são bcc. As ligas α são as preferidas para aplicações de alta temperatura em razão de sua resistência à fluidez e para aplicações criogênicas por conta de sua boa tenacidade a baixas temperaturas. Um sistema de designação que tem certa lógica é simplesmente apresentar as quantidades das principais adições de elementos de liga; assim, “Ti–8–1–1” contém 8% de alumínio, 1% de molibdênio e 1% de vanádio; e “Ti–6–4” significa 6% de alumínio e 4% de vanádio.

Atributos das ligas de titânio

Preço, \$/kg	21,00–28,00
Densidade, Mg/m ³	4,36–4,84

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	90–137
Alongamento, %	1–40
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	14–120
Dureza Vickers, H _v	60–380
Tensão de escoamento, MPa	172–1245
Temperatura de serviço, °C	–40–500
Calor específico, J/kg·K	510–650
Condutividade térmica, W/m·K	3,8–20,7
Dilatação térmica, 10 ^{–6} /K	7,9–11

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	750–1250
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	5–8
Macio (0), Duro (10)	8–9
Quente (0), Frio (10)	7–8
Refletividade, %	44–53

Características

(em relação a outros metais)

Excepcionalmente fortes
Excepcionalmente resistentes à corrosão
Duras

Ligas de níquel

O que são? A moedinha de 5 centavos (um níquel) dos Estados Unidos, como seu nome sugere, é feita de níquel puro. Observe uma delas – há muito o que aprender: que o níquel é um metal dúctil e prateado, que pode ser facilmente conformado por estampagem (ou por laminação ou forjamento), é duro quando usinado, e tem boa resistência à corrosão. Nada mal para uma moeda de cinco centavos. O que a moedinha não revela é que o níquel tem mais dois conjuntos notáveis de propriedades. Um é o efeito que ele tem quando ligado com aço, que estabiliza a estrutura cúbica de face centrada que dá a ductibilidade e a resistência à corrosão ao aço inoxidável (sua maior utilização isolada). O outro é sua resistência em altas temperaturas, que pode ser elevada ligando-o para produzir os materiais dos quais todos os motores de aeronaves a jato dependem. Essas ligas têm propriedades tão extremas que são conhecidas como “superligas”.

Notas de design O níquel puro tem boa condutividade elétrica, condutividade térmica e robustez, além de resistência à corrosão; o níquel e suas ligas são usados em aplicações náuticas para trocas de calor em outras estruturas. Ligas de níquel-ferro têm alta permeabilidade magnética (boa para isolamento eletrônico e bobinas magnéticas e baixa dilatação térmica (boa para junções vidro-metal). Invar, uma liga com base de níquel, tem essencialmente um coeficiente de dilatação térmica zero próximo à temperatura ambiente; uma contração magnética contrabalança a dilatação térmica ordinária, e a cancela. Ligas de níquel-cromo-ferro têm alta resistência elétrica e são usadas como elementos de aquecimento em torradeiras e fornos industriais. Chapas bimetalicas de níquel ligado a cobre são usadas como acionadores para termostatos e dispositivos de segurança. Ligas de níquel baseadas na combinação níquel-titânio-alumínio têm tenacidade, resistência à temperatura e resistência ao ataque por gases excepcionalmente altas. Essas superligas, que portam nomes como Nimonic, Inconel e Hastelloy são usadas para pás de turbinas, discos e câmaras de combustão, equipamentos de engenharia química e design para alta temperatura.

Usos típicos Os principais usos do níquel são como um elemento de liga em aços inoxidáveis e superligas; pás, discos e câmaras de combustão em turbinas e motores de jatos, motores de foguetes, tiras bimetalicas, termopares, molas, equipamentos para processamento de alimentos, resistências de aquecimento, eletrolgalvanização para proteção contra corrosão, cunhagem de moedas e baterias de níquel-cádmio.

Materiais concorrentes Superligas com base de ferro (desempenho inferior); superligas com base de cobalto (mais caras); aços inoxidáveis.

O ambiente Aproximadamente 10% da população é sensível ao níquel, o que provoca reações até mesmo ao níquel presente no aço inoxidável de correias de relógios. Compostos de níquel podem ser mais tóxicos; a carbonila de níquel, usada na extração do níquel, é mortífera.

Observações técnicas Adicionar 8% de níquel ao aço estabiliza a austenita, produzindo aços dúcteis até temperaturas criogênicas. O níquel em superligas se combina com outros elementos de liga, em particular titânio e alumínio, para formar precipitados de Ni_3Al e Ni_3Ti intermetálicos.



Atributos das ligas de níquel

Preço, \$/kg	4,30–28,60
Densidade, Mg/m ³	7,65–9,3

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	125–245
Alongamento, %	0,3–70
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	65–150
Dureza Vickers, H _v	75–600
Tensão de escoamento, MPa	70–2100
Temperatura de serviço, °C	–200–1200
Calor específico, J/kg·K	365–565
Condutividade térmica, W/m·K	8–91
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	0,5–16,5

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	40–690
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	3–6
Macio (0), Duro (10)	8
Quente (0), Frio (10)	8–9
Refletividade, %	50–65

Características

(em relação a outros metais)

Excepcionalmente resistentes à corrosão
Altas temperaturas
Rígidas, fortes e duras



Ligas de zinco

O que são elas? A gíria em francês para um bar ou pub é “le zinc”; os balcões de bares na França costumavam ser revestidos de zinco – muitos ainda são – para protegê-los contra os estragos do vinho e da cerveja. Superfícies de balcões de bar têm formas complexas – um tampo plano, perfis curvos, bordas arredondadas ou perfiladas. Essas duas frases dizem muito sobre o zinco: é higiênico; sobrevive à exposição a ácidos (vinho), a álcalis (fluidos de limpeza), à má utilização (clientes bêbados) e é fácil de conformar. Essas são algumas das razões por que o zinco ainda é usado hoje. Uma outra é a “fundibilidade” das ligas de zinco – seu baixo ponto de fusão e fluidez lhe dá um lugar de liderança na fundição em matriz. Os moldes são relativamente baratos, e os detalhes são reproduzidos com precisão.

Notas de design Grande parte do zinco é usado na eletrolgalvanização do aço para melhorar a resistência à corrosão. As ligas de zinco para fundição em molde são fortes o suficiente para a maioria dos produtos de consumo; e o metal em si é barato. Elas são a resposta metálica para os polímeros moldados por injeção. Ligas de zinco oferecem mais resistência do que outras ligas para fundição em molde, com exceção das de cobre. Peças fundidas em moldes podem manter tolerâncias rigorosas em seções delgadas e são fáceis de usar. O zinco forjado está disponível em tiras, chapas, folhas, hastes, arames e gabaritos para forjamento ou extrusão. As curvas em chapas de zinco laminadas devem estar em ângulo reto em relação à direção do grão ou da laminação, e os raios não podem ser menores do que a espessura da chapa.

Usos típicos Telhados, calhas, refletores de lanternas, tampas de jarros de fruta, proteção contra radiação, gaxetas, chapas de fotogravura, trincos e cabos, engrenagens, componentes automotivos, balcões de cozinhas e galvanização protetora.

Materiais concorrentes Design de produtos: ligas de alumínio para fundição em molde, termoplásticos que podem ser moldados por injeção; proteção contra corrosão; niquelagem, cromeação, revestimento com polímeros em pó e aço inoxidável.

O ambiente O vapor de zinco é tóxico – quando inalado poderá ocasionar a chamada “tremedeira dos chapeleiros” – porém atualmente equipamentos de proteção individual já são universais. De qualquer maneira, o zinco é uma estrela: não é tóxico, tem baixo conteúdo de energia e – em massa – pode ser reciclado (com exceção do eletrolgalvanizado).

Observações técnicas A maioria das ligas de zinco é fundida em molde; para isso, as ligas de primeira qualidade são a AG40A e a AC41A. O zinco forjado é obtido por laminação a quente de placas fundidas, por extrusão ou por repuxamento. A folha de zinco é obtida pela eletrolgalvanização do zinco sobre um tambor de alumínio; em seguida a folha é separada do tambor. Ligas de zinco superplásticas podem ser obtidas por métodos normalmente usados para polímeros – conformação a vácuo, moldagem por compressão – bem como por processos tradicionais para metais como repuxamento profundo e extrusão por impacto.

Atributos das ligas de zinco

Preço, \$/kg	0,90–2,90
Densidade, Mg/m ³	5,5–7,2

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	60–110
Alongamento, %	1–90
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	10–130
Dureza Vickers, H _v	30–160
Tensão de escoamento, MPa	50–450
Temperatura de serviço, °C	–45–120
Calor específico, J/kg·K	380–535
Condutividade térmica, W/m·K	95–135
Dilatação térmica, 10 ^{–6} /K	14–40

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	50–145
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8
Abafado (0), Ressonante (10)	4–7
Macio (0), Duro (10)	8–9
Quente (0), Frio (10)	9
Refletividade, %	74–85

Características

(em relação a outros metais)

Fáceis de fundir em molde
Resistentes à corrosão
Fáceis de usar

Extrusão e forjamento são usados para ligas de zinco-manganês. Ligas de zinco forjadas são fáceis de soldar e de soldar por pontos. Frequentemente o zinco é usado sem revestimento. Pode ser polido, texturizado, eletrolgalvanizado ou pintado.



Cobre, latão, bronze

O que são eles? Nos tempos vitorianos a roupa era lavada em uma tina ou tanque de folha de cobre batido (um *copper*, em inglês) aquecida ao fogo; o dispositivo explorava a alta ductibilidade, bem como a condutividade térmica do material. O cobre tem um lugar distinto na história da civilização: habilitou a tecnologia da Idade do Bronze (3000 a.C a 1000 d.C.). É usado em muitas formas: como cobre puro, como ligas de cobre e zinco (latões), como ligas de cobre e estanho (bronzes) e como níquel-cobre e berílio-cobre. A designação de “cobre” (*copper*) é usada quando a porcentagem de cobre é maior do que 99,3%.

Notas de design Cobre e suas ligas são fáceis de fundir, laminar, transformar em placas, repuxar, transformar em fios e conformar de outros modos. Resistem à corrosão atmosférica, adquirindo uma atraente pátina verde (carbonato de cobre) ao ar limpo e preta (sulfeto de cobre) em ar que não é limpo – os telhados de cobre das cidades normalmente são pretos. A pátina de bronze é de uma rica e quente cor marrom, muito amada pelos escultores. O cobre puro tem excelente condutividade elétrica e térmica, é fácil de fabricar e unir, tem boa resistência à corrosão e robustez razoável. Quando é necessária alta condutividade, usa-se cobre de alta condutividade isento de oxigênio (OFHC). Em sua forma recozida é macio e dúctil; se temperado, o material torna-se mais duro, porém, menos dúctil. Em presença de latão e bronze, a liga aumenta a resistência. Os mais comuns são os “latões de cartuchos de armas de fogo” (usados em instrumentos musicais, ferragens e – é claro, munição), os “latões amarelos” (usados em molas e parafusos) e os “metais Muntz” (usados em aplicações arquitetônicas e tubos de condensadores). O latão usado em cartuchos de munição, com 30% de zinco, tem a ductibilidade mais alta de todas e é usado para repuxar fios de latão. Bronzes são excepcionalmente líquidos quando fundidos, o que permite a fundição de formas intrincadas.

Usos típicos Condutores elétricos, trocadores de calor, cunhagem de moedas, painéis, chaleiras e caldeiras, chapas para entalhe e gravação, tetos e arquitetura, esculturas fundidas, fiação de circuitos eletrônicos, tubulação de aquecimento e instrumentos musicais.

Materiais concorrentes Alumínio para condutores e condução térmica, aço inoxidável para culinária e proteção.

O ambiente Cobre e suas ligas são particularmente fáceis de reciclar – em muitos países a fração reciclada é de quase 90%.

Observações técnicas Agora há um sistema de designação UNS para o cobre e suas ligas: a letra C (para “cobre”) seguida por um número de cinco dígitos. Somente o primeiro dígito significa alguma coisa: C1**** designa cobre quase puro, as séries C2, C3 e C4 são latões com teores crescentes de zinco, a série C5 são bronzes com base de cobre e estanho, a série C6 são outros bronzes que contêm alumínio em vez de estanho, e a série C7 são ligas de níquel-cobre.

Atributos de cobre, latão, bronze

	Cobre	Latão	Bronze
Preço, \$/kg	1,72–1,93	1,43–2,00	3,72–5,44
Densidade, Mg/m ³	8,93–8,94	7,8–8,8	8,5–9
Atributos técnicos			
Módulo de elasticidade, GPa	121–133	90–120	70–120
Alongamento, %	4–50	5–55	2–60
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	40–100	30–86	24–90
Dureza Vickers, H _v	44–180	50–300	60–240
Tensão de escoamento, MPa	45–330	70–500	65–700
Temperatura de serviço, °C	–270–180	–270–220	–270–200
Calor específico, J/kg·K	372–388	372–383	382–385
Condutividade térmica, W/m·K	147–370	110–220	50–90
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	16,8–17,9	16,5–20,7	16,5–19
Atributos ecológicos			
Conteúdo de energia, MJ/kg	100–130	100–120	110–120
Potencial de reciclagem	Alto	Alto	Alto
Atributos estéticos			
Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–8	8–8	8–8
Abafado (0), Ressonante (10)	6–9	6–9	5–10
Macio (0), Duro (10)	8–9	8–9	8–9
Quente a frio,	0–10	9–10	9–9
Refletividade	51–91	50–90	50–80
Opaco			
Características (em relação a outros metais)			
	Dúctil e duro	Fácil de conformar e unir	Resistente à corrosão e durável
	Fácil de fundir e usar	Excelente resistência ao desgaste	Ressonante (campainhas e sinos)
	Excepcional condutividade de calor	Relativamente barato	Fácil de fundir

Cerâmicas

Alumina

A alumina (Al_2O_3) é para as cerâmicas técnicas o que o aço doce é para os metais – barata, fácil de processar, o burro de carga da indústria. É o material das velas de ignição e dos isolantes elétricos. Na forma de um único cristal é safira, usada para mostradores de relógios e janelas de carlingas de aeronaves de alta velocidade. Normalmente é produzida por prensagem e sinterização de pó, que resulta em graus de pureza que vão de 80 a 99,9% de alumina; o resto é porosidade, impurezas vítreas ou componentes adicionados deliberadamente. Aluminas puras são brancas; impurezas as tornam rosas ou verdes. A temperatura máxima de operação aumenta com o aumento do teor de alumina. A alumina tem baixo custo e um amplo e útil conjunto de propriedades: isolamento elétrico, alta resistência mecânica, boa resistência à abrasão e resistência a temperaturas de até 1650°C , excelente estabilidade química e condutividade térmica moderadamente alta, mas resistência limitada a choque térmico e a impacto. Óxido de cromo é adicionado para melhorar a resistência à abrasão; silicato de sódio para melhorar a processabilidade, mas com alguma perda de resistência elétrica. Materiais concorrentes são: magnésia, sílica e vidro de borossilicato.

Usos típicos Isolantes, elementos de aquecimento, substratos microeletrônicos, radomos, próteses ósseas, implantes dentários, blindagem de tanques, isolantes de velas de ignição, matrizes para repuxamento de fios, bocais para soldagem e jateamento de areia.

Carboneto de boro

O carboneto de boro (B_4C) é quase tão duro quanto o diamante e muitíssimo menos caro (embora não chegue a ser barato). Sua densidade muito baixa e alta dureza o torna atraente para a camada externa de coletes à prova de bala e como abrasivo.

Usos típicos Coletes à prova de bala ou blindagens leves, superfícies à prova de bala, abrasivos, bocais para jateadores de areia, termopares de alta temperatura.

Carboneto de tungstênio

O carboneto de tungstênio (WC) é mais comumente usado na forma de um carboneto “cimentado”, ou cermet: um carboneto de metal mantido coeso por uma pequena quantidade (5–20%) de aglutinante metálico, normalmente cobalto. Sua dureza e estabilidade excepcionais o tornam um material atraente quando a resistência ao desgaste é essencial. Suas propriedades são governadas pelo tipo de carboneto, tamanho e forma do grão e proporção de carboneto em relação ao metal. Cermets são caros, mas, como ferramentas de corte, sobrevivem a velocidades de corte dez vezes maiores do que a melhor ferramenta de aço. A conformação normalmente é feita por compressão, sinterização, e então são acabadas superficialmente no esmeril; a borda ou ponta da ferramenta é unida por brasagem a uma haste ou lâmina feita de aço mais barato. O carboneto de tungstênio pode ser revestido a vapor com nítreto de titânio para melhorar ainda mais a resistência ao desgaste.

Atributos da alumina (97,5%)

Preço, \$/kg	4–12
Densidade, Mg/m^3	3,7–3,8

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	333–350
Alongamento, %	0
Tenacidade à fratura, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	3,6–3,8
Dureza Vickers, H_v	1400–1600
Resistência à tração	175–200
Temperatura de serviço, $^\circ\text{C}$	-270–1700
Calor específico, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	635–700
Condutividade térmica, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	25–30
Dilatação térmica, $10^{-6}/\text{k}$	6,7–7

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	150–200
Potencial de reciclagem	baixo

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	8–9
Abafado (0), Ressonante (10)	8–9
Macio (0), Duro (10)	8–9
Quente (0), Frio (10)	7–8

Características

(em relação a outras cerâmicas)
 Temperaturas excepcionalmente altas
 Excepcionalmente resistentes à corrosão
 Excelentes isolantes elétricos

Usos típicos Ferramentas de corte, lâminas de serras, brocas odontológicas, brocas de perfuração de poços de petróleo, matrizes para repuxamento de fios, bordas de lâminas de facas.

Carboneto de silício

O carboneto de silício (SiC, carborundum), obtido pela fusão de areia e coque a 2200°C, é o material usado em lixas de alta qualidade. É muito duro e mantém sua resistência em alta temperatura, tem boa resistência a choque térmico, excelente resistência à abrasão e estabilidade química; porém, como todas as cerâmicas, é frágil. O carboneto de silício é um material de cor preta azulada. Fibras de SiC de alta resistência como Nicalon, fabricadas por processos CVD, são usadas como reforço em compósitos com matriz de cerâmica ou de metal.

Usos típicos Ferramentas de corte, materiais para matrizes e moldagem, conversores catalisadores, componentes de motores, vedações mecânicas, mancais corrediços, luvas de proteção contra desgaste, tubos de trocadores de calor; equipamentos para fornos, elementos de aquecimento.



Vidro

Vidro de cal de soda

Vidro de cal de soda é o vidro das janelas, garrafas e bulbos de lâmpadas, usado em vastas quantidades, o mais comum de todos. O nome sugere sua composição: 13–17% NaO (a “soda”), 5–10% CaO (a “cal”) e 70–75% SiO₂ (o “vidro”). Tem baixo ponto de fusão, é fácil de soprar e moldar, e é barato. É ópticamente límpido a menos quando impuro, situação em que é tipicamente verde ou marrom. Hoje as janelas têm de ser planas e – até 1950 – isso não era fácil de fazer; agora, o processo de flutuação, que solidifica o vidro em um leito de estanho líquido, produz vidro “plano” com custo baixo e rapidamente.

Usos típicos Janelas, garrafas, recipientes, tubulação.

Vidro de borossilicato

Quando grande parte da cal no vidro de cal de soda é substituída por bórax, B₂O₃, ele se torna vidro de borossilicato (Pyrex®). Tem ponto de fusão mais alto do que o do vidro de cal de soda e é mais difícil de ser trabalhado; entretanto, tem coeficiente de dilatação mais baixo e alta resistência a choque térmico, o que permite seu uso para vidraria e equipamentos de laboratório.

Usos típicos Vidraria de laboratório, vidraria para fornos, faróis dianteiros, isolantes elétricos, vedações metal/vidro, espelhos de telescópios, miras, indicadores de nível, tubulação.

Vidro de sílica

A sílica é um vidro de grande importância. É praticamente SiO₂ puro, tem ponto de fusão excepcionalmente alto e é difícil de ser trabalhado, porém, mais do que qualquer outro vidro, resiste à temperatura e ao choque térmico.

Usos típicos Envelopes para lâmpadas de alta temperatura.

Vitrocerâmica

Vitrocerâmicas são vidros que, em maior ou menor extensão, se cristalizaram. São conformados enquanto no estado vítreo por métodos de moldagem comuns, e em seguida resfriados de modo tal que os aditivos que contêm provocam a nucleação de pequenos cristais. É vendido para cozinhar com o nome de Pyroceram e é usado para aplicações de alto desempenho resistentes ao calor.

Usos típicos Utensílios de cozinha, superfícies de fogões, aplicações de alto desempenho resistentes ao calor.

Atributos do vidro de cal de soda

Preço, \$/kg	0,68–1
Densidade, Mg/m ³	2,44–2,5

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	68–72
Alongamento, %	0
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,55–0,7
Dureza Vickers, H _v	440–480
Resistência à tração	31–35
Temperatura de serviço, °C	–270–250
Calor específico, J/kg·K	850–950
Condutividade térmica, W/m·K	0,7–1,3
Dilatação térmica, 10 ^{–6} /K	9–9,5

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	20–25
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Tom grave (0), Tom agudo (10)	7–8
Abafado (0), Ressonante (10)	8–9
Macio (0), Duro (10)	7–8
Quente (0), Frio (10)	5–6

Características

(em relação a outros vidros)

Ópticamente límpidos
Fáceis de moldar
Baixo custo

Fibras

O que são elas? Fibras nos vestem, nos acarpetam, nos envolvem em almofadas, nos mantêm aquecidos e protegidos. São a substância de tramas, de cordas, de tecidos, de têxteis e de compósitos reforçados com fibras. Fibras têm uma virtude exclusiva: são fortes, porém flexíveis – puxe-as e elas resistem, flexione-as e elas obedecem. Se fiadas como cordas ou tramadas como tecidos, elas herdam as mesmas propriedades. É possível fabricar fibras de metal – são usadas para reforçar pneus de carros –, mas metais são pesados. Mais interessantes são as leves, rígidas e fortes. Aqui apresentamos algumas que, em razão de sua resistência e flexibilidade, permitem a criação de materiais novos.

Fibras de vidro

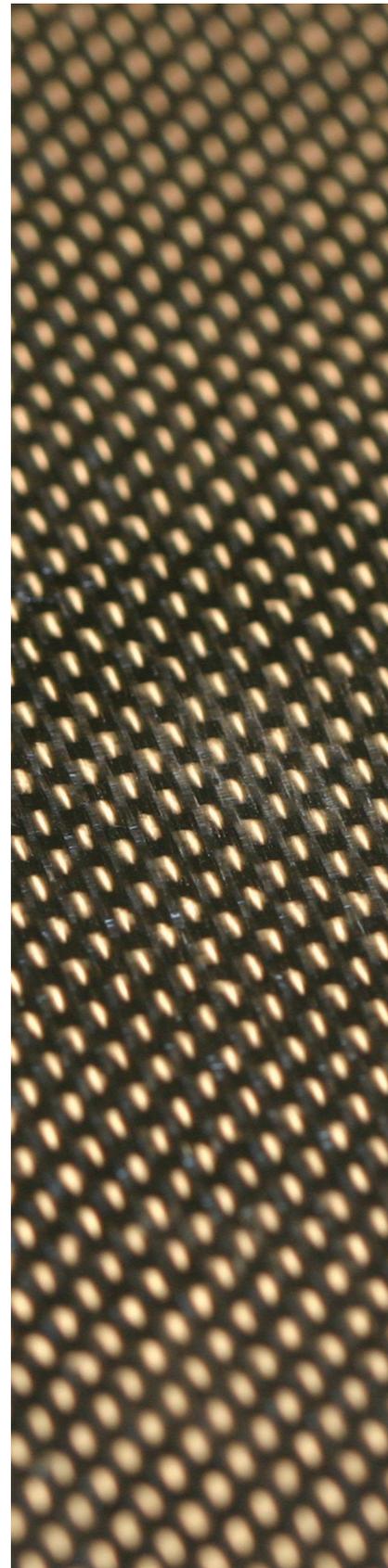
Fibras de vidro são feitas por repuxamento de vidro fundido em uma máquina de fiar, o que produz fibras contínuas de diâmetros entre 10 e 100 μm . Sua perfeição lhes dá excepcional resistência sob tração, e ainda assim são flexíveis. Podem ser agregadas em feltro solto cuja condução de calor é muito baixa (usado para isolamento térmico em residências). Podem ser tramadas em um tecido e impressas ou coloridas para dar um substituto resistente à chama para cortinas ou colchas (quando o tecido tramado é tratado com silicone, pode ser usado até 250°C). Sob a forma de cordão picado ou como fibras ou novelos contínuos (feixes de fibras), são usadas como reforço em polímeros reforçados com fibra de vidro, GFRPs. Há vários graus de fibras de vidro, diferentes em composição e resistência. O vidro E é o reforço-padrão. O vidro C tem melhor resistência à corrosão do que o E; o R e o S têm melhores propriedades mecânicas do que o E, mas são mais caros. O vidro AR resiste a álcalis, o que permite que seja usado para reforçar cimento.

Usos típicos Isolamento térmico, tecido resistente à chama, reforço de polímeros para fazer GFRP.

Fibras de carbono

Fibras de carbono são produzidas por pirólise de fibras orgânicas como viscose, rayon ou poliacrilonitrila (PAN), ou obtidas do piche de petróleo. O tipo PAN tem as melhores propriedades mecânicas, mas as obtidas do piche são mais baratas. As fibras PAN são primeiro estiradas para obter alinhamento, então oxidadas ao ar em temperaturas ligeiramente elevadas, em seguida carbonizadas em um ambiente inerte a temperaturas muito altas e, finalmente, aquecidas sob tração para converter a estrutura cristalina à da grafita. Fibras de carbono têm alta resistência e rigidez com baixa densidade, mas se oxidam em altas temperaturas a menos que a atmosfera seja redutora. São classificadas em quatro graus: alto módulo de elasticidade, alta resistência, módulo de elasticidade ultra-alto e resistência ultra-alta – o custo aumenta nessa mesma ordem. As fibras isoladas são muito finas ($< 10 \mu\text{m}$ de diâmetro); em geral são fiadas em novelos e tramadas em têxteis. A utilização primordial das fibras é como reforço em matrizes de polímero, metal ou carbono.

Usos típicos Reforço de polímeros para produzir CFRP, e de metais e cerâmicas para obter compósitos em matriz de metal ou em matriz de cerâmica. Carbono reforçado com fibra de carbono é usado para sapatas de freios em carros de corrida e aeronaves.





Fibras de carboneto de silício

Fibras de carbono se oxidam, o que limita sua utilização contínua acima de 400°C. Fibras de carboneto de silício (por exemplo, Nicalon) foram desenvolvidas para superar essa dificuldade. São usadas quando é necessário ter alto módulo de elasticidade em temperaturas muito elevadas. As fibras são produzidas por pirólise de uma fibra de polímero ou por processamento CVD e vêm em uma gama de tamanhos e formas, incluindo fibras contínuas, maçarocas, fibras picadas, novelos multifilamentos e tecidos tramados.

Usos típicos Reforço para compósitos com matriz de metal e cerâmica.

Fibras de aramida

Originalmente produzidas pela DuPont com o nome de Kevlar, as fibras de aramida são processadas de tal modo que as cadeias de polímeros ficam alinhadas paralelamente ao eixo da fibra. A unidade química é uma poliamida aromática com uma estrutura em anel que oferece alta rigidez; a forte ligação covalente oferece alta resistência. Estão disponíveis em forma de baixa densidade/alta resistência (Kevlar 29®) e em forma adequada para reforço (Kevlar 49®). A primeira é usada em cordas, cabos e blindagem; a segunda como reforço em polímeros para componentes aeroespaciais, náuticos e automotivos. Fibras Nomex têm excelente resistência a chama e abrasão; são inseridas em um papel que é usado para construir estruturas alveoladas. Esses materiais são excepcionalmente estáveis e têm boa resistência, tenacidade e rigidez até 170°C.

Usos típicos Como tecido tramado: vestimentas de proteção, proteção contra projéteis e bombas e, em combinação com cerâmica de carboneto de boro, coletes à prova de bala. Como papel: núcleos alveolados para painéis sanduíche. Sob a forma de fibras e tramas: como reforço em compósitos com matriz de polímero.

Cânhamo

O cânhamo é uma fibra valorizada por sua grande resistência. É usada para cordões, cordas, sacos, embalagem e, cada vez mais, como um reforço em polímeros. Outros materiais para cordas, como o abacá, são mais resistentes à água e substituíram o cânhamo em aplicações náuticas. Até agora, compósitos reforçados com cânhamo não podem ser reciclados, mas o cânhamo é um recurso renovável e o consumo de energia para produzi-lo é baixo – bem mais baixo do que para carbono ou Kevlar®.

Usos típicos Cordas e tecidos resistentes; reforço em compósitos com matriz de polímero.

Materiais naturais

Bambu

O bambu é a dádiva da natureza para a indústria da construção. Pense nele: um tubo oco, excepcionalmente forte e leve, que cresce com tanta rapidez que pode ser colhido em um ano, e – se lhe dermos um pouco mais de tempo – alcança um diâmetro de 0,3 metros e uma altura de 15 metros. Isso e sua superfície dura e a facilidade de trabalho faz dele o mais versátil dos materiais. Bambu é usado para construção e andaimes, para telhados e assoalhos, para tubos, baldes, cestas, bengalas, varas de pescar, venezianas, tapetes, flechas e móveis. O bambu Tonkin é forte e flexível (varas de pescar); o bambu Tali é usado para aplicações estruturais (casas ou móveis); o bambu Eeta é o que cresce mais rapidamente e é utilizado como uma fonte de celulose para a produção de celulose ou Rayon.

Balsa

A balsa é outro dos milagres da natureza: excepcionalmente leve, flutua e é isolante, e ainda assim é forte e rígida no sentido do grão. A balsa é usada em salva-vidas, boias, flutuadores, painéis, isolamento de vibração, divisórias de isolamento, arremates internos de aeronaves e aeromodelos. Hoje, a sua principal utilização é como núcleo para cascos sanduíche de iates e barcos a motor; nesse caso é usada a balsa *end-grain*, que significa que o grão forma um ângulo reto com a face do casco ou painel.

Cortiça

Cortiça é a casca subcutânea do carvalho-corticeiro, *Quercus Suber*. Sua estrutura celular é composta de até 80% de ar em volume. Quando seca, a cortiça é leve, porosa, fácil de comprimir e elástica. Tem baixa condutividade térmica, é carbonizada a 120°C, pega fogo com dificuldade, somente quando em contato com uma chama. A cortiça é uma espuma natural de células fechadas e é à prova d'água e notavelmente estável, sobrevivendo no gargalo de uma garrafa de vinho até 30 anos sem estragar nem contaminar a bebida. Chapas de cortiça, obtidas por compressão a quente de cortiça granulada, são usadas para isolamento de tetos e paredes contra calor e som. A cortiça é usada para rolhas de garrafa, isolamento, controle de vibração, flutuadores, isolamento e embalagem para transporte de frutas. Em forma prensada, é usada para gaxetas, retentores de óleo, rodas de polir e como componente do linóleo.

Couro

O couro é um tecido natural. Tem alta resistência à tração e é excepcionalmente duro e resiliente, e ainda assim flexível e – como a camurça – é macio ao toque. É preparado por curtimento do couro de animais, um processo malcheiroso no qual a pele é imersa em soluções de taninos durante semanas ou meses, o que os torna flexíveis e resistentes à deterioração. O couro é usado para cintos, gaxetas, sapatos, jaquetas, bolsas, revestimentos internos e coberturas.



Madeira

A madeira tem sido usada para fazer produtos desde os primeiros tempos de que temos registro. Os antigos egípcios a usavam em móveis, esculturas e ataúdes antes de 2500 a.C. Os gregos, no ápice de seu império (700 a.C.) e os romanos, no ápice do deles (aproximadamente no ano zero d.C.) construíam elaborados barcos, carruagens e armas de madeira, e estabeleceram o ofício da fabricação de móveis que subsiste ainda hoje. Maior diversidade de utilização surgiu nos tempos medievais com a utilização de madeira para construções de grande escala e em mecanismos como bombas, moinhos de vento e até relógios, tanto que, no final do século XVII, a madeira era o principal material de engenharia. Desde então, o ferro fundido, o aço e o concreto vêm desbancando a madeira em algumas de suas utilizações, mas ela continua a ser usada em escala maciça.

A madeira oferece uma notável combinação de propriedades. É leve e, no sentido paralelo ao grão, é rígida, forte e dura – tão boa, por unidade de peso, quanto qualquer material feito pelo homem. É barata, renovável, e a energia em combustível fóssil necessária para cultivá-la e cortá-la é contrabalançada pela energia que ela captura do sol durante o crescimento. É fácil de usinar, esculpir e unir e – quando laminada – pode ser moldada em formas complexas. E é esteticamente agradável, tanto em cor quanto em toque, e associada com artesanato e qualidade.

Espumas de metal

O que são elas? Metais que flutuam na água? Não parece sensato. No entanto, as espumas de metal flutuam – algumas têm densidade menor do que um décimo da densidade da água. São uma nova classe de material, ainda imperfeitamente caracterizada, mas com propriedades sedutoras. São leves e rígidas, têm boas características de absorção de energia (o que as torna boas para embalagens e proteção contra choque) e propriedades atraentes de transferência de calor (usadas para resfriar equipamentos eletrônicos como trocadores de calor em motores). Algumas têm células abertas, muito parecidas com espumas de polímeros, porém, com as características de metais (ductilidade, condutividade elétrica, soldabilidade, e assim por diante). Outras têm células fechadas, como uma “cortiça metálica”. E são visualmente atraentes, o que sugere utilização em design industrial. Espumas de metal são produzidas por métodos de fundição que aprisionam o gás no metal semilíquido, ou por uma técnica de replicação que usa uma espuma de polímero como precursora. Uma vez fundidas, são tão quimicamente estáveis quanto o metal do qual foram feitas, têm o mesmo ponto de fusão e calor específico, mas densidade, rigidez e resistência muito reduzidas. Todavia, as razões rigidez/peso, resistência/peso continuam atraentes.

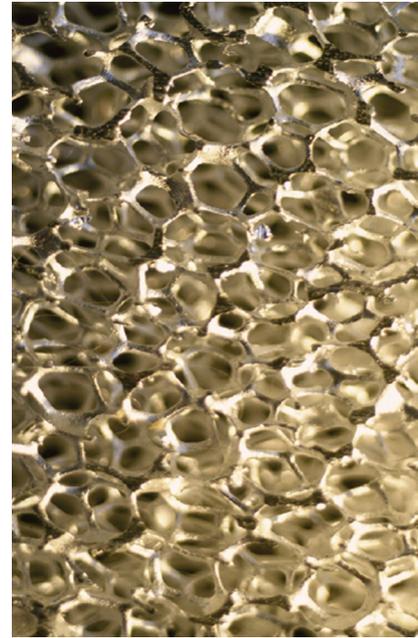
Na época da redação deste livro havia cerca de 12 fornecedores que comercializavam uma faixa de espumas de metal, a maioria baseada em alumínio, mas outros metais – cobre, níquel, titânio e aço inoxidável – já podiam ser espumados.

Notas de design Há pouco a dizer aqui. Espumas de metal podem ser usinadas e algumas podem ser fundidas até a forma desejada, mas atualmente esse processo é especializado. O melhor processo para uni-las é com adesivos, o que resulta em uma junção forte. Algumas têm uma película superficial natural de textura atraente, que se perde se a espuma for cortada. As características mais surpreendentes dos materiais são baixo peso, boa rigidez e capacidade de absorver energia quando esmagados.

Usos potenciais Espumas de metal são promissoras como núcleos para painéis-sanduíche leves e rígidos; como enrijecedores para inibir a flambagem de estruturas leves do tipo concha; como unidades de absorção de energia dentro e fora de veículos motores e trens; e como trocadores de calor eficientes para resfriar equipamentos eletrônicos de grande potência (soprando ar pelas células abertas da espuma de alumínio, ligada a uma fonte de calor). Designers industriais perceberam potencial na exploração da refletividade e filtragem da luz por espumas de células abertas, e nas interessantes texturas das espumas de células fechadas.

Materiais concorrentes Espumas rígidas de polímeros; alvéolos de alumínio; madeiras.

O ambiente Espumas de metal não são inflamáveis (diferentemente das outras espumas) e podem ser recicladas.



Atributos da espuma de alumínio de células fechadas

Preço, \$/kg	12,00–20,00
Densidade, Mg/m ³	0,07–0,5

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,02–2
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	0,03–0,5
Dureza Vickers, H _v	0,08–1
Tensão de escoamento, MPa	0,025–30
Temperatura de serviço, °C	-100–200
Condutividade térmica, W/m·K	0,3–10
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	19–21

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	250–290
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Refletividade, %	5–10
------------------	------

Características

(em relação a outros metais)

Leve
Rígida
Altas temperaturas



Imagem por cortesia de LiquidMetal.

Metais amorfos

O que são eles? Metais que são vidros? Metais amorfos, ou vítreos, certamente não são transparentes; então, o que isso quer dizer? Aqui, “vidro” é usado em um sentido técnico, que significa “um material que não tem estrutura reconhecível”. Recorrendo ao latim, dizemos que são “amorfos”. Isso pode não parecer notável, mas é – na verdade esses materiais não existiam antes de 1960, quando a primeira e minúscula lasca foi obtida por resfriamento rápido (“têmpera”) de uma complexa liga de ouro a uma taxa inacreditável de 1.000.000 C/s. Isso não sugere uma grande promessa para a produção em larga escala de materiais em massa, mas o ritmo do desenvolvimento das ligas tem sido tal que agora você pode comprar tacos de golfe com cabeças de metal amorfo.

Quando metais são fundidos, os cristais sofrem nucleação na parte mais fria do molde; esses núcleos crescem para dentro até se encontrarem, o que resulta em um sólido fundido, composto por uma grande quantidade de cristais ou grãos entrelaçados. A maioria dos metais, quando líquidos, são muito fluidos – quase tão correntes como a água –, o que significa que os átomos podem se rearranjar com facilidade e rapidamente. À medida que um cristal cresce dentro do um líquido, cada um dos átomos que se junta ao cristal tem suficiente mobilidade para procurar o lugar onde ele melhor se encaixa, e isso automaticamente amplia o cristal ordenado. Porém, se a liga tiver muitos componentes de tamanhos e afinidades diferentes, o metal se torna muito mais viscoso quando líquido – mais parecido com mel do que com água – e os átomos nele presentes têm menos mobilidade. Além disso, essa afinidade entre os diferentes componentes da liga provoca a formação de aglomerados no líquido, e esses não se arranjam facilmente para se juntar ao cristal que está crescendo. Tudo isso significa que, se a liga for resfriada rapidamente, limitando o tempo para possíveis rearranjos, o líquido simplesmente se transforma em sólido sem cristalização.

Notas de design Novas ligas com base em zircônio, titânio, ferro e magnésio, ligados com muitos outros componentes, formam vidros a taxas de resfriamento fáceis de obter, abrindo assim a exploração comercial de metais amorfos. Atualmente eles são caros (aproximadamente \$18/lb ou mais), mas suas propriedades, mesmo a esse preço, são atraentes. São muito duros e têm resistência muito alta, e são mais fortes, para o mesmo peso, do que as ligas de titânio. Podem ser moldados por técnicas de moldagem, abrindo novas rotas de processo não disponíveis para metais convencionais. Têm excelente resistência à corrosão e podem ser borrifados para produzir revestimentos que têm as mesmas propriedades.

Usos potenciais Metais vítreos são excepcionalmente duros, extremamente resistentes à corrosão e têm a combinação de propriedades que os torna melhores do que quaisquer outros metais para molas, peças de encaixe, gumes de facas, carcaças leves e fortes e outras aplicações para as quais alta resistência em seções finas são essenciais. Sua capacidade de processo também é excepcional, permitindo que sejam moldadas em formas complexas.

Materiais concorrentes Ligas de titânio, aços de alta resistência.

Atributos de metal amorfo com base de titânio

Metal

Preço, \$/kg	32,00–40,00
Densidade, Mg/m ³	6,2–6,4

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	91–100
Alongamento, %	1,9–2,1
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2}	52–57
Dureza Vickers, H _v	555–664
Tensão de escoamento, MPa	1800–2000

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	350–400
Potencial de reciclagem	Alto

Atributos estéticos

Refletividade, %	95–99
------------------	-------

Características

(em relação a outros metais)

Excepcionalmente resiliente
Excepcionalmente resistente ao desgaste
Resistente à corrosão

O ambiente Alguns metais vítreos contêm berílio, o que é um problema para o descarte. Com o rápido progresso no desenvolvimento das ligas, podemos esperar materiais que não contêm ingredientes tóxicos.



Imagem por cortesia de Nendo.

Ligas memória de forma

O que são elas? Ligas memória de forma (SMAs) são um grupo de metais que têm a notável capacidade de voltar a alguma forma definida anteriormente, quando aquecidas. Algumas exibem memória de forma somente com aquecimento (memória de forma de uma via); outras sofrem uma mudança de forma quando são novamente resfriadas (memória de forma de duas vias). Elas funcionam assim porque têm uma estrutura cristalina denominada martensita termoelástica: isso permite que a liga seja deformada por um mecanismo de torção abaixo da temperatura de transformação. A deformação é revertida quando a estrutura volta à fase original com aquecimento.

Os principais graus comerciais são as ligas de NiTi e as ligas com base de cobre CuZnAl e CuAlNi. Ligas de NiTi têm maior deformação de memória de forma (até 8% contra 4 a 5% para as ligas em base de cobre), podem gerar tensões de até 700 MPa e têm excelente resistência à corrosão; importante em aplicações médicas. As ligas com base de cobre são menos resistentes à corrosão, são suscetíveis à corrosão por fadiga – fratura –, mas são bem menos caras. A temperatura de transformação pode ser ajustada entre -200 e 110°C alterando-se a composição da liga. A máxima deformação na transformação é 8% para uma única utilização; para 100 ciclos é 6%; para 100.000 ciclos cai para 4%.

Notas de design Em dispositivos de recuperação livre, um componente SMA é deformado enquanto na fase martensítica, e a única função exigida da memória de forma é que o componente volte à sua forma anterior (com um mínimo de trabalho) com aquecimento. Uma aplicação disso é o filtro de coágulos de sangue de NiTi – um fio que é conformado para se ancorar a uma veia e apanhar os coágulos que passam por ele. A peça é resfriada para atingir uma forma adequada e ser inserida na veia; então, o calor do corpo humano é suficiente para restituir a peça à sua forma funcional.

Em dispositivos de recuperação restrita, a peça de SMA deve exercer uma força. Um exemplo é o acoplamento hidráulico fabricado como uma luva cilíndrica um pouco menor do que a tubulação de metal à qual deve se unir. O diâmetro da luva é expandido enquanto na fase martensítica e, quando a luva é aquecida até a temperatura da austenita, o diâmetro encolhe e a peça veda firmemente as extremidades do tubo.

Em aplicações de acionadores de força, o componente de memória de forma é projetado para exercer força em uma considerável faixa de movimento, frequentemente durante muitos ciclos. Um exemplo é uma válvula de segurança contra fogo, que incorpora um acionador de CuZnAl projetado para interromper o fluxo de gás tóxico ou inflamável se ocorrer algum incêndio.

Aplicações de controle proporcional usam somente uma parte da recuperação de forma para posicionar um mecanismo com precisão, explorando o fato de que a transformação ocorre em uma faixa de temperaturas.

Em aplicações superelásticas, uma liga SMA é projetada para estar acima de sua temperatura de transformação à temperatura ambiente. Isso permite que ela sofra grande deformação, mas recupere imediatamente

Atributos do nitanol, liga NiTi

Densidade, Mg/m³ 6,42–6,47

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa 8–83
 Alongamento, % 5–25
 Tensão de escoamento, MPa 195–690
 Condutividade térmica, W/m·K 17–18
 Dilatação térmica, 10⁻⁶/K 10,5–11,5

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg 320–380
 Potencial de reciclagem Alto

Atributos estéticos

Refletividade, % 80–90

Características

(em relação a outros metais)

Capacidade de reagir
 Resistente à corrosão
 Eletricamente condutiva

sua forma original quando a carga é retirada, de modo que parece elástica, como as armações de óculos superelásticas de NiTi.

Usos potenciais As propriedades das ligas de NiTi, em particular, sugerem utilização crescente em aplicações biomédicas. Elas são extremamente resistentes à corrosão e biocompatíveis, podem ser fabricadas em tamanhos muito pequenos, e têm propriedades de elasticidade e transmissão de força que permitem aplicações que não são possíveis de outro modo.



Polilactida (PLA)

O que é? Polilactida (PLA) é um termoplástico biodegradável derivado do ácido láctico natural do trigo, milho ou leite. É parecido com o poliestireno límpido, tem bons atributos estéticos (brilho e clareza), mas é rígido e frágil. O polímero pode ser composto para proporcionar uma gama mais ampla de propriedades de material. Como a maioria dos termoplásticos, pode ser processado em fibras e películas, conformado a quente ou moldado por injeção.

Notas de design O PLA é um biopolímero que pode ser moldado, conformado a quente e extrudado, exatamente como outro termoplástico. É transparente e aprovado pela FDA para embalagem de alimentos. A película e a chapa de PLA podem ser impressas e laminadas. Todavia, os biopolímeros são caros, e custam duas vezes mais que os plásticos comerciais como o polipropileno. Nomes comerciais: Natureworks Ingeo.

Usos típicos Embalagem de alimentos, sacolas plásticas, vasos de plantas, fraldas, garrafas, copos para bebidas frias, placas e películas.

Materiais concorrentes Poli-idroxialcanoatos (PHA, PHB), polímeros com base de celulose.

O ambiente O PLA é derivado de fontes renováveis e pode ser reciclado ao final de sua vida útil; porém, na maioria das vezes é bem-sucedido em situações nas quais a compostagem industrial pode ser uma opção para o fim de sua vida útil.

Observações técnicas O PLA é um termoplástico derivado primariamente de fontes renováveis anualmente (trigo, milho ou leite). Uma bactéria é usada para extrair o ácido láctico desses amidos, e então o material é polimerizado para produzir PLA. Está disponível em vários graus, projetados para facilidade de processamento. Pode ser necessária secagem durante o processo de manufatura para reduzir a quantidade de água para extrusão e moldagem. A temperatura de moldagem recomendada é 165-170°C.

Atributos do PLA

Preço, \$/kg	3,0–3,6
Densidade, Mg/m ³	1,21–1,24

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	3,45–3,8
Alongamento, %	5–7 Fr.
Tenacidade, MPa·m ^{1/2}	0,7–1,1
Dureza Vickers, H _v	14–18
Tensão de escoamento, MPa	48–69
Temperatura de serviço, °C	70–80
Calor específico, J/kg·K	1180–1210
Condutividade térmica, W/m·K	0,12–0,15
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	126–145

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	52–54
Potencial de reciclagem	Alto

Características (em relação a outros polímeros)

Biodegradável
Transparente
Rígido

Poli-idroxialcanoatos (PHA, PHB)

O que são? Poli-idroxialcanoatos (PHAS) são poliésteres lineares produzidos na natureza por fermentação bacteriana de açúcar ou lipídios derivados do óleo de soja, óleo de milho ou óleo de palmeira. São totalmente biodegradáveis. Mais de 100 monômeros diferentes podem ser combinados dentro dessa família para dar materiais com uma vasta faixa de propriedades, desde termoplásticos rígidos e frágeis até elastômeros flexíveis. O tipo mais comum de PHA é o PHB (poli-3-hidroxibutirato), com propriedades semelhantes às do PP, embora seja mais rígido e mais frágil. Um copolímero do PHB, valeriato de Poli-idroxibutirato (PBV), é menos rígido e mais duro. É comumente usado como material de embalagem.

Notas de design As propriedades físicas dos biopolímeros de PHA são parecidas com as dos plásticos sintéticos. Sua biodegradabilidade os torna uma alternativa atraente, que enfrenta os problemas cada vez maiores da poluição por resíduos plásticos. O PHB é insolúvel em água e tem boa permeabilidade ao oxigênio e resistência à radiação UV. É solúvel em clorofórmio e outros hidrocarbonetos clorados, que podem ser usados para uni-lo. Não é tóxico e é biocompatível. Pode ser moldado a sopro, moldado por injeção, termoconformado ou extrudado; também está disponível como chapa ou película. A desvantagem dos PHAs é o custo relativamente alto, o que os torna substancialmente mais caros do que o plástico. Nomes de marca: Mirel.

Usos típicos Embalagem, recipientes, garrafas, película de húmus agrícola, sacolas obtidas por compostagem, produtos de consumo descartáveis, tratamento de água.

Materiais concorrentes Ácido polilático (PLA), polímeros com base de celulose.

O ambiente PHA e PHB são derivados de fontes renováveis e sofrerão biodegradação em sistemas domésticos de compostagem e em instalações industriais de compostagem ao final de sua vida útil.

Observações técnicas Poli-idroxialcanoatos (PHAs) são uma família de poliésteres produzidos em bactérias como uma reserva de carbono e de energia. PHAs bacterianos são classificados em dois grupos de acordo com o número de átomos de carbono nas unidades de monômeros: PHAs de cadeia curta (SCL - *short chain length*) consistem em 3-5 cadeias de carbono e PHAs de cadeia média (MCL - *medium chain length*) consistem em 6-14 cadeias de carbono. As propriedades físicas dos PHAs dependem de suas unidades de monômeros. O PHA mais comumente usado é o Poli-3-hidroxibutirato (PHB).



Imagem por cortesia de Metabolix.

Atributos do PHA

Preço, \$/kg	5-6
Densidade, Mg/m ³	1,23-1,25

Atributos técnicos

Módulo de elasticidade, GPa	0,8-4
Alongamento, %	6-25
Tenacidade à fratura, MPa·m ^{1/2} ,	0,7-1,2
Dureza Vickers, H _v	11-13
Tensão de escoamento, MPa	35-40
Temperatura de serviço, °C	120
Calor específico, J/kg·K	1400-1600
Condutividade térmica W/m·K	0,13-0,23
Dilatação térmica, 10 ⁻⁶ /K	180-240

Atributos ecológicos

Conteúdo de energia, MJ/kg	50-59
Potencial de reciclagem	Alto

Características

(em relação a outros polímeros)

Biodegradáveis
Altas temperaturas
Flexíveis

Perfis de conformação

Processos de conformação dão forma a materiais. A escolha do processo depende do material, da forma, do tamanho, da precisão e do acabamento de superfície requisitados; e os custos associados dependem, de modo muito crítico, do número de componentes que serão fabricados — o tamanho do lote.

Há várias famílias abrangentes de processos de conformação, sugeridas pelo índice da próxima página. Alguns são econômicos mesmo quando o tamanho do lote é pequeno: conformação a vácuo de polímeros e fundição em areia são exemplos. Outros tornam-se econômicos somente quando fabricados em grandes escalas: moldagem de polímeros por injeção e fundição de metais em moldes, por exemplo. Variantes de cada processo são adaptadas para viabilizar a produção econômica de determinada faixa de tamanho de lote; e foram desenvolvidos alguns processos especiais viáveis para a prototipagem — tamanho do lote igual a um. Além do tamanho do lote, outros atributos de um processo são fáceis de quantificar: o tamanho das peças que pode produzir; a espessura mínima da seção que permite; a precisão das dimensões (“tolerância permitida”); a aspereza ou maciez da superfície. Um atributo, entretanto, não é fácil de quantificar: a forma. O repuxamento de fios produz somente uma forma: um cilindro. A fundição de precisão (cera perdida) produz formas de complexidade ilimitada: ocas, com reentrâncias, multiconectadas. Muitas tentativas foram feitas para classificar forma, nenhuma completamente bem-sucedida. Nesses perfis nos referiremos apenas a um conjunto simples de formas; cada um é ilustrado em uma figura na primeira página do texto.

Mais informações podem ser encontradas nas fontes citadas em Leitura adicional.

Formas genéricas	268
Leitura adicional	269

Moldagem

Moldagem por injeção	270
Moldagem rotacional	271
Moldagem por sopro.....	272
Moldagem de espuma expandida.....	273
Moldagem por compressão	274
Moldagem por transferência de resina	275

Fundição

Fundição sob pressão.....	276
Fundição em areia.....	277
Fundição de precisão.....	278
Fundição de polímeros.....	279

Conformação em massa

Laminação de perfis e forjamento em matriz	280
Extrusão	281

Conformação de chapas

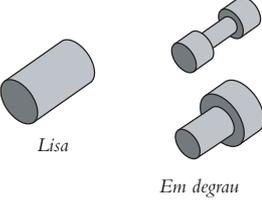
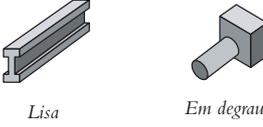
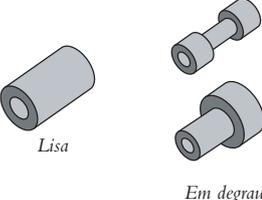
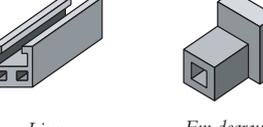
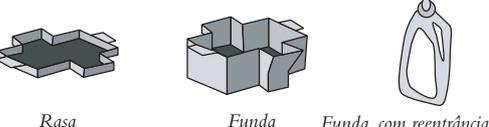
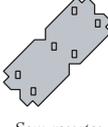
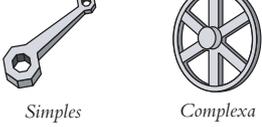
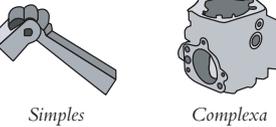
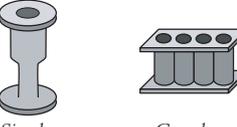
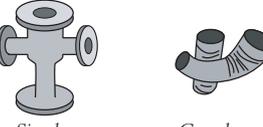
Conformação sob pressão, conformação por laminação em rolos e repuxamento	282
Termoconformação	283

Outros

Métodos de laminação de compósitos	284
Metalurgia do pó	285

Prototipagem rápida

Prototipagem a laser.....	286
Prototipagem por deposição.....	287

Prismática	CIRCULAR	NÃO CIRCULAR	
SÓLIDA	 <p><i>Lisa</i></p> <p><i>Em degrau</i></p>	 <p><i>Lisa</i></p> <p><i>Em degrau</i></p>	
OCA	 <p><i>Lisa</i></p> <p><i>Em degrau</i></p>	 <p><i>Lisa</i></p> <p><i>Em degrau</i></p>	
Parede fina	CURVA	PLANA	
SIMÉTRICA EM RELAÇÃO AO EIXO	 <p><i>Rasa</i></p> <p><i>Funda</i></p> <p><i>Funda, com reentrância</i></p>	 <p><i>Com recortes</i></p>	
ASSIMÉTRICA EM RELAÇÃO AO EIXO	 <p><i>Rasa</i></p> <p><i>Funda</i></p> <p><i>Funda, com reentrância</i></p>	 <p><i>Sem recortes</i></p>	
Em massa	CARACTERÍSTICAS PARALELAS	CARACTERÍSTICAS TRANSVERSAIS	
SÓLIDA	 <p><i>Simples</i></p> <p><i>Complexa</i></p>	 <p><i>Simples</i></p> <p><i>Complexa</i></p>	
OCA	 <p><i>Simples</i></p> <p><i>Complexa</i></p>	 <p><i>Simples</i></p> <p><i>Complexa</i></p>	

Formas genéricas
Um conjunto de formas comuns possíveis no design de produto.

Leitura adicional

ASM. *CASTING DESIGN HANDBOOK*. Cincinnati: Materials Park, 1962. (Recurso antigo, mas ainda útil.)

Bralla, J. G. (ed.). *Handbook of Product Design for Manufacture*. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998. (A bíblia: uma compilação maciça de informações sobre processos de fabricação, de autoria de especialistas de diferentes áreas, compilada por Bralla. É mais um manual do que um texto didático — não é de fácil leitura.)

Clegg, A. J. *Precision Casting Processes*. Oxford: Pergamon, 1991. (Descrições e capacidades dos principais processos de produção por fundição.)

DeGarmo, E. P., Black, J. T. e Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*. Nova York: Macmillan, 1984. (Um texto abrangente que focaliza processos de manufatura, com uma breve introdução a materiais. A perspectiva é a do processamento de metais. O processamento de polímeros e vidros ganha um tratamento muito mais resumido.)

Edwards, L. e Endean, M. (eds.). *Manufacturing with Materials: Materials in Action Series*. Londres: The Open University, 1990. (Um texto didático sobre conformação e junção de materiais, muito bem ilustrado com estudos de caso.)

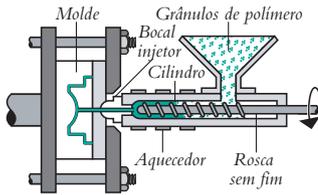
Kalpakjian, S. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Reading: Addison-Wesley, 1984. (Um texto abrangente e amplamente usado sobre processos de manufatura para todas as classes de materiais.)

Lesko, J. *Materials and Manufacturing Guide: Industrial Design*. Nova York: John Wiley & Sons, 1999. (Descrições breves, desenhos e fotografias de materiais e processos de manufatura, com úteis matrizes de características, escrito por um consultor com muitos anos de experiência em design industrial.)

Mayer, R. M. *Design with Reinforced Plastics*. Londres: The Design Council and Bourne Press, 1993. (Um texto dirigido a engenheiros que desejam executar projetos com plásticos reforçados; uma fonte de informações útil para processos de conformação para compósitos de polímeros.)

Swift, K. e Booker, J. D. *Process Selection: From Design to Manufacture*. Londres: John Wiley & Sons, 1998. (Planilhas de dados em formato padrão para 48 processos, alguns deles de conformação.)

Moldagem por injeção



Atributos da moldagem por injeção

Faixa de peso, kg	0,01–25
Espessura mínima, mm	0,3–10
Complexidade da forma	Alta
Tolerância permitida, mm	0,05–1
Aspereza da superfície, µm	0,2–1,6
Tamanho do lote econômico	10K–1.000K

O que é? Nenhum outro processo mudou mais o design de produto do que a moldagem por injeção. Produtos moldados por injeção aparecem em todos os setores do design de produto: produtos de consumo, de negócios, industriais, computadores, comunicação, produtos médicos e de pesquisa, brinquedos, embalagens de cosméticos e equipamentos esportivos. O equipamento mais comum para moldar termoplásticos é a máquina de injeção por rosca sem fim, mostrada esquematicamente no desenho. Grânulos de polímeros são alimentados em um recipiente cujo fundo é interligado à rosca sem fim onde se misturam e amolecem, adquirindo uma consistência parecida com a da massa de pão, que pode ser forçada a passar por um ou mais canais (“jitos”) e entrar em um molde. O polímero se solidifica sob pressão e então a peça é ejetada. Termoplásticos, termofixos e elastômeros, todos podem ser moldados por injeção. A co-injeção permite moldagem de peças com materiais, cores e características diferentes. A moldagem de espumas por injeção permite a produção econômica de grandes peças moldadas com a utilização de gás inerte ou agentes químicos de insuflação para fazer peças que têm uma pele ou superfície externa sólida e estrutura interna celular.

Formas Formas sólidas simples e complexas.

Notas de design A moldagem por injeção é o melhor modo de produzir em grande escala peças pequenas feitas de polímeros, precisas e de formas complexas. O acabamento superficial é bom; a textura e o padrão podem ser alterados facilmente na ferramenta e a reprodução de detalhes delicados é boa. Rótulos decorativos podem ser moldados na superfície da peça (veja Decoração em Molde). A única operação de acabamento é a remoção do canal.

Observações técnicas A maioria dos termoplásticos pode ser moldada por injeção, embora os que têm altas temperaturas de fusão (por exemplo, PTFE) sejam difíceis. Compósitos com base de termoplásticos (fibra curta e enchimento particulado) podem ser processados, desde que a carga de enchimento não seja demasiadamente grande. Grandes mudanças em áreas de seção não são recomendadas. Reentrâncias com pequenos ângulos e formas complexas são possíveis, embora algumas características (por exemplo, rebaiços, rosca de parafusos, insertos) possam resultar em mais custos de ferramental. O processo também pode ser usado com termofixos e elastômeros.

Aspectos econômicos Os custos de capital são de médios a altos, os custos de ferramental são normalmente altos — o que torna a moldagem por injeção econômica somente para grandes lotes. A taxa de produção pode ser alta, em particular para peças moldadas de pequeno tamanho. Muitas vezes são usados moldes com várias cavidades. Podem-se moldar protótipos usando-se moldes com uma única cavidade feitos de materiais mais baratos.

Produtos típicos Carcaças, recipientes, tampas, maçanetas, cabos de ferramentas, acessórios hidráulicos, lentes, brinquedos e modelos.

O ambiente Jitos termoplásticos podem ser reciclados. A extração de vapores voláteis pode ser exigida. Pode ocorrer significativa exposição ao pó na formulação das resinas. O mau funcionamento dos controladores termostáticos pode ser perigoso.

Processos concorrentes Fundição de polímeros, fundição sob pressão.



Moldagem rotacional

O que é? As cadeiras atarracadas e em cores vivas, para crianças, são exemplos do que pode ser feito com moldagem rotacional. Uma quantidade de polímero em pó, medida com antecedência, é alimentada em um molde frio, que então é aquecido em um grande forno enquanto gira simultaneamente em torno de dois eixos. Isso revolve e derrete o pó, revestindo as paredes internas do molde até uma espessura determinada pela carga inicial de pó, criando uma casca oca. A seguir, a peça resfria durante um ciclo de descanso e o molde é resfriado a ar ou com borrifos de água. O processo é mais adequado para peças grandes, ocas e fechadas, embora seja possível produzir peças pequenas, de paredes finas e criar formas abertas por usinagem subsequente.

Formas Formas simples, fechadas, ocas, de paredes finas.

Notas de design A moldagem rotacional é versátil e é um dos poucos processos que produz formas ocas (e, por consequência, eficientes na utilização de material). A baixa pressão limita uma possível sutileza de detalhes, favorecendo formas arredondadas sem detalhes finos. Inserções e seções pré-formadas de cores ou materiais diferentes podem ser moldadas no mesmo processo, o que permite escopo para criatividade. Peças com grandes aberturas — latas de lixo e cones para sinalização rodoviária, por exemplo — são moldadas em pares e separadas por corte.

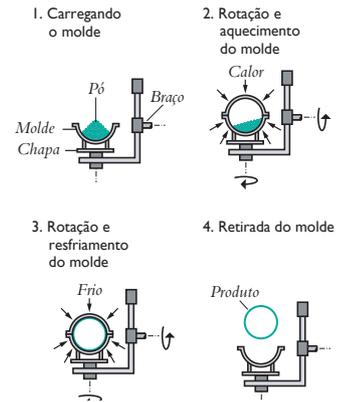
Observações técnicas Em princípio, a maioria dos termoplásticos pode ser produzida por moldagem rotacional, embora na prática normal a faixa seja mais restrita — o mais comum é o polietileno. O processo produz grandes peças, mas a espessura é limitada pela condutividade térmica do polímero, já que é preciso derreter toda a espessura. Uma vantagem: produz peças praticamente livres de tensão. É possível (mas difícil) variar a espessura da parede; mudanças abruptas de seção não são possíveis. Em razão da rotação em torno de dois eixos, o comprimento da peça é restrito a menos do que quatro vezes o diâmetro. Atualmente os termofixos também podem ser produzidos por moldagem rotacional — o poliuretano é o mais comum.

Aspectos econômicos Os custos de equipamentos e ferramental são baixos — muito mais baixos do que os da moldagem por injeção — mas os tempos de ciclos são mais longos do que os de qualquer outro processo de moldagem, e demandam mão de obra especializada.

Produtos típicos Tanques, recipientes para alimentos e contêiner para transporte, carcaças, sanitários portáteis, cones de sinalização de tráfego, brinquedos grandes, latas de lixo, baldes, cascos de barcos, paletes.

O ambiente Nenhum problema.

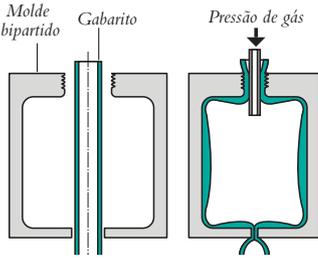
Processos concorrentes Termoconformação, moldagem por sopro; métodos de laminação de compósitos.



Atributos da moldagem rotacional

Faixa de peso, kg	0,1–50
Espessura mínima, mm	2,5–6
Complexidade da forma	Baixa
Tolerância permitida, mm	0,4–1
Aspereza da superfície, μm	0,5–2
Tamanho do lote econômico	100–10K

Moldagem por sopro



Atributos da moldagem por sopro

Faixa de peso, kg	0,001–0,3
Espessura mínima, mm	0,4–3
Complexidade da forma	Baixa
Tolerância permitida, mm	0,25–1
Aspereza da superfície, μm	0,2–1,6
Tamanho do lote econômico	1K–10.000K

O que é? Moldagem por sopro é a tecnologia do vidro soprado adaptada a polímeros. Na moldagem soprada por extrusão, um tubo ou “parison” (mangueira extrudada utilizada para produzir o componente moldado por sopro) preliminar é extrudado e preso a um molde bipartido com um mandril oco em uma extremidade. Ar quente é forçado sob pressão a atravessar o mandril, soprando o polímero contra as paredes do molde onde esfria e congela. Na moldagem soprada por injeção, uma forma preliminar é moldada por injeção sobre um mandril e transferida para o molde por sopro. Ar é injetado sob pressão por meio do mandril, soprando o polímero contra as paredes do molde onde esfria e congela, como descrito anteriormente. O processo dá melhor controle sobre o peso da peça acabada e sobre a espessura da parede do que a moldagem soprada por extrusão, com melhor precisão nas áreas do gargalo, que não são atingidas pelo sopro, e são moldadas por injeção, o que se presta a tampas rosqueadas, por exemplo. Na moldagem soprada por repuxamento, uma importante variável, a temperatura é escolhida de modo que o polímero é repuxado à medida que se expande, o que orienta as moléculas no plano da superfície. É usada na produção de garrafas PET.

Formas Formas grandes e ocas, de paredes finas.

Notas de design A moldagem soprada por extrusão permite a conformação de uma ampla variedade de formas ocas e oferece canais para ar ou líquido. A moldagem soprada por injeção multicamadas é mais comumente usada para peças que precisam ser resistentes e impermeáveis a gases; nesse caso são adicionadas camadas como barreira para impedir a difusão do gás e camadas externas para dar resistência a impacto. O acabamento externo aceita bem impressão e decoração. É possível a moldagem de reentrâncias.

Observações técnicas A moldagem por sopro é limitada a termoplásticos, normalmente PET, PC, HDPE, LSPE, PP, ABS e alguns PVCs. Níveis limitados de reforço são possíveis para materiais compósitos. A espessura da parede deve ser a mais uniforme possível para evitar distorção.

Aspectos econômicos A moldagem soprada por extrusão é o mais barato dos dois processos, porque o custo dos moldes é menor. É competitiva para grandes recipientes (capacidade acima de 0,5 l) e grandes lotes. Os custos de ferramental para a moldagem soprada por extrusão são muito mais altos e limitam o processo ao volume de produção.

Produtos típicos Moldagem soprada por injeção: garrafas e recipientes, em particular os com tampas rosqueadas. Moldagem soprada por extrusão: recipientes, caixas para ferramentas e máquinas portáteis, e grandes estruturas ocas como para-choques de automóveis.

Ambiente O material descartado pode ser reciclado. As resinas podem gerar poeira e vapores, o que exige boa ventilação.

Processos concorrentes Moldagem rotacional.

Moldagem de espuma expandida

O que é? A embalagem de proteção branca como a neve, quebradiça e leve na qual o seu computador foi entregue, a qual você descartou sem reparar em sua estética visual, foi feita por moldagem de espuma expandida de poliestireno. É um processo de baixa temperatura e baixa pressão que usa materiais de molde baratos que têm utilizações que vão bem além da embalagem descartável. Há dois estágios operacionais nesse processo. Grânulos sólidos de polímero (coloridos, quando desejado) contendo um agente espumante que, quando aquecido, libera CO_2 — um produto convencional amplamente disponível —, são primeiramente amolecidos e expandidos por aquecimento a vapor sob baixa pressão. As partículas amolecidas são transferidas para moldes de alumínio (para obter boa transferência de calor) e aquecidas a vapor a três atmosferas, o que provoca sua expansão para mais de 20 vezes do seu volume original, e se fundem preenchendo o molde e adquirindo sua forma.

Forma Formas sólidas tridimensionais.

Notas de design Peças moldadas de espuma expandida adquirem uma película macia por entrarem em contato com a superfície do molde, e aceitam detalhes desde que os raios sejam maiores do que 2mm. O produto — portanto, é atraente em termos de embalagem. É excepcionalmente bom como isolante térmico — daí sua utilização em copos descartáveis, sacolas para acondicionar alimentos congelados, paredes para refrigeradores domésticos, caminhões refrigerados e galpões de armazenagem. Cada vez mais os designers veem outras possibilidades: peças moldadas de grânulos expandidos têm propriedades acústicas interessantes, perfis complexos podem ser moldados, o material é muito leve e tem propriedades visuais e táteis interessantes. Mas os produtos são facilmente danificados.

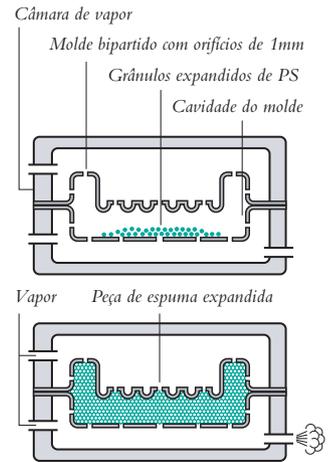
Observações técnicas Termoplásticos são fáceis de moldar, em particular o poliestireno. A moldagem de espuma expandida dá uma espuma de células fechadas com uma porosidade de 80–95%. A alta porosidade e as células fechadas a tornam um bom isolante térmico; a baixa densidade (aproximadamente 10% da densidade da água) lhe confere a sua notável propriedade de flutuação.

Aspectos econômicos A baixa pressão e temperatura de moldagem tornam esse processo particularmente barato — daí sua ampla utilização em objetos descartáveis, aparentemente sem valor.

Produtos típicos Embalagens descartáveis para bebidas e alimentos (o McDonalds foi massacrado por causa disso), equipamentos salva-vidas, produtos para esportes aquáticos como pranchas de surfe e coletes salva-vidas; isolamento térmico em resfriadores, recipientes e contêineres, materiais de núcleo para estruturas-sanduíche (caixilhos de janelas e portas, painéis de assoalhos), proteção de produtos valiosos como sistemas eletrônicos, de computadores e de áudio.

O ambiente Houve época em que agentes de insuflação à base de CFC eram usados para expansão de poliestireno. Agora esses materiais foram substituídos por gases que — no volume em que são usados — não prejudicam o ambiente.

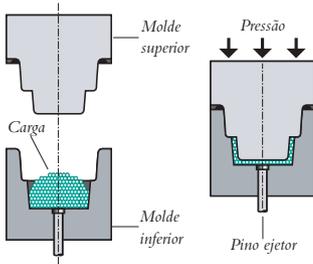
Processos concorrentes Não há nada mais barato.



Atributos da moldagem de espuma expandida

Faixa de peso, kg	0,01–10
Espessura mínima, mm	5–100
Complexidade da forma	Baixa/Média
Tolerância permitida, mm	0,5–2
Aspereza da superfície, μm	50–500
Tamanho do lote econômico	2K–1.000K

Moldagem por compressão



Atributos da moldagem de polímeros

Faixa de peso, kg	0,2–20
Espessura mínima, mm	1,5–25
Complexidade da forma	Baixa/Média
Tolerância permitida, mm	0,1–1
Aspereza da superfície, µm	0,2–2
Tamanho do lote econômico	2K–200K

Atributos da Moldagem do BMC e do SMC

Faixa de peso, kg	0,3–60
Espessura mínima, mm	1,5–25
Complexidade da forma	Baixa/Média
Tolerância permitida, mm	0,1–1
Aspereza da superfície, µm	0,1–1,6
Tamanho do lote econômico	5K–1.000K

O que é? Na moldagem por compressão, uma quantidade de polímero medida antecipadamente — em geral um termofixo — sob a forma de grânulos ou de um tablete pré-formado que contém resina e endurecedor é colocada em um molde aquecido. O molde é fechado, criando pressão suficiente para forçar o polímero a entrar na cavidade do molde. Então o material passa por um período de cura, o molde é aberto e a peça retirada. Uma variação, o forjamento de polímeros, é usada para conformar termoplásticos difíceis de moldar, como, por exemplo, o polietileno de peso molecular ultra-alto. A moldagem por compressão é amplamente usada para conformar os compósitos BMC e SMC.

Formas Formas maças simples (BMC); formas planas; formas abauladas de paredes finas (SMC).

Notas de design A moldagem por compressão é limitada a formas simples, sem rebaixos. Em geral as peças precisam de algum acabamento para remover rebarbas. Peças moldadas de BMC e SMC têm bom acabamento de superfície e dimensionamento preciso, suficientemente boas para que os fabricantes de automóveis as usem como componentes externos da carroceria. Peças moldadas de SMC dão painéis e carcaças de alta qualidade; formas nas quais a espessura da chapa é mais ou menos uniforme. Peças moldadas de BMC dão formas tridimensionais simples com mudanças de seção.

Observações técnicas BMC (*Bulk Molding Compound* — composto para moldagem em massa) e SMC (*Sheet Molding Compound* — composto para moldagem de chapas) são diferentes na forma e na quantidade de reforço e enchimento. O BMC tem menos (15–25% de fibra de vidro) e é o mais fácil de moldar em formas tridimensionais. O SMC tem mais fibra de vidro (até 35%) e é limitado a chapas. O DMC (*Dough Molding Compound* — composto para moldagem em massa) é a gênese — uma mistura parecida com massa de pão de poliéster, poliuretano ou epóxi termofixos com endurecedor, fibras de vidro picadas, recheio e agente corante. Outros dois — o GMT (*Glass Mat Thermoplastic* — termoplástico de tapete de vidro) e o TSC (*Thermoplastic Sheet Compounds* — compostos de placa termoplástica) — são os termoplásticos equivalentes com base de náilon 6 ou de propileno. A expressão “massa de pão” (*dough*) transmite muito bem o modo como são conformados: espremidos entre dois moldes, como se fossem a crosta de uma torta.

Aspectos econômicos Os custos de ferramental são modestos para a moldagem de polímeros, e são mais altos para a moldagem de BMC e SMC. Para esses dois últimos, o lote econômico é maior.

Produtos típicos Componentes elétricos e eletrônicos, louça de mesa, agitadores de máquinas de lavar roupa, cabos de utensílios, tampas de recipientes, carcaças de eletrodomésticos; SMC: painéis de carrocerias e para-choques para carros e caminhões, caixas para relógios de medição de consumo de gás e energia elétrica e carcaças para componentes elétricos. BMC: formas mais complicadas.

O ambiente O processo em si não prejudica o ambiente, mas rebarbas e sucatas de termofixos não podem ser recicladas.

Processos concorrentes Moldagem por injeção; moldagem por transferência de resina; métodos de laminação de compósitos.

Moldagem por transferência de resina

O que é? Moldagem por transferência de resina (RTM — *Resin Transfer Molding*) é um modo fácil de fabricar formas complexas utilizando compósitos reforçados com fibras sem altos custos de ferramental. Usa um molde fechado, com duas ou mais partes, normalmente feito de polímeros reforçados com vidro ou ligas metálicas leves, com pontos de injeção e orifícios para escape do ar. O reforço é recortado na forma desejada e colocado dentro do molde, juntamente com quaisquer insertos ou acessórios. O molde é fechado e uma resina termofixa de baixa viscosidade (normalmente poliéster) é injetada sob baixa pressão por um cabeçote misturador no qual o endurecedor é misturado com a resina. Deixa-se o molde para curar à temperatura ambiente. A fluidez da resina e a baixa pressão de moldagem dão às ferramentas uma vida mais longa com baixo custo.

Formas Formas maças simples; painéis conformados.

Notas de design A moldagem por transferência de resina está sendo usada cada vez mais para grandes peças de polímeros reforçados com fibras. As formas podem ser complexas. Nervuras, protuberâncias e reentrâncias são possíveis. Painéis de espuma podem ser moldados por inserção para reduzir o peso da peça.

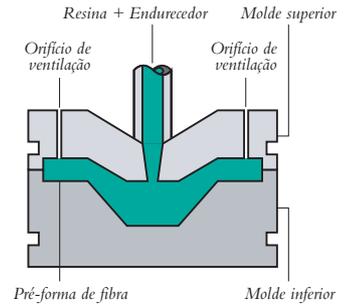
Observações técnicas Uma grande variedade de resinas pode ser usada com RTM: praticamente qualquer resina termofixa com baixa viscosidade é viável, por exemplo, poliéster, epóxis, ésteres de vinila e fenólicas. Normalmente o reforço é uma fração em volume entre 25–30% de vidro ou carbono na forma de uma manta de fibras contínuas.

Aspectos econômicos Os custos de ferramental são baixos e o processo não demanda mão de obra particularmente especializada, o que o torna atraente do ponto de vista econômico.

Produtos típicos Tampas de poços de inspeção, molde de argila aglomerada/comprimida, painéis laterais de portas de automóveis, pás de hélices, barcos e remos, reservatórios de água, banheiras, telhas e componentes, portas de saídas de emergência de aviões.

O ambiente Com o molde fechado, munido de aberturas para escape de ar — e ventilação adequada — é fácil controlar emissões, portanto, a exposição de trabalhadores a produtos químicos desagradáveis é drasticamente reduzida em comparação com outros processos de compósitos.

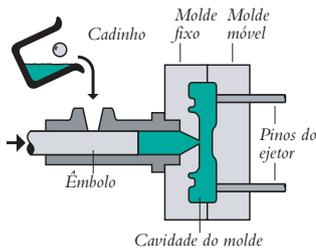
Processos concorrentes Métodos de laminação de compósitos; moldagem sob pressão, moldagem de BMC e SMC.



Atributos da moldagem por transferência de resina

Faixa de peso, kg	0,2–20
Espessura mínima, mm	1,5–13
Complexidade da forma	Média/Alta
Tolerância permitida, mm	0,25–1
Aspereza da superfície, µm	0,2–1,6
Tamanho do lote econômico	10K–100K

Fundição sob pressão



Atributos da fundição sob pressão

Faixa de peso, kg	0,05–20
Espessura mínima, mm	1–8
Complexidade da forma	Média/Alta
Tolerância permitida, mm	0,15–0,5
Aspereza da superfície, μm	0,5–1,6
Tamanho do lote econômico	5K–1.000K

O que é? A maioria das pequenas peças de alumínio, zinco ou magnésio com formas complexas — corpos de máquinas fotográficas, carcaças, chassis para gravadores de vídeo — é feita por fundição sob pressão. Ela é para os metais o que a moldagem por injeção é para os polímeros e as duas concorrem diretamente. No processo, metal fundido é injetado sob alta pressão em um molde de metal por meio de um sistema de jitos e canaletas. A pressão é mantida até que a peça se solidifique, quando o molde é aberto e a peça ejetada. Para lotes grandes, os moldes são usinados com precisão em aço resistente ao calor e resfriados com água para aumentar a sua vida útil. Para lotes pequenos, é possível utilizar materiais mais baratos.

Formas Formas maciças complexas; formas ocas têm de ser moldadas em seções e unidas em seguida.

Notas de design A fundição sob pressão permite formas com paredes finas e excelentes detalhes superficiais. A integridade das propriedades do material não é tão boa: o enchimento turbulento do molde e tempo de ciclo rápido podem resultar em contração e porosidade. O processo pode produzir formas complexas, mas núcleos móveis e elaborados aumentam os custos de ferramental.

Observações técnicas A fundição sob pressão é amplamente usada para conformar ligas de alumínio, magnésio e zinco. Dois tipos de equipamento de fundição sob pressão são comumente usados: frio e quente. No processo “frio”, o metal quente é mantido em um recipiente separado e passado para a câmara de pressão somente para produzir a peça fundida. No processo “quente”, o reservatório de metal quente é mantido na câmara de pressão. Os tempos de contato prolongados restringem esse processo a ligas de zinco.

Aspectos econômicos Os altos custos de ferramental significam que a fundição sob pressão só se torna econômica para lotes grandes, mas o processo é um dos poucos que permitem peças fundidas com paredes finas. O alumínio tem uma pequena solubilidade no ferro, o que limita a vida útil do molde a aproximadamente 100.000 peças. O magnésio não tem nenhuma, o que resulta vida útil quase ilimitada para o molde. Para a fundição por gravidade, os custos de equipamento são mais baixos, porém, normalmente ela é menos econômica porque o metal fundido tem de ser mais fluido — e, portanto, mais quente — para preencher bem o molde, e isso reduz as taxas de produção.

Produtos típicos Chassis, polias e acionadores de toca-discos, aparelhos de videocassete, molduras e carcaças de motor, carcaças para dispositivos de distribuição, nichos para pequenos eletrodomésticos e ferramentas elétricas, carcaças de carburadores e distribuidores, carcaças de caixas de câmbio e embreagens.

O ambiente Sucatas de alumínio, zinco e magnésio podem ser recicladas. O processo não apresenta nenhum problema ambiental particular.

Processos concorrentes Fundição de precisão, fundição em areia; moldagem de polímeros por injeção.



Fundição em areia

O que é? A fundição em areia provavelmente começou nas praias — toda criança sabe como é fácil fazer castelos de areia. Adicione um aglomerante e é possível obter formas muito mais complexas. Além disso, a areia é um refratário; até ferro pode ser fundido nela. Na fundição em areia verde, uma mistura de areia e argila é compactada no molde bipartido ao redor de um gabarito que tem a forma da peça fundida desejada. Então o gabarito é retirado e deixa a cavidade na qual o metal é vertido. Quando o tamanho do lote é pequeno e o processo é manual, são usados gabaritos baratos feitos de madeira aos quais são anexados portinholas e condutores. Porém, esse processo é lento e demanda mão de obra especializada. Sistemas automatizados usam gabaritos de alumínio e compactação automatizada. Na fundição em areia com CO_2 /silicato, uma mistura de areia e aglomerante de silicato de sódio é compactada ao redor de um gabarito como anteriormente descrito, sendo então inundado com CO_2 para selar o gel de silicato de sódio. Na fundição em areia por evaporação, o gabarito é feito de espuma de poliestireno e embebido em areia. Quando o metal fundido é vertido no molde, o gabarito de poliestireno é vaporizado. Na fundição em casca, uma mistura de areia de granulação fina e resina termofixa é aplicada a um gabarito de metal aquecido (alumínio ou ferro fundido) e curado para formar uma casca.

Formas Formas muito complexas são possíveis — pense em blocos de motores de automóveis.

Notas de design Poucos processos são tão baratos e versáteis quanto a fundição em areia para conformar metais. Permite formas complexas, mas a superfície é áspera e os detalhes de superfície são ruins. O processo tem vantagens particulares para peças fundidas complicadas com seções de várias espessuras. Protuberâncias, rebaixos, reentrâncias e seções ocas são todas possíveis na prática. A fundição por evaporação de gabarito não deixa nenhuma linha divisória, o que reduz os requisitos de acabamento. A mínima espessura de parede é normalmente 3mm para ligas leves e 6mm para ligas ferrosas.

Observações técnicas Em princípio, qualquer metal não reativo, não refratário (temperatura de fusão menor que 1800°C) pode ser fundido em areia. Em particular, ligas de alumínio, ligas de cobre, ferros fundidos e aços são rotineiramente conformados desse modo. Chumbo, zinco e estanho podem ser fundidos em areia seca, mas se fundem a uma temperatura demasiadamente baixa para evaporar o gabarito de espuma usado na fundição por evaporação de gabarito.

Aspectos econômicos Os custos de capital e de ferramental para a fundição manual em areia são baixos, o que torna o processo atraente para pequenos lotes. Sistemas automatizados são caros, mas conseguem produzir peças fundidas muito complexas.

Produtos típicos Estruturas e bases de máquinas ferramenta, blocos e cabeçotes de cilindros de motor, caixas de transmissão, gabaritos para engrenagens, blocos para fabricação de engrenagem, eixos de manivelas, bie-las. Fundição por evaporação de gabarito: tubos de distribuição, trocadores de calor, acessórios hidráulicos, carcaças de válvulas, outras peças de motor.

O ambiente Em muitos casos, materiais moldados podem ser reutilizados.

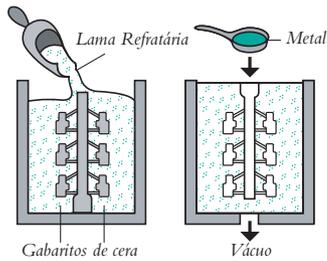
Processos concorrentes Fundição de precisão; fundição sob pressão.



Atributos de fundição em areia

Faixa de peso, kg	0,3–1.000
Espessura mínima, mm	5–100
Complexidade da forma	Média/Alta
Tolerância permitida, mm	1–3
Aspereza da superfície, μm	12–25
Tamanho do lote econômico	1K–1.000K

Fundição de precisão



Atributos da fundição de precisão

Faixa de peso, kg	0,001–20
Espessura mínima, mm	1–30
Complexidade da forma	Média/Alta
Tolerância permitida, mm	0,1–0,4
Aspereza da superfície, μm	1,6–3,2
Tamanho do lote econômico	1K–50K

O que é? Caso você possua obturações de ouro na boca, agradeça a esse processo — ele foi usado para fazê-las. O processo com cera perdida — o antigo nome para a fundição de precisão (*Investment Casting*, em inglês) — é praticado no mínimo há 3.000 anos; joias, ornamentos e ícones sofisticados eram fabricados no Egito e na Grécia bem antes de 1500 a.C. Na fundição de precisão, gabaritos de cera são feitos e montados (se pequenos) em uma árvore munida de sistemas de alimentação e propagação. O gabarito montado é mergulhado em uma argila refratária e em seguida coberto com estuque refratário e deixado para secar. O procedimento é repetido várias vezes até que se acumulem aproximadamente oito camadas montadas, o que cria uma casca de investimento em cerâmica. Então a cera é derretida e a casca de cerâmica é queimada antes do metal fundido ser vertido. A fundição por gravidade é adequada para formas simples; porém, quando estão envolvidas seções finas e complexas, é necessário pressão de ar, vácuo ou pressão centrífuga para preencher completamente o molde. Em seguida o molde é quebrado para remover as peças fundidas. O processo é adequado para a maioria dos metais com temperaturas de fusão abaixo de 2200°C. Como o gabarito de cera é perdido na fusão, a forma pode ser muito complexa, com contornos, rebaixos, protuberâncias e recessos. Formas ocas são possíveis: estátuas de bronze são ocas, e feitas por um processo como esse, mais elaborado.

Formas Tão complexas quanto se queira.

Notas de design O processo é extremamente versátil, e permite grande liberdade de forma. Oferece excelente reprodução de detalhes em pequenas peças tridimensionais.

Observações técnicas A fundição de precisão é um dos poucos processos que podem ser usados para fundir metais com altas temperaturas de fusão para obter formas complexas; também pode ser usado para metais com baixo ponto de fusão. Os usos tradicionais da fundição de precisão eram a conformação de prata, cobre, ouro, bronze, peltre e chumbo. Hoje, as aplicações de engenharia mais significativas são para ligas com base de níquel, cobalto e ferro para produzir pás de turbinas.

Aspectos econômicos A fundição de precisão se presta tanto a lotes pequenos quanto grandes. Para pequenos lotes o processo é manual, com baixos custos de capital e de ferramental, mas custo de mão de obra significativo. Quando automatizada, os custos de capital são altos, mas o controle de qualidade e a velocidade são maiores. A taxa de produção é aumentada com a utilização de moldes múltiplos.

Produtos típicos Joias, implantes odontológicos, estatuária, esculturas e objetos de decoração em metal, turbinas a gás para alta temperatura e equipamentos semelhantes, estátuas monumentais.

O ambiente Há os riscos usuais associados com a fundição de metais, mas os procedimentos para lidar com eles são rotineiros. Hoje, os materiais de moldes não podem ser reciclados.

Processos concorrentes Fundição sob pressão (para metais com pontos de fusão abaixo de 800°C); fundição em areia.

Fundição de polímeros

O que é? Muitas resinas são tão suficientemente fluidas antes da polimerização que podem ser fundidas — vertidas em um molde conformado sem aplicação de pressão, no qual reagem e se solidificam. Alguns termoplásticos — notadamente acrílicos — e a maioria dos termofixos podem ser fundidos assim antes da polimerização.

Formas A maioria das formas — formas complexas exigem moldes flexíveis.

Notas de design As propriedades óticas de polímeros transparentes fundidos, por exemplo os acrílicos, ficam melhores do que se fossem moldados. É possível adicionar enchimentos, mas para isso um processo semelhante — fundição centrífuga — é frequentemente usado. Peças grandes e seções de grande espessura são comuns, mas a qualidade da peça final depende muito da habilidade do operador — ar aprisionado e evolução de gás são ambos problemas potenciais.

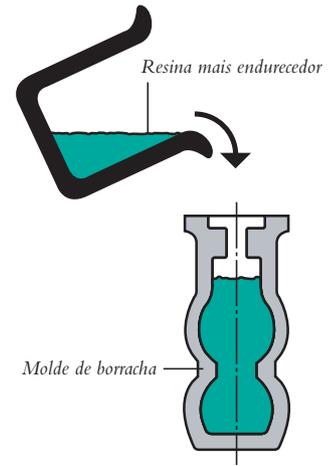
Observações técnicas Na fundição de metilmetacrilato (acrílico) é usado um disparador solúvel em monômero. A reação é vigorosa e libera muito calor que tem de ser dissipado para manter a temperatura dentro dos limites de segurança e impedir que o monômero ferva. Ocorre considerável contração — chega a 21% para o metilmetacrilato —, e isso deve ser levado em conta no projeto de moldes para fundição. Usar xaropes de monômeros de polímeros obtidos por polimerização interrompida ajuda a controlar o calor, bem como a contração.

Aspectos econômicos O ferramental exigido é barato; moldes rígidos (de metal ou epóxi) ou flexíveis (de elastômero) são ambos possíveis. Para ferramental de pequeno porte, o preço fica abaixo de \$100; os de grande porte podem custar algumas centenas de dólares.

Produtos típicos Elevadores de caçambas, mancais, grandes engrenagens, chapas, tubos, cabeamento elétrico, hastes, bolas de boliche, ferramentas à base de epóxi; fundição centrífuga é usada para tubos, tanques e recipientes.

O ambiente A maioria dos polímeros gera vapores durante a cura — ventilação adequada é importante.

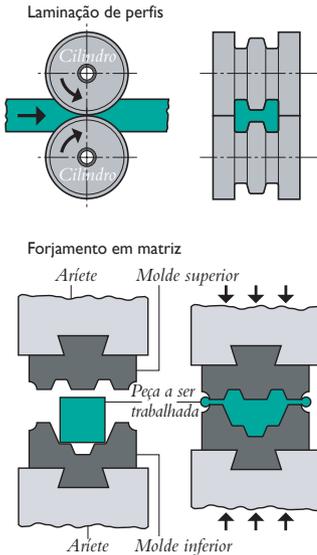
Processos concorrentes Moldagem por injeção, moldagem por compressão — mas em ambos os casos os moldes são muito mais caros.



Atributos de fundição de polímeros

Faixa de peso, kg	0,1–700
Espessura mínima, mm	2–100
Complexidade da forma	Alta
Tolerância permitida, mm	0,8–2
Aspereza da superfície, μm	0,5–1,6
Tamanho do lote econômico	10K–1.000K

Laminação de perfis e forjamento em matriz



Atributos de laminação de perfis e forjamento em matriz

Faixa de peso, kg	0,1–100
Espessura mínima, mm	2–100
Complexidade da forma	Baixa
Tolerância permitida, mm	0,3–2
Aspeza da superfície, μm	3,2–12,5
Tamanho do lote econômico	10K–1.000K

O que são? Em laminação e forjamento, um lingote de metal é comprimido até a forma desejada por rolos ou moldes maciços que o submetem a grande deformação plástica. Aproximadamente 90% de todos os produtos de aço produzidos são laminados ou forjados. Vigas em duplo tê (I) e outros perfis contínuos como esse são fabricados por laminação de perfis. Na laminação a quente, um lingote, aquecido até cerca de dois terços de sua temperatura de fusão, é forçado a passar por uma série de rolos que conformam progressivamente o perfil. No forjamento a quente, ao contrário, uma peça é aquecida e conformada entre moldes abertos ou fechados em um único esforço de compressão. Na laminação e forjamento a frio, a peça de metal está inicialmente fria, embora a deformação provoque algum aquecimento. Muitas vezes usa-se uma sucessão de moldes até criar a forma final.

Formas Laminação: somente formas prismáticas. Forjamento: formas maciças sólidas e simples; não são possíveis formas com ângulos reentrantes.

Notas de design O processo produz peças com propriedades mecânicas particularmente boas em razão do modo como a deformação refina a estrutura e reduz a porosidade. Durante laminação e forjamento a quente, o metal se recristaliza e permanece relativamente mole; sua superfície pode se oxidar. Ao contrário, o forjamento a frio produz uma superfície de ótimo acabamento e provocam endurecimento extremo, o que eleva a resistência do produto, mas limita a extensão da deformação.

Observações técnicas A maioria dos metais pode ser laminada ou forjada, mas a extensão da deformação possível varia muito. Os mais adequados são a faixa de ligas de alumínio e magnésio desenvolvidos para processamento por deformação (os graus “forjados”), ligas de cobre e aços.

Aspectos econômicos Rolos e moldes para laminação e forjamento têm de ser fabricados com materiais excepcionalmente duros, e são caros, o que significa que a laminação de perfis e o forjamento em moldes fechados são adequados apenas para grandes lotes.

Produtos típicos Laminação: hastes contínuas, perfis de seção quadrada, vigas em duplo tê (I). Forjamento: peças mecânicas sujeitas a tensões muito altas como componentes de aeronaves, bielas, eixos de manivelas, blocos de engrenagens, carcaças de válvulas, conexões tubulares e mangueiras, ferramentas manuais e de máquinas.

O ambiente Os lubrificantes usados em laminação e forjamento geram névoas de óleo e vapores desagradáveis, exigindo boa ventilação.

Processos concorrentes Extrusão (para seções prismáticas contínuas); fundição sob pressão, em areia, ou de precisão para formas sólidas maciças.



Extrusão

O que é? O processo de forçar a pasta de dente a sair do tubo é uma extrusão. A pasta de dente pegajosa — ou o polímero ou metal pegajoso no processo industrial — é forçado mediante pressão a fluir por um molde conformado, adquirindo o perfil do orifício do molde. Na coextrusão, dois materiais são extrudados ao mesmo tempo e ligados um ao outro — um truque usado para criar listras de cores diferentes na pasta de dente.

Formas Formas prismáticas: sólidas ou ocas.

Notas de design A extrusão de metais está limitada aos materiais dúcteis com pontos de fusão abaixo de 1700°C, comumente alumínio, cobre, magnésio, aços de baixo e médio teores de carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis. A tolerância muitas vezes é menor do que a esperada devido à fluidez e ao desgaste do molde; pode ser melhorada por repuxamento a frio como processo secundário. Seções transversais simétricas, espessuras de parede constantes e raios generosos são as mais fáceis de conformar; a razão de aspecto de seção não deve passar de 14:1 para o aço ou 20:1 para o magnésio. A extrusão por impacto é um processo a frio para metais (alumínio, cobre, chumbo, magnésio, estanho, zinco, aços-carbono, aços de baixa liga) que combina os princípios do forjamento e da extrusão.

A extrusão de polímeros começa com pó ou grânulos; a pressão é desenvolvida por meio de um eixo helicoidal giratório que força o polímero a passar por uma câmara de aquecimento e por um molde. A maioria dos polímeros pode ser extrudada (incluindo os reforçados com material particulado e fibras curtas). Na extrusão de cerâmicas um pó de cerâmica é misturado com um aglomerante de polímero e extrudado como um polímero. Em seguida a seção extrudada é queimada, o que elimina o aglomerante e sinteriza o pó de cerâmica.

Observações técnicas Há duas variantes de extrusão de materiais: extrusão direta — na qual o molde é estacionário e o metal é forçado a passar por ele; e extrusão indireta — na qual o próprio molde comprime o metal. Na extrusão indireta há menos atrito entre o lingote e o molde, portanto, as forças de extrusão são mais baixas, mas o equipamento é mais complexo e o comprimento do produto é limitado.

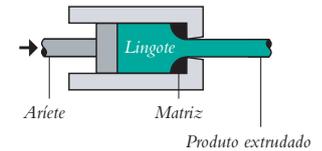
Aspectos econômicos Para metais, a laminação é mais econômica para formas simples e grandes lotes; para polímeros, os custos de ferramental são relativamente baixos, embora os custos de capital sejam altos e muitas vezes seja necessário um processamento secundário.

Produtos típicos Tubulações, esquadrias de janelas, guarnições para automóveis, peças estruturais para aeronaves, balaustradas, hastes, canais, fios encapados com plástico, vedações, filamentos, películas, chapas, grânulos, tijolos.

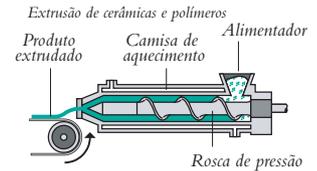
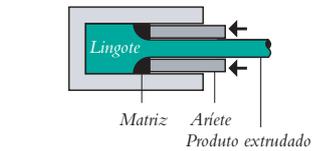
O ambiente Nenhum problema especial.

Processos concorrentes Para metais: laminação, repuxamento; para polímeros: extrusão e moldagem por sopro.

Extrusão direta

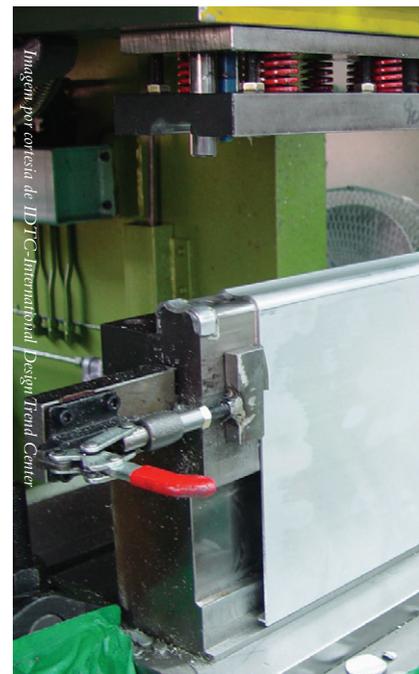


Extrusão indireta

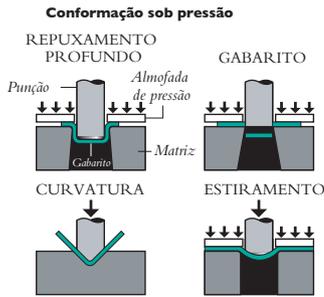


Atributos da extrusão

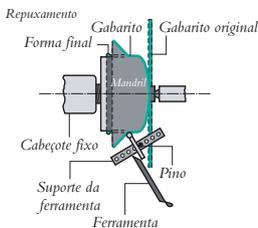
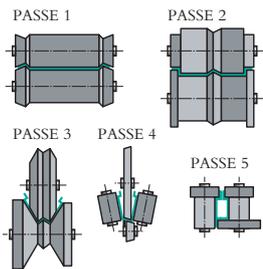
Faixa de peso, kg	1–1.000
Espessura mínima, mm	0,1–900
Complexidade da forma	Baixa
Tolerância permitida, mm	0,2–2
Aspereza da superfície, µm	0,5–12,5
Tamanho do lote econômico	1K–1.000K



Conformação sob pressão, conformação por laminação em rolos e repuxamento



Conformação por laminação em rolos



Atributos de conformação sob pressão, conformação por laminação em rolos e repuxamento

Faixa de peso, kg	0,01–30
Espessura mínima, mm	0,2–5
Complexidade da forma	Média
Tolerância permitida, mm	0,1–0,8
Aspereza da superfície, µm	0,5–12,5
Tamanho do lote econômico	25K–250K

O que é? Muitos produtos são feitos por corte, compressão, perfuração, dobramento ou repuxamento de chapas. A conformação sob pressão abrange uma gama de processos de conformação de chapas que usam uma matriz e uma prensa; entre eles citamos recorte, cisalhamento, repuxamento e estiramento. Esses processos podem ser executados consecutivamente para conformar formas complexas. As ferramentas são exclusivas de cada processo, portanto, os custos de ferramental são altos. Na conformação por laminação em rolos, uma tira contínua de chapa de metal passa por uma série de rolos conformados, que gradativamente a conformam até o perfil desejado. O processo é adequado para grandes comprimentos com seções transversais constantes e às vezes complexas. É possível produzir peças ocas com a incorporação de soldagem de costura ao processo. Altas taxas de produção, altos custos de ferramental e de capital tornam o processo econômico apenas para altos níveis de produção. No repuxamento (*Spinning*), um gabarito circular de chapa de metal é formado sobre um mandril rotativo ou sobre um bloco de conformação, contra o qual ela é prensada por uma ferramenta ou rolete rígido, enquanto gira. As ferramentas são muito simples, feitas de madeira ou metal e, portanto, são baratas.

Formas Formas planas e curvas com paredes finas. Laminação: somente formas prismáticas. Repuxamento: formas curvas com paredes finas.

Notas de design Metalurgistas habilidosos podem conformar chapas em formas intrincadas usando operações de repuxamento, curvatura e conformação. Formas com orifícios, curvas, recessos, cavidades e seções em relevo são comuns. A conformação de chapas começa com a matéria-prima, que é a chapa, e dá aos produtos uma seção transversal quase constante, com exceção das dobras. O repuxamento é limitado a formas hemisféricas, cônicas ou cilíndricas relativamente simples, embora também seja possível produzir formas reentrantes.

Observações técnicas A conformação de chapas é mais comumente aplicada a metais, em particular aços, alumínio, cobre, níquel, zinco, magnésio e titânio. Chapas de polímeros e compósitos podem ser processadas, se bem que nesse caso as operações ficam limitadas a recorte e cisalhamento.

Aspectos econômicos O custo das operações de conformação de chapas depende em grande parte dos custos de ferramental. Ferramentas, matrizes e moldes exclusivos em geral são caros e exigem lotes grandes para que os processos sejam econômicos. Processos com ferramental de baixo custo, como o repuxamento, são mais adequados para pequenos lotes porque demandam muita mão de obra.

Produtos típicos Conformação sob pressão: partes da carroceria de automóveis, carcaças, cascas, recipientes. Estampagem e recorte: peças mecânicas de menor porte como arruelas, dobradiças, travessas e copos. Conformação por laminação em rolos: guarnições arquitetônicas, esquadrias de janelas, painéis para telhados e painéis para paredes, elementos de fixação para iluminação fluorescente, hastes para pendurar cortinas, trilhos para portas corredeiras, rodas de bicicleta. Repuxamento: carcaças de motores de foguetes, ogivas para mísseis, vasos de pressão, utensílios de cozinha, refletores de luz.

O ambiente A conformação de chapas de metal não configura nenhuma ameaça particular ao ambiente.

Processos concorrentes Fundição sob pressão; moldagem por injeção.

Termoconformação

O que é? A moldagem de grandes chapas termoplásticas por termoconformação é econômica. Na termoconformação a vácuo, uma chapa termoplástica, aquecida até seu ponto de amolecimento, é sugada contra os contornos de um molde e adquire seu perfil; em seguida é resfriada e se solidifica contra o molde. A termoconformação com drapeado depende em parte de vácuo e em parte do escoamento natural do polímero quente para obter a forma. A termoconformação auxiliada por tampão aumenta o vácuo com um tampão de compressão. A termoconformação a pressão usa uma pressão de várias atmosferas para forçar a chapa de polímero quente contra o molde. Moldes machos e fêmeas são possíveis e — para termoconformação a vácuo — podem ser usinados de madeira, espuma de polímero, ou alumínio (para lotes maiores).

Formas Formas curvas de paredes finas.

Notas de design A baixa pressão na conformação a vácuo não dá boa reprodução de detalhes delicados; a conformação a pressão, que utiliza pressões mais elevadas, dá características mais definidas, porém, é mais cara, porque não é possível usar moldes de madeira. A superfície da chapa em contato com o molde tende a ficar marcada, portanto, normalmente a ferramenta é projetada com o lado do acabamento longe do molde. Pode-se moldar chapas coloridas, texturizadas ou pré-decoradas, o que reduz os custos de acabamento.

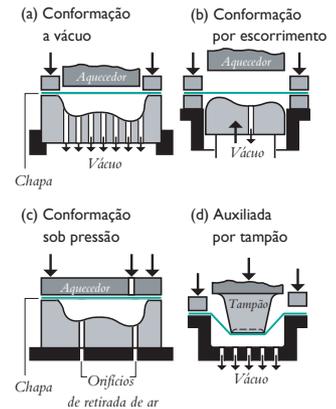
Observações técnicas Termoconformação é usada para conformar chapas termoplásticas, em particular ABS, PA, PC, PS, PP, PVC, polissulfonas, PBT, PET, espumas e termoplásticos reforçados com fibras curtas. A máxima razão profundidade/largura para peças moldadas está na faixa de 0,5 a 2. Reentrâncias podem ser moldadas na chapa. O processo pode tratar uma faixa muito grande de tamanhos, desde produtos pequenos como copos descartáveis, até muito grandes como cascos de barcos; é econômico tanto para lotes pequenos quanto para lotes grandes. Oferece produtos com excelentes propriedades físicas, mas o material de origem é mais caro (chapas em vez de grânulos). O produto tem de ser aparado após a conformação, e a sucata de chapa não pode ser reciclada diretamente.

Aspectos econômicos Tanto o custo do capital quanto o custo de ferramental dos equipamentos de termoconformação são baixos, mas o processo pode demandar mão de obra intensiva.

Produtos típicos Utensílios domésticos, revestimentos internos de refrigeradores, banheiras, boxes de chuveiros, painéis internos de aeronaves, bandejas, sinalização, cascos de botes, copos de bebida.

O ambiente Nenhum problema ambiental.

Processos concorrentes Moldagem por injeção (para grandes lotes); moldagem rotacional.

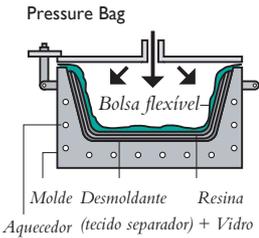
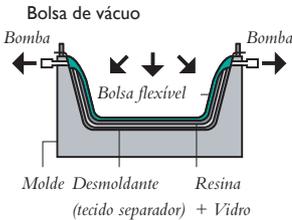
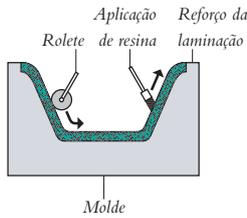


Atributos da termoconformação

Faixa de peso, kg	0,003–50
Espessura mínima, mm	0,25–6
Complexidade da forma	Baixa
Tolerância permitida, mm	0,5–1
Aspereza da superfície, μm	0,3–1,6
Tamanho do lote econômico	10K–100K

Métodos de laminação de compósitos

Laminação manual



Atributos dos métodos de laminação de compósitos

Faixa de peso, kg	1-6.000
Espessura mínima, mm	2-10
Complexidade da forma	Baixa/Média
Tolerância permitida, mm	0,6-1
Aspereza da superfície, µm	1-500
Tamanho do lote econômico	1K-500K

O que são? A baixa densidade e a alta resiliência dos compósitos com matriz de polímero lhes dão uma grande fração do mercado para cascas em geral, carcaças, painéis de carrocerias e componentes estruturais. Esses compósitos podem ser conformados de vários modos.

Na laminação manual (*hand lay-up*), um molde aberto (feito de polímeros reforçados com vidro, ou de madeira, gesso, cimento ou ligas metálicas leves) é revestido com uma resina para dar uma superfície macia e lisa. Quando a resina está curada, uma camada de reforço (fibra de vidro ou de carbono tramada ou tecida) é assentada à mão, a resina é aplicada com um pincel ou a revólver e um rolo é passado sobre a camada para que a resina penetre e seja totalmente distribuída pelas fibras. O processo é repetido camada a camada, até atingir a espessura desejada. O tipo de trama influencia a capacidade do material em suportar dupla curvatura ("drapeado"): a lâ de vidro e fibras tramadas têm boa capacidade de drapeamento; tecidos com urdiduras retas não têm. Retardadores de chamas e enchimentos inertes são adicionados para reduzir custos e melhorar propriedades. No método de spray, uma resina misturada com fibras picadas é aspergida no molde; é usado para grandes peças quando a fração de reforço não precisa ser grande. Na moldagem sob pressão/bolsa de vácuo, o reforço e a resina são aplicados ao molde por métodos convencionais manuais ou de spray. Então uma bolsa é colocada sobre o compósito em cura e empurrada contra ele por vácuo ou pressão, resultando em materiais densos com melhores propriedades.

Formas Formas curvas de paredes finas, formas com uma única curvatura ou com curvaturas duplas.

Notas de design Os métodos de laminação de compósitos são os que dão a maior liberdade para explorar o potencial dos polímeros reforçados com fibras. Em geral são limitados a formas com grande área de superfície/espessura. Aceitam nervuras, buchas e reentrâncias de painéis de espuma. Métodos a vácuo e de pressão dão qualidade mais alta do que os de laminação manual, porque as bolhas de ar presentes na resina são eliminadas.

Observações técnicas Os sistemas de resina são todos termofixos, com base de poliésteres, epóxis, ésteres vinílicos ou fenólicos. Em geral o reforço é de fibra de vidro, mas fibras de carbono e fibras naturais como juta, cânhamo ou linho também podem ser usadas.

Aspectos econômicos Os materiais do molde podem ser baratos (madeira, cimento); grandes peças moldadas e lotes pequenos são práticos, mas os métodos de laminação demandam mão de obra especializada.

Produtos típicos Laminação manual: cascos de barcos, painéis de construção, carrocerias de veículos, dutos, tanques, trenós, banheiras, boxes de chuveiro. Moldagem sob pressão/saco de vácuo: componentes aeroespaciais, domos de proteção de radares (radomos).

O ambiente Moldes abertos provocam a evaporação da resina, criando um risco para a saúde: ventilação adequada é importante.

Processos concorrentes Moldagem sob pressão, moldagem por transferência de resina.

Metalurgia do pó

O que são? Quando você faz um boneco de neve apertando e modelando a neve, você está compactando e sinterizando um pó. Muitos materiais são mais facilmente conformados pela metalurgia do pó. A técnica tem um valor particular na conformação de materiais difíceis — cerâmicas e metais refratários, por exemplo — que são demasiadamente frágeis para sofrer deformações e têm altas temperaturas de fusão, portanto, não são fáceis de fundir. Na sinterização do pó, o pó solto é compactado em um molde conformado de aço, grafite ou cerâmica, e sinterizado a uma temperatura que é tipicamente igual a dois terços da temperatura de fusão do pó. Na prensagem e sinterização, o pó é primeiro comprimido em um molde frio, o que lhe dá resistência suficiente para ser manuseado e permite que seja sinterizado como um corpo independente. Melhor adensamento, resistência e ductilidade são dados pela compressão a quente, que combina compactação e sinterização em uma única operação. A prensagem a vácuo a quente é usada para pós que são particularmente sensíveis à contaminação por oxigênio ou nitrogênio (o titânio é um exemplo). Na prensagem isostática a quente (*Hot Isostatic Pressing* — HIP), o pó é colocado em um recipiente de metal deformável e então submetido a alta temperatura e alta pressão (1100°C, 200 MPa) em uma atmosfera de argônio que age como o meio de pressão. Na extrusão de pó ou moldagem de pó por injeção (também conhecida como “moldagem de metal por injeção”), o pó é misturado com até 50% de um aglomerante de polímero e extrudado ou moldado por injeção (Veja Extrusão). A forma resultante é sinterizada em uma operação separada, que elimina o polímero por queima e liga as partículas de pó.

Formas Formas tridimensionais prismáticas ou simples.

Notas de design A metalurgia do pó dá grande liberdade de escolha de materiais (em particular com pós de diferentes materiais que podem ser misturados para resultar em compósitos), mas as formas que podem ser produzidas são limitadas. Em geral, as paredes laterais devem ser paralelas, os rebaixos em ângulos retos em relação à direção da compressão e rosca, orifícios laterais e baixo relevos não podem ser moldados com facilidade. Há considerável contração (até 35%) durante a sinterização — as alterações dimensionais têm de ser levadas em conta.

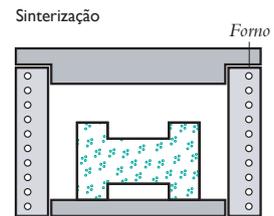
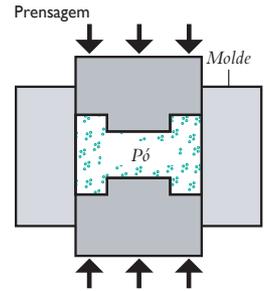
Observações técnicas A metalurgia do pó é utilizado rotineiramente para ligas com base de latão, bronze e ferro, aços inoxidáveis, cobalto, molibdênio, titânio, tungstênio, berílio, compósitos com matriz de metal e cerâmicas.

Aspectos econômicos Os métodos da metalurgia do pó são rápidos e usam material com eficiência, mas os pós são caros.

Produtos típicos Sinterização de pó: filtros, mancais porosos e cerâmicas de baixa densidade. Prensagem e sinterização: pequenas engrenagens e comandos de válvulas, pequenos mancais, componentes elétricos e magnéticos. Compressão isostática a quente: ferramentas de corte de aço-ferramenta e carboneto de tungstênio, componentes de superligas para a indústria aeroespacial. Moldagem de pó por injeção: velas de ignição, componentes de motores resistentes ao calor, dispositivos médicos e odontológicos.

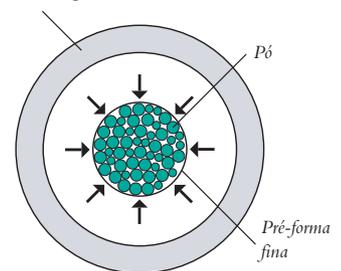
O ambiente A eliminação do aglomerante por queima gera vapores tóxicos.

Processos concorrentes Nenhum concorre diretamente com eles.



Prensagem isostática a quente

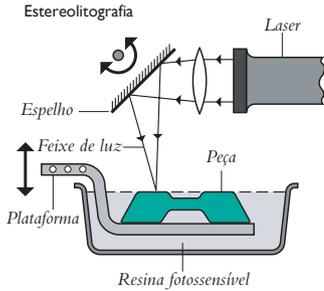
Vaso de pressão



Atributos dos métodos da metalurgia do pó

Faixa de peso, kg	0,01–5
Espessura mínima, mm	1,5–8
Complexidade da forma	Baixa/Média
Tolerância permitida, mm	0,1–1
Aspereza da superfície, µm	1,6–6,3
Tamanho do lote econômico	1K–1.000K

Prototipagem a laser



Atributos da prototipagem a laser

Faixa de peso, kg	0,1–20
Espessura mínima, mm	0,5–100
Complexidade da forma	Alta
Tolerância permitida, mm	0,2–2
Aspereza da superfície, μm	100–125
Tamanho do lote econômico	1K–100K

O que é? Todos os designers sonham transformar sem esforço suas visões em objetos tridimensionais reais, de complexidade arbitrária, que podem ser manuseados, vistos e experimentados fora do contexto em que serão usados. Métodos para prototipagem rápida — um dos setores de mais rápido crescimento da tecnologia de fabricação — permitem isso. O insumo é um arquivo CAD que descreve a forma da peça; o resultado é um único exemplar da peça em polímero, metal ou papel laminado compactado. Na estereolitografia (SL), uma resina fotossensível é polimerizada por um raio laser UV que escaneia a superfície de um banho que contém resina líquida. Cada escaneamento cria uma fina fatia do objeto; quando um escaneamento é concluído, a plataforma é abaixada ligeiramente (tipicamente 0,1mm), inundando a superfície com líquido fresco que é polimerizado pelo próximo escaneamento. Assim o objeto é construído camada por camada de baixo para cima. Na sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* — SLS), a resina líquida é substituída por um pó fino fundível a quente (um termoplástico ou uma cera) que é fundido pelo raio laser de escaneamento e cria uma única fatia do objeto. Então a plataforma é abaixada e uma nova camada de pó é espalhada na superfície por um esfregão, e fica pronta para o próximo escaneamento. Agora o método foi estendido para metais sinterizados. Na fabricação de objetos laminados (*Laminated Object Manufacture* — LOM), as fatias são criadas por corte a laser de uma folha de papel revestida com um termoplástico. O papel é alimentado por meio de um rolete e o perfil de uma fatia é cortado pelo laser; então um rolete aquecido pressiona a fatia sobre a pilha de fatias cortadas anteriormente, fundindo-a às outras que ali estão. O processo é mais rápido do que os outros dois porque o laser apenas traça o contorno da fatia. É melhor para grandes peças com paredes espessas. O material acabado é parecido com madeira.

Formas Formas complexas sólidas ou ocas.

Notas de design A prototipagem rápida em ABS ou náilon oferece ao designer a capacidade de fazer protótipos de complexidade quase ilimitada. Todos os processos são lentos: o tempo gasto para produzir um objeto aumenta com o volume para SL e SLS, e com a área da superfície para LOM — o que, na prática, impõe um limite de tamanho de aproximadamente 300mm.

Observações técnicas Sistemas de prototipagem rápida estão evoluindo rapidamente e já são uma parte essencial da capacidade de construção de modelos para designers. Sua velocidade e precisão aumentarão e seu custo diminuirá no futuro.

Aspectos econômicos O custo de fazer um objeto depende do tamanho e do processo, podendo variar de \$500 a \$5000. Esse preço diminuirá à medida que surgirem sistemas mais rápidos.

Produtos típicos A prototipagem rápida é amplamente usada no design de produtos para obter um modelo tridimensional de um conceito em evolução.

O ambiente Resinas líquidas são voláteis, pós finos podem ser explosivos, e feixes de laser podem prejudicar os olhos — todos exigem precauções adequadas.

Processos concorrentes Prototipagem por deposição (página seguinte)

Prototipagem por deposição

O que é? Pense em como a cobertura de um bolo de casamento é montada: o glacê é espremido, como uma pasta de dente, por uma bomba. Agora, reduza a escala por um fator de 100, e terá a base da prototipagem rápida por deposição. O insumo — como na prototipagem a laser — é um arquivo CAD que descreve a forma da peça; o resultado é um único exemplar da peça em polímero ou cera. A figura mostra uma variante da tecnologia. Na modelagem por deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* — FDM) uma fina corrente de termoplástico ou cera é depositada por um cabeçote de extrusão biaxial aquecido. O polímero ou cera semilíquido é extrudado do cabeçote aquecido e depositado em camadas, tipicamente de 0,1mm de espessura, uma por vez, começando pela base. Camadas sucessivas se unem por fusão térmica. O processo é bem-adaptado para conformar ABS e náilon e não requer cura posterior (portanto, é mais rápido). Podem-se criar projeções sem apoio porque o polímero assenta e se fixa muito rapidamente. Na fabricação de munição de armas de fogo por partículas (*Ballistic Particle Manufacture* — BPM), partículas de termoplásticos são lançadas por um jato piezelétrico e congelam quando atingem o objeto. O cabeçote do jato escaneia a superfície e cria uma camada a cada escaneamento. Há vários termoplásticos e ceras que podem ser usados no jato. Na verdadeira impressão tridimensional, o termoplástico é lançado a jato de um cabeçote de impressão com até 96 jatos em arranjo linear, como uma impressora a jato de tinta. A resolução é semelhante à da impressora — cerca de 300 dpi. O processo, que está em rápida evolução, tem o potencial de construir objetos com precisão e rapidez. Todos os três processos podem ser adaptados para depositar pós finos de metais ou cerâmicas, embora ainda não haja no comércio sistemas que façam isso.

Formas Formas complexas sólidas ou ocas.

Notas de design A prototipagem rápida em ABS ou náilon oferece ao designer a capacidade de fazer protótipos com materiais resistentes e complexidade quase ilimitada.

Observações técnicas Sistemas de prototipagem rápida estão evoluindo muito rapidamente, e já são uma parte essencial da capacidade de construir modelos para designers. Sua velocidade e precisão aumentarão e seu custo diminuirá no futuro.

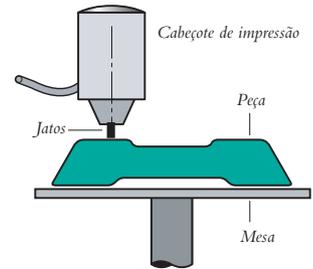
Aspectos econômicos O custo de fazer um objeto depende do tamanho e do processo, variando de \$500 a \$5000. Isso diminuirá à medida que forem lançados sistemas mais rápidos.

Produtos típicos A prototipagem rápida é amplamente usada no design de produtos para obter um modelo tridimensional de um conceito em evolução.

O ambiente Nenhum dano em particular.

Processos concorrentes Prototipagem a laser.

Modelagem por deposição de material fundido



Atributos da prototipagem por deposição

Faixa de peso, kg	0,1–10
Espessura mínima, mm	1,2–100
Complexidade da forma	Alta
Tolerância permitida, mm	0,3–2
Aspereza da superfície, µm	75–100
Tamanho do lote econômico	1K–100K

Perfis de Junção

A fabricação de um produto envolve muitas etapas, uma das quais é a de montagem — e essa é uma etapa que aumenta o custo. Duas técnicas contribuem para a montagem econômica: o projeto que minimiza o número de componentes e assim facilita a montagem do conjunto, e a seleção do processo de junção ou união mais adequado aos materiais, à geometria das peças a serem unidas e ao desempenho exigido da união escolhida para a vida útil do conjunto. A figura na primeira página do texto mostra geometrias de junção com seus nomes mais comuns.

Nesta seção reunimos informações para processos de junção representativos apresentados na lista da próxima página. Três famílias amplas podem ser distinguidas: adesivos, uniões mecânicas e soldagem. As páginas seguintes dão informações sobre essas famílias. A escolha do processo também depende dos materiais que serão unidos e da geometria da junção. Os processos usados para soldar polímeros são obviamente diferentes daqueles usados para soldar metais; menos obviamente, também os adesivos e as uniões mecânicas são específicos em relação aos materiais. Muitos processos só podem unir componentes feitos do mesmo material: aço com aço, polietileno com polietileno. Outros podem unir materiais diferentes: metal com vidro, polímero com cerâmica, ou compósito com metal.

Mais informações podem ser encontradas nas fontes apresentadas sob o título *Leitura adicional*.

Geometrias de junção	290
Leitura adicional	291

Adesivos	292
----------------	-----

Uniões

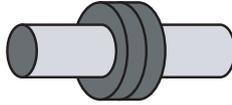
Costura.....	296
Rebites e grampos	297
Uniões roscadas	298
Uniões de encaixe.....	299

Soldagem

Soldagem a gás quente	300
Soldagem por barra quente	301
Soldagem por placa quente	302
Soldagem por ultrassom	303
Soldagem por feixe de energia	304
Brasagem	306
Soldadura.....	307
Soldagem com eletrodo revestido (MMA ou SMAW)	308
Soldagem MIG	309
Soldagem TIG	310
Soldagem por resistência	311
Soldagem por fricção	312
Soldagem por difusão e por vitrificação.....	313



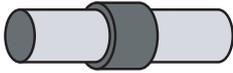
Cilindro com cilindro (junção de topo)



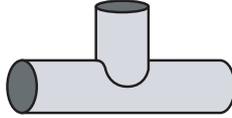
Cilindro com cilindro (junção por flange)



Cilindro com cilindro (junção chanfrada)



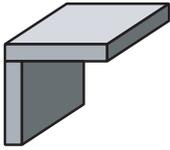
Cilindro com cilindro (luva)



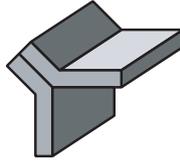
Cilindro (interseção plana)



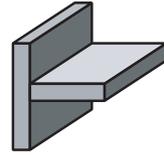
Cilindro (interseção com luva)



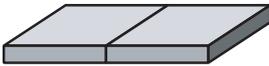
Placa com placa (canto)



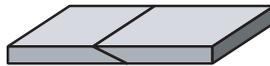
Placa com placa (borda)



Placa com placa (tê)



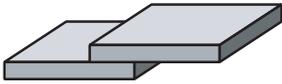
Placa com placa (junção de topo)



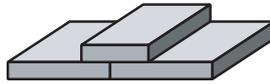
Placa com placa (junção chanfrada)



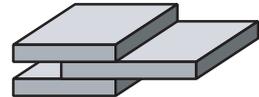
Placa com placa (macho e fêmea)



Placa com placa (sobreposição simples)



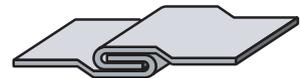
Placa com placa (sobreposição com tala)



Placa com placa (sobreposição dupla)



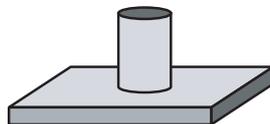
Placa com placa (sobreposição plana)



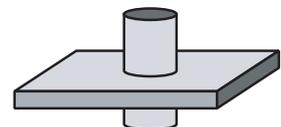
Placa com placa (sobreposição travada)

Geometrias de junção

A escolha do processo depende da geometria; às vezes, modificar a geometria (substituir junta de topo por junta sobreposta, por exemplo) pode permitir um processo mais barato.



Pino (interno ou sobreposto)



Pino (passante)

Leitura adicional

Bralla, J. G. *Handbook of Product Design for Manufacture*. 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998. (A bíblia: uma compilação maciça de informações sobre processos de manufatura, de autoria de especialistas de diferentes áreas, compilada por Bralla. É mais um manual do que um texto didático — não é de fácil leitura.)

DeGarmo, E. P., Black, J. T. e Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*. Nova York: Macmillan, 1984. (Um texto abrangente que foca processos de manufatura, com uma breve introdução a materiais. A perspectiva é a do processamento de metais. O processamento de polímeros e vidros ganha um tratamento muito mais resumido.)

Houldcroft, P. *Which Process?* Cambridge: Abington Publishing, 1990. (Perfis resumidos de 28 processos de soldagem e outros processos para unir metais, baseados em grande parte no conhecimento técnico especializado da TWI International no Reino Unido. Bom, mas assim como Wise (abaixo), difícil de conseguir.)

Hussey, R. e Wilson, J. *Structural Adhesives: Directory and Data Book*. Londres: Chapman & Hall, 1996. (Uma compilação abrangente de dados para adesivos estruturais de muitos fornecedores diferentes.)

Kalpakjian, S. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Reading: Addison-Wesley, 1984. (Um texto abrangente e amplamente usado sobre processos de manufatura para todas as classes de materiais.)

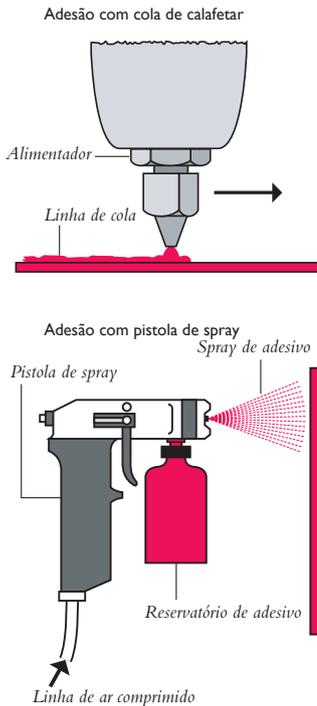
Le Bacq, C., Jeggy, T. e Brechet, Y. *Logiciel d'aide a la pre-selection des procedes d'assemblage*. St. Etienne: INPG/CETIM, 1999.

Lesko, J. *Materials and Manufacturing Guide: Industrial Design*. Nova York: John Wiley & Sons, 1999. (Descrições breves, desenhos e fotografias de materiais e processos de manufatura, com úteis matrizes de características, escritas por um consultor com muitos anos de experiência em design industrial.)

Swift, K. e Booker, J. D. *Process Selection: From Design to Manufacture*. Londres: John Wiley & Sons, 1998. (Planilhas de dados em formatos padronizados para 48 processos, 10 dos quais de junção.)

Wise, R. J. *Thermal Welding of Polymers*. Cambridge: Abington Publishing, 1999. (Uma compilação de informações sobre processos para soldar polímeros, baseada em grande parte no conhecimento técnico especializado da TWI International no Reino Unido. Bom, mas difícil de obter.)

Adesivos



Atributos dos adesivos

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	Sem restrições
Espessuras desiguais?	Sim
Unem materiais diferentes?	Sim
Impermeáveis?	Sim
Temp. de processamento, °C	16–180

O que são? Adesivos — colas — são tecnologias tão antigas que se tornaram parte da linguagem: “...cimentar uma amizade”, “...os laços de família”, “...aderir à política”. Aparentemente todas as civilizações antigas sabiam como fazer pastas de amido e colas de gelatinas animais e como unir materiais com betume e goma arábica. Os adesivos sintéticos surgiram no início do século XX, e desde então os avanços na química de polímeros expandiram muito sua aplicação e desempenho. Atualmente, adesivos estruturais sintéticos são utilizados em todos os setores industriais. Adesivos estruturais são os usados para executar alguma função mecânica, embora possam também desempenhar um papel secundário como o de vedação. Muitos são rígidos e resultam em união igualmente rija, mas adesivos flexíveis também desempenham um importante papel no design. Dentro de cada grupo, costuma-se utilizar uma classificação baseada na química.

Tipo de junção Todas as geometrias, em particular juntas de sobreposição.

Notas de design Adesivos têm várias características que permitem grande liberdade de design: praticamente qualquer material ou combinação de materiais pode ser ligado por adesivos; podem ser de espessuras muito diferentes (folhas finas podem ser ligadas a seções maciças); as temperaturas de processamento são baixas e raramente passam de 180°C; a flexibilidade de alguns adesivos tolera dilatação térmica diferencial em qualquer lado da junta; junções com adesivos normalmente são mais leves do que as uniões mecânicas equivalentes; e adesivos podem dar juntas impermeáveis à água e ao ar. As principais desvantagens são as limitadas temperaturas de serviço (a maioria dos adesivos são instáveis acima de 190°C, embora alguns possam ser usados até 260°C), a incerta instabilidade de longo prazo e os solventes desagradáveis que alguns contêm.

Observações técnicas Junções com adesivos resistem melhor a cisalhamento, tensão e compressão, do que a ruptura e descascamento — esses dois últimos devem ser evitados. As tensões de cisalhamento típicas das sobreposições estão na faixa de 8–45 MPa. Para juntas carregadas sob cisalhamento, a largura “perpendicular à direção do ‘cisalhamento’” é mais importante do que o comprimento “paralelo à direção do ‘cisalhamento’”. Juntas de topo são práticas somente quando a área é grande. Linhas de junção finas (tipicamente 25 µm) são melhores, exceto quando é exigida alta resistência a impacto. O equipamento essencial para a ligação por adesivos inclui pistolas de cola a quente e pistolas de calafetação a quente, que são usadas para aplicar adesivos semilíquidos ou em pasta. Pistolas de spray são utilizadas para aplicar adesivos líquidos e podem ser automatizadas. Pincéis e aspersores são usados para aplicação manual.

O ambiente Boa ventilação é essencial sempre que adesivos são usados.

Processos concorrentes Uniões mecânicas — embora essas geralmente exijam orifícios com as concentrações de tensões associadas.

Adesivos acrílicos

Adesivos acrílicos são um sistema de duas partes que, quando misturadas ou ativadas por radiação UV, são curadas e formam uma camada de ligação resistente a impacto. Usados principalmente para ligações madeira-metal.

Características: duráveis, duros, resistentes à água, oticamente límpidos, capazes de unir uma ampla faixa de materiais.

Produtos típicos: componentes aeroespaciais, automotivos e de computadores.

Adesivos de cianoacrilato

Adesivos de cianoacrilato são mais conhecidos como “supercolas”. São sistemas de uma única parte, curados em segundos quando expostos a ar úmido e que dão uma ligação resistente, mas bastante frágil.

Características: adesivos de cianoacrilato ligam praticamente qualquer coisa e “instantaneamente”, sem precisar nem de calor, nem de aperto.

Produtos típicos: junção rápida de pequenas peças, reparos domésticos em geral.

Epóxis e fenólicos de epóxis

Epóxis e fenólicos de epóxis são adesivos termofixos de alta resistência à tração (até 45 MPa) e baixa resistência ao descascamento (1,8 kg/mm), resistentes a solventes, ácidos, bases e sais. Epóxis de náilon têm as resistências mais altas e são usados primariamente para unir alumínio, magnésio e aço. Fenólicos de epóxi conservam sua resistência até 150–250°C e são usados para unir metais, vidro e resinas fenólicas. A maioria são sistemas de duas partes, curados a temperaturas entre 20 e 175°C, dependendo do grau. São usados em quantidades relativamente pequenas por causa do preço: porém, com adesivos com base de imida — dominam os mercados de adesivos de alto desempenho.

Matriz para adesivos
Ligação de materiais diferentes

Metais	Acrílico, CA, Epóxi, PU, Fenólicos, Silicone						
	Acrílico, Epóxi, Fenólicos, Fundidos a quente	Epóxi, Fenólicos, PVA					
Madeira	Acrílico, Epóxi, Fenólicos, Fundidos a quente						
	Acrílico, CA, Epóxi, Fenólicos	Epóxi, PU, Fenólicos, PVA	Acrílico, CA, Epóxi, Fenólicos				
Polímeros	CA, Epóxi, Silicone	Acrílico, Fenólicos, Silicone	CA, Epóxi, Fenólicos, Silicone	PU, Silicone			
	Acrílico, CA, Epóxi, Ceram,	CA, Epóxi, PVA, Ceram	Acrílico, Epóxi, PU, PVA, Ceram	Acrílico, Epóxi, PU, PVA, Silicone	Acrílico, CA, Epóxi, Ceram		
Elastômeros	Acrílico, CA, Epóxi, Imida	Acrílico, CA, Epóxi, PVA	Acrílico, Epóxi, PVA, Silicone	Epóxi, PU, Silicone	CA, Epóxi, Silicone	Epóxi, Imida, PES, Fenólicos	
	PU, Fundidos a quente	Acrílico, PVA, Fundidos a quente	Acrílico, PVA	Acrílico, PU, PVA	Acrílico, PU, PVA, Fundidos a quente	Acrílico, PU, PVA	PVA, Fundidos a quente
Cerâmicas							
Compósitos de fibras							
Têxteis							
Metais	Madeira	Polímeros	Elastômeros	Cerâmicas	Compósitos de Fibra	Têxteis	

Legenda
 Poliuretano = PU
 Termoplástico = Fundidos a quente
 Cianoacrilato = CA
 Poliéster = PES
 Acetato de polivinila = PVA
 Base de cerâmica = Ceram

Características: boa adesão para uma ampla faixa de substratos, com baixo encolhimento e boas propriedades mecânicas de -250 a 260°C .

Produtos típicos: amplamente usados nas indústrias aeroespacial, automotiva e náutica (construção de barcos).

Adesivos com base de imida (dismaleimidas, BMI e poliimidas, PI)

Adesivos com base de imida, como os epóxis, são amplamente utilizados como matriz em polímeros reforçados com fibras. Têm melhor desempenho em temperaturas elevadas do que a maioria de outros adesivos orgânicos. São usados para unir cerâmicas e metais.

Características: excelentes propriedades dielétricas (daí sua utilização em domos de radar (radomos); BMIs podem ser usados em temperaturas tão extremas quanto -250°C e 230°C ; PIs até 300°C .

Produtos típicos: domos de radar (radomos).

Adesivos fenólicos

Adesivos fenólicos são tão antigos quanto a baquelite (1905), com a qual são quimicamente parecidos. Às vezes os fenólicos são misturados com epóxis e neoprenes.

Características: alta robustez, boa resistência à água e resistência ao calor, retardador de chamas.

Produtos típicos: fabricação de compensado de madeira, agregado de madeira e estruturas de madeira laminada; esmeris e lonas de freio; peças fundidas em areia.

Poliuretanos

Poliuretanos incluem adesivos com base de poliuretano, bem como com base de isocianato, com tensões de cisalhamento nas sobreposições de aproximadamente 8 MPa.

Características: ligam-se bem a uma ampla faixa de materiais, são resistentes e flexíveis, têm boa resistência a água e solventes, e bom desempenho de -250 a 80°C .

Produtos típicos: amplamente usados nas indústrias automotiva, de construção, de móveis e de calçados.

Silicones (SIL)

Silicones são polímeros sintéticos nos quais o silício substitui o carbono como o principal elemento da cadeia. A maioria são sistemas de duas partes. Sua composição e propriedades químicas lhes dão excepcionais flexibilidade e estabilidade química.

Características: flexíveis, propriedades úteis de -115 – 260°C ; boa resistência à água e às radiações UV e IR.

Produtos típicos: adesivos e vedações nas indústrias automotiva, de construção e náutica.

Adesivos fundidos a quente

Adesivos fundidos a quente são baseados em termoplásticos como PE, náilon (PA), EVA e poliésteres. Esses materiais se fundem entre 100–150°C. Mediante manipulação química, podem aderir a outros materiais. Usados para unir madeira, têxteis, polímeros, elastômeros e metais.

Características: rápidos e fáceis de usar; não exalam vapores de solventes; uma ampla gama de manipulações químicas que podem ser adaptadas a tarefas específicas.

Produtos típicos: prototipagem, artesanato.

Adesivos anaeróbicos

Adesivos anaeróbicos são curados à temperatura ambiente quando na ausência de oxigênio.

Características: ligação forte com baixo encolhimento.

Produtos típicos: travas roscadas em uniões mecânicas; fixação de engrenagens e mancais, painéis planos de grande porte.

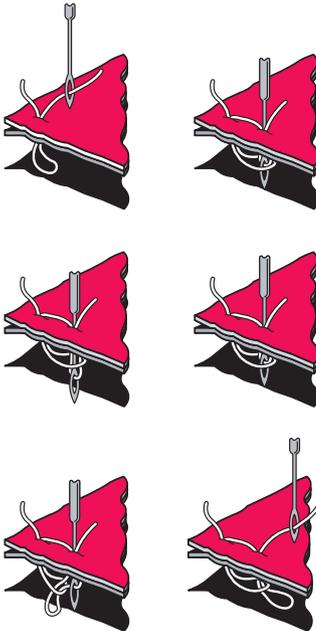
Cimentos de base cerâmica

Cimentos de base cerâmica são sistemas inorgânicos de duas partes que se fixam e dão uma ligação estável em altas temperaturas; usados para unir isolamento térmico a cerâmicas, metais, vidro ou madeira.

Características: ligação quimicamente estável, podem ser usados até 1600°C.

Produtos típicos: ligação de tijolos refratários em fornos e fornalhas; aplicações em fundição.

Costura



O que é? A costura, como a fundição de precisão e a esmaltação, é praticada há no mínimo 5000 anos — na verdade, há evidências de que seja ainda mais antiga. Na costura, aplica-se uma série de pontos com um ou mais fios contínuos de fibras, para unir materiais com duas ou mais espessuras. Há muitos tipos de pontos, descritos em geral como “pesponto”, no qual laços de um fio atravessam o material e são presos nos laços de um segundo fio do outro lado; ou “ponto de cadeia” no qual um único fio atravessa o material em zigue-zague. Máquinas de costura automatizam o processo. A figura mostra um ponto de cadeia de uma única junta de sobreposição.

Tipo de junção De topo e de sobreposição.

Notas de design A costura é um processo de excepcional flexibilidade, tanto na faixa de materiais que pode unir, quanto nas formas às quais pode ser aplicada. Proporciona não apenas aperto mecânico, mas também decoração, às vezes muito elaborada.

Observações técnicas Materiais diferentes podem ser unidos. Os fios usados para a costura convencional são as fibras naturais de algodão, seda e linho, a derivada da celulose (raion ou viscose), e fibras de polímeros reputados feitas de polietileno, poliéster, poliamida (náilons) ou aramidas (como o Kevlar®). Também é possível costurar com fios de metal. O fio ou fibra de junção deve ser suficientemente forte e flexível para suportar as tensões e curvaturas envolvidas na confecção de um ponto. Todos os tecidos, papel, papelão, couro e películas de polímeros podem ser costurados. A costura também pode ser usada para unir tecidos e películas com metal, vidro ou compósitos se os orifícios por onde os fios deverão passar forem moldados ou cortados nesses materiais. Há muitos tipos de possíveis configurações de junção, algumas que envolvem simples pesponto de uma única sobreposição ou costura em zigue-zague em uma única extremidade, outras que exigem uma dobra para dar configurações de sobreposições travadas e de topo.

Aspectos econômicos Máquinas de costura manuais ou pequenas máquinas de costura elétricas são acessíveis; grandes máquinas automáticas podem ser caras. A costura é rápida, barata e muito flexível, tanto em relação aos materiais que pode unir quanto em relação às configurações de junção.

Produtos típicos A costura é o principal processo de junção usado na indústria do vestuário. É importante na fabricação de tendas e velas náuticas, na montagem de sapatos e na encadernação de livros. É utilizada para unir chapas de polímeros para fabricar carteiras, pochetes, caixas e malas de viagem em geral.

O ambiente O dedal foi projetado para proteger o dedo contra perfurações durante a costura. Fora esse minúsculo risco, a costura não oferece ameaça à saúde ou à segurança e é amiga do meio ambiente.

Processos concorrentes Adesivos; uniões roscadas.

Atributos de rebites e grampos

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	1–10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Unem materiais diferentes?	Sim
Impermeáveis?	Não
Temp. de processamento, °C	16–30

Rebites e grampos

O que são? Uniões mecânicas têm três atrativos especiais: não necessitam de calor; podem unir materiais diferentes; e esses materiais podem ter espessuras diferentes. Rebites são amplamente usados no projeto de aeronaves — um atestado de sua resistência, durabilidade e confiabilidade. A rebitagem é feita pela inserção de um pino com uma cabeça em uma das extremidades de orifícios pré-perfurados e coincidentes nos componentes que devem ser unidos, e cravando (achatando) a outra extremidade saliente com um martelo de conformação. Grampos — um modo muito conhecido de unir papel e prender couro ou tecido em estruturas de móveis — são rápidos e baratos; também podem ser utilizados para unir chapas metálicas. Grampos são aplicados com uma furadeira de gabarito elétrica, pneumática ou carregada a mola, que força o grampo a atravessar os materiais até bater em uma bigorna ranhurada que curva as pernas do grampo para dentro, unindo as peças. No grampeamento cego não há bigorna — as pernas do grampo simplesmente atravessam os materiais que são unidos do mesmo modo que ocorre com pregos.

Tipo de junção Sobreposição.

Notas de design Ambos, rebites e grampos, podem ser usados para unir materiais semelhantes, mas também para unir um material a outro mesmo quando há uma grande diferença entre as resistências de cada um — couro ou polímero com aço ou alumínio, por exemplo. Ambos permitem grande flexibilidade de design embora seja necessário levar em conta a concentração de tensões no local em que o elemento de fixação penetra no material. A dimensão das cabeças dos rebites deve ser 2,5–3 vezes maior do que o diâmetro da haste; quando um dos materiais é mole, é melhor colocar uma arruela sob a cabeça no lado desse material para evitar que o rebite se movimente. Grampos são bons quando os materiais são finos; quando usados em metais, a espessura máxima é de aproximadamente 1mm, quando utilizados em materiais não metálicos, a espessura pode ser de até 10mm.

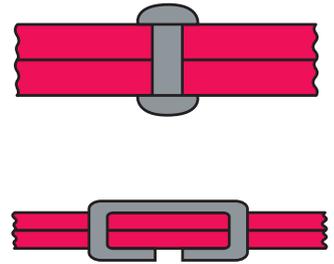
Observações técnicas Rebites e grampos são, em geral, de metal: aço, alumínio e cobre são comuns. É possível usar rebites e grampos de polímeros: são cravados a quente, e também sob pressão. Praticamente qualquer material na forma de chapa, malha ou urdidura pode ser unido por esses métodos; o grampeamento também permite unir arame com chapas.

Aspectos econômicos Rebitagem e grampeamento são ambos baratos, rápidos e econômicos mesmo para lotes de produção muito pequenos. Os custos de equipamentos, usinagem e mão de obra são muito baixos. Os processos podem ser automatizados.

Produtos típicos Grampeamento: junção de papel, couro, tecidos, placas de fibra. Rebites são usados extensivamente em aplicações aeroespaciais, automotivas e náuticas, mas têm um potencial muito mais amplo: pense nos rebites das etiquetas de couro nas calças jeans.

O ambiente O som de um estaleiro é o som da rebitagem — pode ser muito alto. Sabe-se que grampeadores muito entusiasmados já grampearam a si mesmos. Fora isso, ambos os processos são inofensivos ao ambiente.

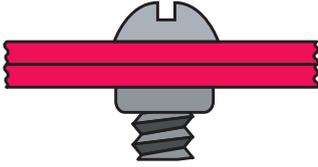
Processos concorrentes Adesivos; costura; uniões roscadas.



Atributos de rebites e grampos

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	0,01–10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Unem materiais diferentes?	Sim
Impermeáveis?	Com vedador
Temp. de processamento, °C	16–30

Uniões roscadas



Atributos das uniões roscadas

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	Sem restrições
Espessuras desiguais?	Sim
Unem materiais diferentes?	Sim
Impermeáveis?	Com vedador
Temp. de processamento, °C	16–30

O que são? Quando atingimos a fase das “porcas e parafusos”, chegamos ao básico. Parafusos são tão antigos quanto a engenharia — a prensa de extração de óleo de oliva dos tempos romanos dependia de um gigantesco parafuso de madeira. Uniões roscadas são as mais versáteis das uniões mecânicas, com todas as vantagens que oferecem: não envolvem calor, podem unir materiais diversos com espessuras muito diferentes e podem ser desmontados. Parafusos comuns exigem um orifício pré-roscado ou uma porca. Parafusos autoatarraxáveis produzem suas próprias roscas nos alojamentos.

Tipo de junção Mais comumente, sobreposta; porém, quase todas as juntas podem ser adaptadas para união roscada.

Notas de design Uniões mecânicas permitem grande liberdade de design e, ao mesmo tempo, a substituição de componentes ou acesso em razão da facilidade com que podem ser desmontadas. Podem ser usadas em altas temperaturas (700°C) e — com a localização adequada — permitem montagem de alta precisão.

Observações técnicas Uniões roscadas são, em geral, feitas de aço carbono, aço inoxidável, náilon ou outros polímeros rígidos. Parafusos de aço inoxidável e de liga de níquel podem ser usados em altas temperaturas e em ambientes corrosivos. O aperto é crítico: muito pouco e a união ficará frouxa; aperto em demasia pode resultar em danos ao conjunto — torquímetros resolvem o problema. Arruelas de aperto ou adesivos são utilizados para evitar afrouxamento.

Aspectos econômicos Uniões roscadas são baratas, assim como o equipamento para inseri-las quando a operação é manual. Porém a inserção é difícil de automatizar, o que torna outros métodos (soldagem, rebiteagem e adesivos) mais atraentes para uma junção permanente.

Produtos típicos Uniões roscadas são universais em projeto de engenharia. Porém, a sua utilização está ficando cada vez mais limitada a produtos para os quais a desmontagem ou a necessidade de acesso é essencial, já que outros métodos de junção são mais baratos, têm menos probabilidade de afrouxamento, são mais leves e mais fáceis de automatizar.

O ambiente As credenciais ambientais das uniões roscadas são impecáveis.

Processos concorrentes Junções de encaixe, rebites e grampos, adesivos, costura.

Unões de encaixe

O que são? Unões de encaixe, como outras uniões mecânicas, não envolvem calor, unem materiais diferentes, são rápidas e baratas e — se projetadas para tal — podem ser desmontadas. É essencial que o colchete de encaixe possa tolerar a deflexão elástica exigida para a montagem ou desmontagem. Polímeros, em particular, cumprem esse requisito, embora materiais que têm ação de mola também deem boas uniões de encaixe.

Tipo de junção Todas as geometrias podem ser adaptadas para união de encaixe desde que o material seja adequadamente escolhido.

Notas de design Uniões de encaixe permitem a junção ou travamento de componentes de todas as formas, materiais, cores e texturas diferentes, e ao mesmo tempo permitem rotação em uma ou mais direções (dobradiças de encaixe). Esse tipo de união pode ser permanente ou permitir desmontagem, dependendo da forma detalhada dos componentes unidos.

O processo possibilita grande flexibilidade de design e variedade estética.

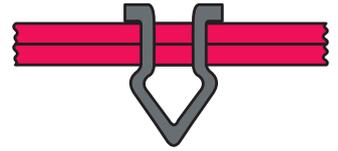
Observações técnicas As melhores opções são materiais com grandes índices de deformação por escoamento (deformação por escoamento = tensão de escoamento/módulo de elasticidade) e com módulos de elasticidade altos o suficiente para garantir bom registro e travamento positivo. Polímeros (em particular SAN, náilon, polietileno e polipropileno) têm valores muito mais altos de deformação por escoamento quando comparados com metais. Elastômeros têm o maior grau de deformação de todos os materiais, mas seu baixo módulo de elasticidade significa que a montagem será demasiadamente flexível, soltando-se e abrindo com facilidade. Entre os metais, os usados para fabricar molas (aço mola, ligas de cobre e berílio e latão trabalhado a frio) são as melhores opções, pelas mesmas razões.

Aspectos econômicos Uniões de encaixe são rápidas e baratas e reduzem o tempo e o custo de montagem, tanto na produção quanto no campo. A montagem manual não exige nenhum equipamento especial. A montagem automatizada requer equipamentos que podem ser caros, mas são muito rápidos.

Produtos típicos Uniões de encaixe são usadas cada vez mais em razão da liberdade de material e da forma que permitem. Normalmente são utilizadas para unir peças de polímeros de pequeno ou médio porte, carcaças de metal, partes de chapas etc.

O ambiente Uniões de encaixe são fáceis de desmontar, o que torna a reciclagem mais fácil. Nesse aspecto, e em todos os outros, são inofensivas ao meio ambiente.

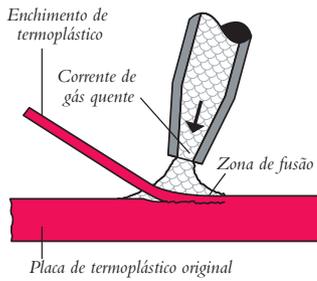
Processos concorrentes Adesivos; grampos; costura; uniões roscadas.



Atributos das uniões de encaixe

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm	Sem restrições
Espessuras desiguais?	Sim
Unem materiais diferentes?	Sim
Impermeáveis?	Possível
Temp. de processamento, °C	16–30

Soldagem a gás quente



Atributos da soldagem a gás quente

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	2,5–10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Se T _m for semelhante
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	200–300

O que é? A soldagem a gás quente é um modo de unir termoplásticos semelhantes, sob muitos aspectos, à soldagem a gás de metais. O maçarico de soldar é apenas um secador de cabelos melhorado que direciona uma corrente de gás quente a temperaturas que chamuscariam qualquer couro cabeludo (200–300°C) à área de junção e a uma haste do mesmo termoplástico do substrato. Polímeros são muito viscosos quando aquecidos, portanto, não fluem do mesmo modo que os metais — é por isso que é necessário um material de enchimento: o enchimento é comprimido para dentro da junção amolecida para formar a ligação. O processo é lento e mal-adaptado para produção em massa, mas é portátil, o que o transforma no melhor meio de montar e reparar grandes peças de polímero.

Tipo de junção Todas as geometrias, em particular a junção de placas com juntas de topo e sobrepostas.

Notas de design A soldagem a gás quente é limitada a termoplásticos. É um processo manual, mais adequado à montagem de grandes estruturas no campo — tubulações, revestimentos internos e estruturas em membranas de telhados, por exemplo. Não pode ser utilizada com materiais muito finos — 2,5mm é o mínimo.

Observações técnicas A soldagem a gás quente é comumente usada para unir polietileno, PVC, polipropileno, acrílico, algumas misturas de ABS e outros termoplásticos. A ferramenta de soldagem contém um aquecedor elétrico para aquecer gás, ar, nitrogênio ou CO₂ e um bocal para direcioná-lo à peça. Se for usado ar, este será fornecido por um compressor ou soprador; nitrogênio ou CO₂ exigem uma fonte de fornecimento de gás mais complicada.

Aspectos econômicos O custo do equipamento e o tempo de instalação são baixos, o que torna esse processo econômico, podendo ser executado no local; porém é lento e não adequado para produção em massa.

Produtos típicos Instalação e conserto de tubos termoplásticos, fabricação de grandes revestimentos internos resistentes a produtos químicos, montagem de caçambas de armazenagem e utilização em arquitetura para unir telhados de polímero como o do Domo do Milênio em Londres.

O ambiente Nenhum problema — é só um pouco de ar quente.

Processos concorrentes Soldagem a laser, uniões roscadas, adesivos.

Soldagem por barra quente

O que é? O mais simples de todos os processos de soldagem para polímeros é o que você pode usar em sua cozinha para vedar alimentos em sacos de congelamento: soldagem por barra quente. Nesse processo, películas sobrepostas de polímero termoplástico são introduzidas entre barras revestidas com PTFE e aquecidas eletricamente. Uma das barras é articulada para permitir que as películas sejam inseridas e removidas. Acionadores mecânicos ou pneumáticos fecham a barra e exercem a força de pinçamento. A junção em si é aquecida por condução através da película, o que limita a espessura da película a menos de 0,5mm. Uma solda típica em uma película termoplástica de 100 µm de espessura leva de 1 a 3 segundos. A soldagem por impulso é uma modificação da soldagem com barra quente no sentido de que as barras são aquecidas por pulsação, o que dá controle de qualidade adicional.

Tipo de junção Sobreposta.

Notas de design O processo é limitado a termoplásticos e a juntas de sobreposição entre placas, ambas finas. Porém, é rápido, barato e limpo, e se presta à vedação de alimentos, embalagens, medicamentos e equipamentos médicos. A forma da solda é definida pela forma da barra, que pode ter um perfil de superfície complexo.

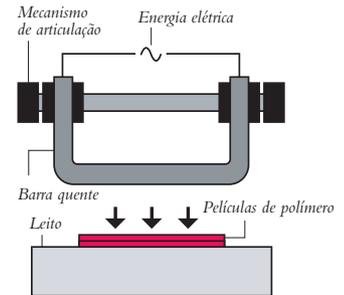
Observações técnicas Controle de tempo, temperatura e pressão de pinçamento são essenciais para uma boa união — a soldagem por impulso é um dos modos de controlar as duas primeiras propriedades. O tempo, t , para formar uma ligação varia inversamente em relação à difusibilidade térmica, a , do polímero, e é proporcional ao quadrado da espessura, x , da chapa ($t = x^2/2a$), portanto, são necessários ajustes quando o material ou a espessura mudam.

Aspectos econômicos O processo é barato, rápido e usa equipamentos e ferramental de baixo custo.

Produtos típicos A soldagem com barra quente e por impulso são amplamente usadas para selar embalagens de polímeros para a indústria alimentícia, para pacotes embalados a vácuo, para embalagens em geral e de produtos médicos. São usadas para unir películas de polímero a peças moldadas de polímero, para produzir envelopes transparentes para arquivo e muitas outras aplicações semelhantes.

O ambiente O processo é limpo, não envolve produtos químicos, não gera vapores e consome pouca energia; resumindo — é pouco agressivo ao ambiente.

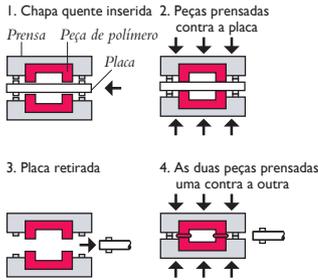
Processos concorrentes Soldagem a laser; adesivos; costura.



Atributos da soldagem por barra quente

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm	0,05–0,5
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	180–280

Soldagem por placa quente



Atributos da soldagem por placa quente

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm	1–30
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Não
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	190–290

O que é? A soldagem por placa quente produz juntas de topo entre peças inteiriças de termoplástico por uma espécie de inversão do modo como a soldagem por barra quente faz juntas de sobreposição. Os componentes que devem ser unidos são mantidos em elementos de fixação que os comprimem contra uma placa revestida de PTFE e aquecida eletricamente. Essa operação funde a superfície e amolece o material que está abaixo dela. A pressão é aliviada, a ferramenta é retirada e as superfícies de polímero quente são comprimidas uma contra a outra e ali mantidas até esfriarem. A soldagem por placa quente pode ser usada para formar juntas de grande área — por exemplo, a união de grandes redes de tubos de polietileno para a condução de gás ou água. O processo é relativamente lento, exige tempos de soldagem entre 10 segundos para componentes pequenos e uma hora para componentes muito grandes.

Tipo de junção Placa com placa (junção de topo).

Notas de design A soldagem por placa quente pode unir praticamente todos os termoplásticos exceto náilons, para os quais os problemas de oxidação resultam em má qualidade da solda. A resistência da união normalmente é igual à do material original, mas o desenho da união está limitado a configurações de topo. Se a união tiver um perfil curvo ou em ângulo, pode-se usar ferramentas de conformação a quente.

Observações técnicas O controle preciso da temperatura da chapa quente é importante para boas junções. Em geral, a temperatura da placa fica entre 190 e 290°C dependendo do polímero que deve ser unido. A pressão é aplicada por meios hidráulicos ou pneumáticos. A maioria dos componentes termoplásticos pode ser soldada pelo método da chapa quente, mas ele é mais efetivo para unir grandes componentes feitos de polietileno, polipropileno ou PVC altamente plasticizado. O método cria uma ligação forte, impermeável a gás ou água.

Aspectos econômicos Equipamento e ferramental são moderadamente baratos, mas o processo pode ser lento.

Produtos típicos O processo é utilizado para fazer reservatórios hidráulicos e carcaças de baterias para automóveis; para unir caixilhos de portas e janelas de PVC não plasticizado; para unir tubulação termoplástica de distribuição de água e gás; e para tubos de esgoto e descarga de até 150mm de diâmetro. Também é usado para outros objetos: faróis traseiros de automóveis, bombas d'água, portas de refrigeradores.

O ambiente O processo é limpo e não envolve produtos químicos desagradáveis e em geral é amigável ao ambiente.

Processos concorrentes Soldagem a gás quente; soldagem por fricção.

Soldagem por ultrassom

O que é? Se você quiser soldar usando ultrassom, precisará de um gerador de ultrassom, um conversor (transdutor), um impulsor auxiliar e uma ferramenta de soldagem que tem o nome bizarro de sonotrodo. O gerador para soldagem por ultrassom converte os 50 Hz das linhas de alimentação em um sinal de 20 kHz. O conversor usa o efeito piezelétrico para transformar isso em oscilações mecânicas. O impulsor auxiliar e o sonotrodo transmitem isso para a zona de solda de modo a criar um deslocamento de 10 a 30 µm na oscilação. Uma pressão estática de 2–15 MPa é aplicada sobre as superfícies que devem ser unidas e então a energia elétrica é ligada para que elas deslizem, se aqueçam, fiquem mais ásperas e se unam.

Tipo de junção Placa com placa (topo e sobreposição).

Notas de design A soldagem por ultrassom produz soldas rápidas, fortes, limpas e confiáveis tanto em polímeros quanto em metais. Para polímeros, o processo é usado principalmente em películas e chapas termoplásticas. Pode unir materiais diferentes de espessuras diferentes, por aplicação de soldas por pontos ou de costura. A maioria dos metais também pode ser soldada por ultrassom. Ocorre algum aumento de temperatura na superfície deslizante, mas fica bem abaixo da temperatura de fusão do material. Em vez disso, aparentemente a rápida reversão de tensão rompe películas e contaminadores superficiais, e a plasticidade local, aliada a alguma difusão, cria a ligação. O processo oferece tempos de processo curtos (por exemplo, 3 segundos por solda) e temperaturas relativamente baixas, o que minimiza o dano ao material adjacente à solda.

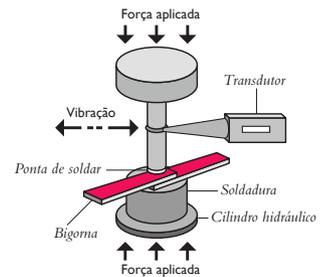
Observações técnicas A soldagem por ultrassom é geralmente limitada à junção de materiais finos — chapas, películas ou fios — ou à ligação de chapas finas a membros estruturais mais pesados. A espessura máxima, para metais, é de aproximadamente 1mm. O processo é particularmente útil para unir metais diferentes. Como as temperaturas são baixas e não há centelhação nem fluxo de corrente envolvidos, o processo pode ser aplicado a componentes eletrônicos sensíveis. Tensões de cisalhamento de até 20 MPa são possíveis.

Aspectos econômicos A soldagem por ultrassom é rápida e limpa. Até 1000 peças por hora podem ser unidas.

Produtos típicos Polímeros: o processo é amplamente usado nas indústrias automotivas, têxteis, de eletrodomésticos, de equipamentos médicos e de brinquedos. Montagens típicas incluem lanternas traseiras seladas com lentes transparentes e corpos opacos, copos de bebida com dupla camada de isolamento, brinquedos e painéis decorativos com placas multicoloridas indicadoras de nomes. Metais: soldagem de topo ou de linha de chapas finas, junção de metais diferentes em contatos bimetálicos para microcircuitos elétricos, encapsulamento de explosivos ou produtos químicos.

O ambiente O processo tem credenciais ambientais invejáveis. É totalmente limpo — não há nenhum vapor nem produtos químicos, nenhum risco elétrico e outros riscos. A energia fornecida é quase inteiramente transmitida à junção, o que resulta em eficiência de energia que ultrapassa em muito a de processos térmicos.

Processos concorrentes Uniões roscadas, soldagem a laser.

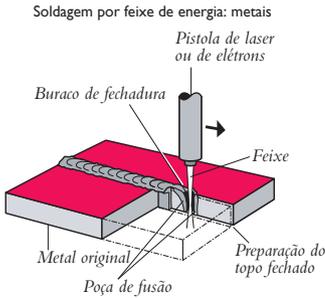


Atributos da soldagem por ultrassom

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm (metais)	0,01–1
(polímeros)	0,1–3
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C (metais)	300–600
(polímeros)	100–250



Soldagem por feixe de energia



Atributos da soldagem por feixe de energia: Metais

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm (feixe de elétrons)	1–200
(feixe de laser)	0,2–20
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	600–2K

O que é? Feixes de elétrons e de lasers são o material dos raios da morte — invisíveis, mortíferos e certos, e limpos — sem fumaça, sem vapores, sem sujeira. Ambos são usados para soldar metais; lasers podem soldar polímeros também. Na soldagem por feixe de elétrons, a fusão é produzida pelo calor de um feixe focado de elétrons de alta velocidade. A energia cinética dos elétrons é convertida em calor quando o feixe atinge a peça, que tem de estar contida em uma câmara de vácuo, e deve ser condutora. Não é usado enchimento de metal. O processo é mais eficiente em termos de energia do que a soldagem por feixe de laser, permitindo mais densidades de potência e capacidade de soldar placas mais espessas. Na soldagem por feixe de laser, a fonte de calor é um feixe estreito de luz monocromática. O processo é mais preciso do que a soldagem por feixe de elétrons, e ocorre ao ar livre, o que permite mais liberdade de design, mas a profundidade de penetração é menor (máximo de 20mm em metais). Gás de blindagem é soprado por um bocal circunjacente para proteger a solda. Novamente, nenhum enchimento de metal é utilizado.

É possível soldar com laser películas de polímeros finas, semitransparentes ou opacas, simplesmente passando o feixe por elas, mas esse não é o melhor meio de usar lasers. O truque na soldagem de polímeros é dispor o feixe de tal modo que ele seja absorvido onde é mais útil — na interface da junção. Para polímeros transparentes, isso pode ser conseguido com a aplicação por pistola de spray de uma fina camada de corante que absorva radiações IR ou UV, invisíveis ao olho humano, à superfície que se quer soldar; o feixe de laser atravessa a chapa superior transparente (que pode ser grossa — até 10mm de espessura) sem muita perda de energia. Porém, quando atinge o corante na interface, sofre forte absorção, funde o polímero nesse local e ali cria uma solda, ao mesmo tempo que deixa fria grande parte do restante do material. Escanear o feixe ou traçar a peça dá uma linha de solda de até 10mm de largura.

Tipos de junção Metais: Todas as geometrias de junção são possíveis. Polímeros: juntas de sobreposição.

Notas de design A alta densidade de energia focada no feixe dá soldas estreitas em metais com mínima penetração de calor na peça, o que permite altas velocidades de soldagem com baixa distorção. É necessária usinagem precisa de componentes combinados, visto que não é usado nenhum material de enchimento. Os processos permitem a fabricação de produtos que não poderiam ser fabricados de nenhuma outra forma.

A soldagem de polímeros (em particular polímeros transparentes) sem um corante interfacial é limitada à união de finas películas e chapas termoplásticas. A soldagem com um corante dá mais controle e permite seções mais grossas. Materiais diferentes podem ser unidos, porém, suas temperaturas de fusão devem ser comparáveis. A principal característica do processo é que ele é isento de contato, e excepcionalmente limpo e rápido.

Observações técnicas Feixes de elétrons têm potência de 1–100 kW, o que permite soldagem de placas de metal de 1 a 200mm de espessura, mas o processo requer uma câmara de vácuo, o que limita o tamanho da peça. A potência do feixe produzido pelo equipamento de feixe de laser é

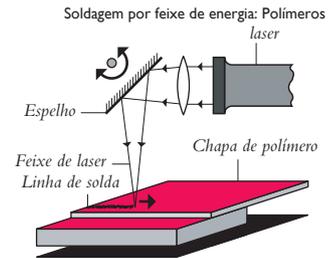
mais baixa, normalmente 500 W–5 kW, embora existam lasers de até 25 kW. A soldagem por feixe de laser é preferida na indústria de microeletrônicos porque é limpa e não precisa de câmara de vácuo. A soldagem por feixe de elétrons — por causa do vácuo — é particularmente adequada para metais refratários como tântalo, nióbio, molibdênio e tungstênio. A soldagem a laser pode ser usada para esses também, mas é essencial que o metal não tenha superfície brilhante, porque isso reflete o feixe. Há revestimentos disponíveis para aumentar a absorção. A resistência de uma junta de sobreposição bem-projetada e soldada a laser em polímeros muitas vezes ultrapassa a da película ou placa original. Para películas finas, a velocidade de soldagem pode alcançar 30 m/min, mas para películas de espessuras de 1 mm a velocidade é menor: aproximadamente 1 m/min. O controle do perfil do laser permite soldagem e corte simultâneos (o processo “cortar e selar”). Se uma das duas chapas que estão sendo unidas é colorida e a outra é transparente, a chapa colorida deve ser posicionada mais afastada do feixe.

Aspectos econômicos O custo do equipamento de feixe de elétrons é alto, e — para soldagem por feixe de elétrons — os tempos de ciclo são longos em razão da necessidade de evacuar a câmara de vácuo. Porém, apesar disso, a velocidade e a capacidade de controle compensam, o que torna ambos os processos atraentes para fabricação em grande escala. Quando os volumes de produção são grandes, como na indústria automotiva e na área da microeletrônica, o alto investimento pode ser amortizado; e a alta velocidade de soldagem, a soldagem com uma só passagem e a ausência da necessidade de operações secundárias tornam o processo econômico.

Produtos típicos A soldagem por feixe de elétrons é usada extensivamente para montar engrenagens e transmissões para automóveis, motores de avião e produtos aeroespaciais. A alta capacidade do equipamento de feixe de elétrons é utilizada para vasos de pressão, usinas nucleares e de processos, e fábricas de produtos químicos. A soldagem por feixe de laser é utilizada quando o controle de precisão é importante: junção de componentes eletrônicos e de peças de pequeno calibre como foles e molas de relógios. Cada vez mais o processo tem sido adaptado para componentes automotivos — caixas de embreagens e de transmissão, produtos aeroespaciais e domésticos. Soldagem a laser de polímeros: embalagem de alimentos e vedação de materiais e equipamentos biomédicos. Há um interesse crescente em sua utilização para soldar PET e outros polímeros para uso estrutural.

O ambiente Feixes de elétrons geram raios X e radiações infravermelhas e ultravioletas. Os feixes de laser são prejudiciais — em particular para os olhos. Proteção adequada é essencial para ambos, e exigem procedimentos de segurança rigorosos. Porém, fora isso, os processos são atraentes do ponto de vista ambiental: são limpos, não envolvem produtos químicos e não produzem resíduos.

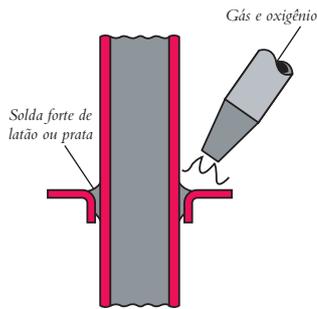
Processos concorrentes Metais: soldagem por resistência, uniões roscadas. Polímeros: soldagem por barra quente.



Atributos da soldagem por feixe de energia: polímeros

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm (aquecimento direto)	0,1–1
(absorção de corante)	1–10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	200–300

Brasagem



Atributos da brasagem

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	1–100
Espessuras desiguais?	Sim
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	450–600

O que é? Quando os componentes que devem ser unidos não podem tolerar as temperaturas exigidas para soldagem, as alternativas são brasagem, soldadura, uniões mecânicas ou adesivos. A brasagem é o mais quente deles. Na brasagem, um metal de baixa temperatura de fusão é fundido, escorre para dentro do espaço entre duas superfícies sólidas por capilaridade e ali se solidifica. A maioria das ligas de brasagem se funde acima de 450°C, porém, abaixo da temperatura de fusão dos metais que estão sendo unidos. A solda forte (o material de brasagem) é aplicada à união aquecida sob a forma de arame, folha ou pó, revestida ou misturada com fundente, onde é fundida com um maçarico gás-ar, por aquecimento por indução ou pela inserção dos componentes dentro de um forno; em seguida os componentes são resfriados ao ar.

Tipo de junção Todas as geometrias de junção, em particular as de topo, chanfradas e sobrepostas.

Notas de design Quase todos os metais podem ser unidos por alguma variante da brasagem, desde que tenham temperaturas de fusão acima de 650°C. O processo pode unir metais diferentes mesmo quando eles têm temperaturas de fusão diferentes. A brasagem é facilmente adaptada à produção em massa (bicicletas baratas são brasadas) e a junção é forte, permanente e durável. Uma área de união grande é boa — compensa a resistência relativamente baixa do metal de brasagem em si. As juntas precisam de um espaço livre de 0,02–0,2mm para permitir que se forme uma ligação boa e forte. Cerâmicas podem ser brasadas se as superfícies que devem ser unidas forem metalizadas anteriormente com cobre ou níquel.

Observações técnicas Ligas de brasagem devem fundir a temperaturas modestas (450–600°C), de modo a umedecer as superfícies que serão brasadas (muitas vezes formando uma liga com essas superfícies) e devem ser muito fluidas. As mais comuns são aquelas cujas composições se assemelham à do latão (o termo “brasagem” é derivado de *brass*, latão em inglês) e as ligas com base de prata. O latão de brasagem (0,6 Cu, 0,4 Zn) e os bronzes de brasagem (a mesma composição com 0,0025 Mn, 0,01 Fe e 0,01 Sn) são usados para unir aço, aço inoxidável, cobre e níquel; soldaduras de prata (0,3–0,6 Ag, 0,15–0,5 Cu mais um pouco de Zn) são ainda melhores para os mesmos metais. Os fundentes desempenham um importante papel na remoção de contaminação superficial, em particular óxidos, e na melhoria da umectação por meio da redução da tensão superficial.

Aspectos econômicos Os custos de equipamentos e ferramental para brasagem são baixos. A brasagem com maçarico requer certa habilidade; a brasagem em forno pode ser automatizada, e não exige mão de obra especializada. O processo é econômico para pequenos lotes, mas permite altas taxas de produção quando automatizado.

Produtos típicos A brasagem é amplamente usada para unir tubulações, quadros de bicicletas, acessórios hidráulicos e para consertar peças fundidas e montar peças de máquinas.

O ambiente A brasagem gera vapores, e alguns fundentes são tóxicos — boa ventilação e limpeza são importantes. Fora isso, a brasagem tem baixo impacto ambiental; os metais envolvidos não são tóxicos.

Processos concorrentes Adesivos, soldadura, uniões roscadas.

Soldadura

O que é? Soldadura é uma brasagem a baixa temperatura; ou — uma outra analogia — é uma colagem com metal. Usa ligas que se fundem abaixo de 450°C. Juntas soldadas por esse processo são menos fortes do que juntas brasadas — são mais parecidas com um adesivo —, mas o equipamento necessário para produzi-las é mais simples e as temperaturas alcançadas pela peça são muito mais baixas, uma condição essencial para a montagem de equipamentos eletrônicos. A soldadura pode ser aplicada do mesmo modo que a brasagem, ou — mais parecido com um adesivo — por pré-revestimento (“estanhagem”) das superfícies de metal que deverão ser unidas antes da montagem, e simples aquecimento com um maçarico, um ferro de soldar elétrico, ou um arranjo de lâmpadas infravermelhas. Na soldadura de refluxo, os componentes são aquecidos por vapor obtido pela ebulição de um hidrocarboneto fluorado que se condensa sobre os componentes, libera calor latente e produz aquecimento rápido e uniforme.

Tipo de junção Todas as geometrias de junção, em particular as de topo, chanfradas e de luva.

Notas de design Materiais de soldadura são condutores elétricos — e é isso que lhes dá sua proeminência na indústria de eletrônicos. Do ponto de vista mecânico são metais macios; é a pequena espessura da união soldada que lhes dá alta resistência à tração; porém, como a tensão de cisalhamento é baixa (menos de 2 MPa), as juntas soldadas devem ter uma área grande em comparação com a da seção que suporta a carga (como nas juntas sobrepostas ou de luva), ou então receber resistência mecânica adicional (como nas juntas de borda travada). Materiais de soldadura podem unir materiais diferentes de tamanhos e espessuras muito variados.

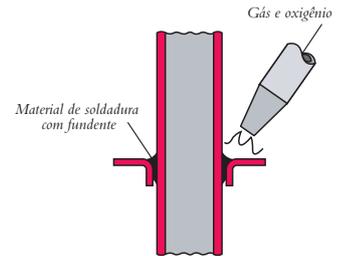
Observações técnicas Materiais de soldadura são ligas de metais de baixa temperatura de fusão — chumbo, estanho, zinco, bismuto, cádmio, índio. A combinação de ponto de fusão mais baixo de quaisquer duplas de metais é a composição “eutética”; materiais de soldadura de chumbo e estanho para conexões elétricas têm essa composição (0,6 Sn, 0,4 Pb). A composição de materiais de soldadura de chumbo e estanho para outras aplicações fica na faixa de 0,2–0,6 Sn. Materiais de soldadura de estanho e antimônio são utilizados para conexões elétricas. Materiais de soldadura de índio e estanho são usados para juntas de vidro com metal. A soldadura exige fundentes. Alguns são simplesmente solventes para graxa, que limpam a superfície; outros são ácidos e devem ser eliminados depois de a junta estar pronta ou poderão causar problemas.

Produtos típicos Materiais de soldadura são amplamente utilizados para fazer conexões elétricas, criar placas de circuitos impressos e unir chips lógicos a elas, para tubulação doméstica, radiadores de automóveis, peças de precisão em joalheria.

Aspectos econômicos Como a brasagem, a soldadura é um processo flexível que permite altas taxas de produção, e é também econômico para pequenos lotes. Os custos de equipamentos e ferramental são baixos, e o processo não requer nenhuma grande habilidade.

O ambiente Agora chegamos ao pior. Metais pesados — chumbo e cádmio em particular — têm má reputação ambiental. Há uma pressão cada vez maior para substituí-los. Estão surgindo alternativas, mas custam mais e são mais difíceis de usar.

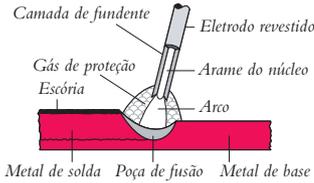
Processos concorrentes Brasagem; adesivos; uniões roscadas.



Atributos da soldadura

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	1–10
Espessuras desiguais?	Sim
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	150–450

Soldagem com eletrodo revestido (MMA ou SMAW)



Atributos da soldagem com eletrodo revestido

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	1–100
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Não
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	1500–1700

O que é? Soldagem com eletrodo revestido, também conhecida como “soldagem manual a arco elétrico com metal” (*Manual Metal Arc — MMA*) ou “soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido” (*Shielded Metal Arc Welding — SMAW*), é o método mais importante de soldagem e tratamento de superfície de uso geral, que utiliza equipamento de baixo custo. Nesse método, um arco elétrico é formado entre uma vareta de material fundente consumível e o componente. A camada de revestimento de fundente se decompõe e proporciona uma blindagem de gás; a escória que se forma acima da poça de fusão impede que o metal se oxide. A escolha adequada de metal e fundente permite que o processo seja usado para uma ampla variedade de aplicações, embora limitadas exclusivamente a ligas ferrosas.

Tipo de junção Todas as geometrias de junção.

Notas de design A MMA é fácil de usar e muito flexível, o que a torna uma opção primordial para uma peça só ou para um baixo volume de produção; porém — como não pode ser automatizada — não é um processo adequado para produção em massa. A distorção causada por dilatação térmica é minimizada pela simetria projetada entre as linhas de solda e pelo equilíbrio das soldas ao redor do eixo neutro da estrutura. As melhores linhas de solda são as retas ou de contornos simples e a junta deve ser projetada para permitir acesso ao maçarico de soldar.

Observações técnicas Aços-carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis, ferros fundidos e certas ligas de níquel podem ser unidos por soldagem MMA. É difícil soldar materiais diferentes. A vareta de solda é consumida, produzindo metal de enchimento para a solda; porém, quando termina deve ser substituída, o que interrompe o processo de soldagem e causa tensões aleatórias nas junções. O fundente precisa ser removido em uma operação de limpeza entre cada passe de solda.

Aspectos econômicos A soldagem MMA é um processo versátil, de baixo custo, fácil de transportar, mas que não é fácil de automatizar devido ao comprimento limitado de cada eletrodo.

Produtos típicos A MMA é usada para unir vasos de pressão, peças de aço estrutural, tubulações, para ligar contrafortes a estruturas na construção de navios, e na engenharia em geral.

O ambiente Os vapores gerados na soldagem podem representar riscos para a saúde, e a radiação da solda pode afetar a visão. Boa ventilação e a utilização de máscaras de soldar e óculos de segurança com lentes escuras resolvem esses problemas.

Processos concorrentes Soldagem MIG e soldagem TIG.

Soldagem MIG

O que é? A soldagem de metal por arco elétrico a gás de proteção (*Gas Metal Arc* — MIG) é um dos três grandes processos de soldagem para trabalhos pesados (juntamente com a soldagem por eletrodo revestido e a soldagem TIG). Nesse processo o eletrodo é um arame limpo, sem nenhum revestimento de fundente. O fundente é substituído por uma corrente de gás inerte que se forma ao redor do arco originado entre o arame de soldar (eletrodo) e a peça. O arame de soldar é alimentado por uma bobina à medida que o eletrodo é consumido. As reais vantagens em relação à soldagem por eletrodo revestido são a ausência de fundente e escória, o que produz uma solda mais limpa, além da possibilidade de automatizar o processo. Mas há uma penalidade: como o processo precisa de gás, é mais caro e menos portátil. Não obstante, a soldagem MIG é considerada o mais versátil de todos os processos de soldagem por arco elétrico.

Tipo de junção Topo, sobreposta.

Notas de design Se você quiser soldas de alta qualidade em alumínio, magnésio, titânio, aço inoxidável ou até aço doce, a soldagem MIG é o processo a escolher. É melhor para soldas de filete por meio de uma adaptação — a soldagem MIG por pontos —, e se presta bem a juntas sobrepostas. A distorção causada por dilatação térmica é minimizada pela simetria projetada entre as linhas de solda e pelo equilíbrio das soldas ao redor do eixo neutro da estrutura. As melhores linhas de solda são as retas ou de contornos simples e as juntas devem ser projetadas para permitir acesso ao maçarico de soldar.

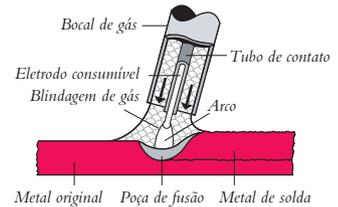
Observações técnicas A maioria dos metais e ligas comuns, exceto zinco, podem ser soldados pelo processo MIG; há arames de eletrodo (o material de enchimento) disponíveis para todos eles. O gás de blindagem é normalmente argônio, hélio, dióxido de carbono ou uma mistura deles — é escolhido de acordo com o material a ser soldado. O processo produz gotas de solda uniformes que não exigem desescorificação, e, portanto, são adequadas para mecanização e operação por robôs de soldagem. A soldagem MIG pode ser usada para a maioria das geometrias de junção e pode ser feita em grande parte das orientações, mas é mais eficiente quando plana e horizontal.

Aspectos econômicos Os custos do equipamento são moderados e os custos de ferramental são baixos. A soldagem MIG é mais cara do que a soldagem com maçarico em razão do custo do gás de proteção, mas é rápida e demanda menos mão de obra.

Produtos típicos A soldagem MIG é usada em todas as indústrias, tanto nas versões manuais quanto nas automáticas, em particular na construção de navios, em engenharia estrutural, instalações fabris de processo e em engenharia elétrica, equipamentos domésticos e na indústria automobilística. É indispensável para soldar metais difíceis, não ferrosos, como alumínio, magnésio e titânio.

O ambiente Os riscos para a saúde dependem da composição do eletrodo e da peça; ambas aparecem como vapores transportados pelo ar durante a soldagem. A radiação proveniente da solda pode danificar a visão, e exige o uso de um capacete de soldagem e de óculos escuros de segurança.

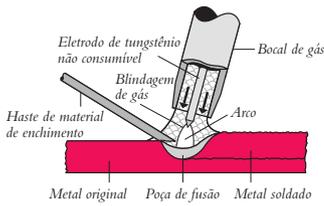
Processos concorrentes Soldagem por eletrodo revestido, soldagem TIG.



Atributos da soldagem MIG

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	1–100
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Não
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	600–2000

Soldagem TIG



Atributos da soldagem TIG

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	0,2– 10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Não
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	600–2000

O que é? A soldagem a gás inerte de tungstênio (*Tungsten Inert Gas* — TIG), o terceiro dos três grandes processos de soldagem (os outros são MMA e MIG) é o mais limpo e mais preciso, mas também o mais caro. Sob um aspecto, é muito parecido com a soldagem MIG: um arco é produzido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça a ser soldada, protegido por um gás inerte (argônio, hélio, dióxido de carbono) para evitar a contaminação do metal fundido. Porém, nesse caso, o eletrodo de tungstênio não é consumido devido à sua temperatura de fusão extremamente alta. O material de enchimento é fornecido separadamente em arame ou haste. A soldagem TIG funciona bem com chapas finas e pode ser usada manualmente, sendo fácil de automatizar. As taxas de penetração e deposição são muito menores do que as da soldagem MIG, mas o controle preciso da solda é mais fácil.

Tipo de junção Todas as geometrias de junção.

Notas de design Como o aquecimento está desvinculado do fornecimento de enchimento, é possível melhor controle das condições da solda. Assim, a soldagem TIG é usada para placas finas e montagens de precisão feitas praticamente de qualquer metal. Superfícies limpas e juntas bem-preparadas são importantes. O processo é usado principalmente para seções finas e juntas de precisão.

Observações técnicas A soldagem TIG produz soldas de altíssima qualidade em metais como alumínio, magnésio, titânio, aço inoxidável e níquel; também é fácil soldar ferro fundido e aço doce. O arco é iniciado por uma descarga de corrente alternada de alta frequência para evitar contaminação do eletrodo de tungstênio; na sequência, é mantido por uma corrente contínua ou por uma corrente alternada de onda quadrada, que possibilita melhor controle da penetração.

Aspectos econômicos O equipamento é mais caro e menos portátil do que o maçarico, e exige um nível de qualidade mais alta do operador. Porém, a maior precisão, a ampla escolha de metais que podem ser soldados e a qualidade da solda frequentemente justificam a despesa.

Produtos típicos A soldagem TIG é um dos processos mais comumente usados para a soldagem automatizada dedicada, em especial nos mercados de equipamentos automobilísticos, aeroespaciais, nucleares, de geração de energia, de processo e eletrodomésticos.

O ambiente A soldagem TIG requer as mesmas precauções que qualquer outro processo de soldagem a arco elétrico: ventilação para evitar a inalação de vapores provenientes da poça de fusão, e óculos ou viseiras coloridas para proteger o operador contra a radiação.

Processos concorrentes Soldagem por eletrodo revestido (MMA) e soldagem MIG.

Soldagem por resistência

O que é? O filamento de tungstênio de uma lâmpada é aquecido, por resistência, até aproximadamente 2000°C. Isso é mais do que suficiente para fundir a maioria dos metais. A soldagem por resistência (*Resistance Welding* — RW) depende da localização da corrente elétrica (e, portanto, do aquecimento I²R) onde o aquecimento é desejado: na interface. Na soldagem por ponto (*Resistance Spot Welding* — RSW), as chapas sobrepostas são comprimidas entre eletrodos refrigerados a água. A corrente de pulso gera calor; os eletrodos resfriados reduzem as temperaturas das superfícies e localizam o calor na interface entre as chapas onde o metal se funde e se solda. A soldagem por projeção (*Resistance Projection Welding* — RPW), usa um truque adicional — uma pústula pré-formada sobre a face da junção — para confinar o caminho da corrente e melhor localizar o aquecimento; uma ideia inteligente, porque estende a utilização do método a peças forjadas, fundidas e usinadas e o torna mais rápido, visto que é possível fazer várias soldagens ao mesmo tempo. Na soldagem por costura (*Resistance Seam Welding* — RSEW), os eletrodos são rodas resfriadas a água que comprimem placas sobrepostas para dar uma solda de costura.

Tipo de junção Topo e sobreposta.

Notas de design A soldagem por resistência tem muitas vantagens em relação a rebites ou uniões roscadas: é mais rápida, é fácil de automatizar, não requer perfuração, punção, fundente ou enchimento; e resulta em produtos mais leves. O projeto da junção deve permitir o acesso a eletrodos.

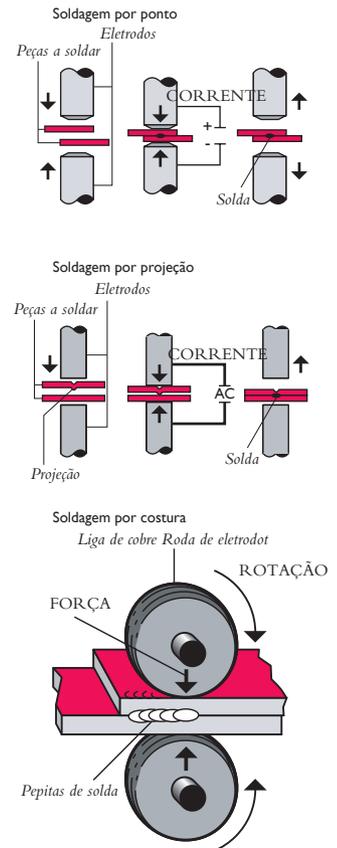
Observações técnicas A soldagem por resistência é comumente usada para aços de todos os graus, alumínio, magnésio, latão e ferro fundido. Os eletrodos são feitos de ligas de cobre de baixa resistência e são resfriados a água. As taxas típicas da soldagem por ponto são 12–180 soldas/minuto; as taxas de soldagem por projeção são maiores.

Aspectos econômicos O custo de capital do equipamento é médio; alto se automatizado. Mas o processo é rápido, confiável, se presta a automação e não requer tratamento pós-soldagem.

Produtos típicos Na realidade, os grandes usuários da soldagem por resistência são as indústrias automobilística e de eletrodomésticos. É usada em estruturas de aviões para montar portas, guarnições da fuselagem, películas externas, pisos internos, frisos e estruturas de assentos. A indústria eletrônica faz uso intensivo da soldagem por pontos miniaturizada para montar circuitos. A soldagem por costura é usada para recipientes à prova de água ou gás: tanques de combustível para veículos, dutos, tambores e latas.

O ambiente O calor e as centelhas da soldagem exigem precauções normais — escudos de proteção para o rosto, óculos de segurança — porém, fora isso, a carga ambiental é mínima.

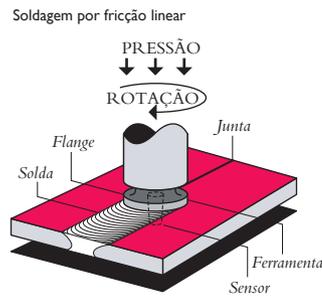
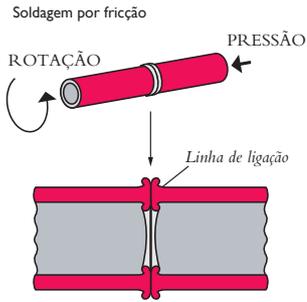
Processos concorrentes Uniões roscadas, adesivos, soldagem por feixe de energia.



Atributos da soldagem por resistência

Tamanho da junção	Sem restrições
Espessura máxima, mm	0,1–10
Espessuras desiguais?	Com limitações
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Se for solda por costura
Temp. de processamento, °C	600–2000

Soldagem por fricção



Atributos da soldagem por fricção

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm	1–100
Espessuras desiguais?	Sim
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	400–1200

O que é? Quando há fricção entre duas pessoas, certo calor pode ser gerado, mas raramente elas se unem. Materiais são diferentes: se roçarem um contra o outro, há uma boa chance de ficarem unidos. Na soldagem por fricção, um componente é girado ou submetido à vibração em alta velocidade e entra em contato forçado com o outro, gerando calor por atrito na interface, e — quando quentes — os dois se fundem. Na soldagem por fricção por acionamento direto, o motor é conectado à peça e dá partida em cada operação. Na soldagem por fricção inercial, o motor aciona um volante que não está ligado a ele para fazer a solda. Na soldagem por fricção linear (*Friction-stir Welding*), uma ferramenta rotativa não consumível é prensada contra os materiais que devem ser soldados. O pino e flange centrais compactam as duas partes que serão unidas, aquecendo e plastificando os materiais. À medida que a ferramenta se movimenta ao longo da linha de junção, o material que fica na parte frontal da ferramenta vai passando para trás, eliminando a interface. A qualidade da solda é excelente (tão boa quanto a das melhores soldas por fusão) e o processo é amigável ao ambiente.

Tipo de junção Topo.

Notas de design A soldagem por fricção oferece junções de alta qualidade para uma ampla variedade de metais — em particular, compósitos com matriz de metal podem ser unidos desse modo. Materiais diferentes também podem ser unidos: aço inoxidável e alumínio, por exemplo. Não há fusão envolvida, portanto, não são necessários fundentes ou gases de proteção. O movimento linear ou orbital permite a junção de formas não circulares.

Observações técnicas Para peças pequenas são usadas velocidades de rotação de até 80.000 rpm e uma carga de alguns quilogramas; para peças muito grandes, a rotação é reduzida até 40 rpm com milhares de quilogramas de carga de fundição. Os tempos de soldagem estão na faixa de 1–250 segundos.

Aspectos econômicos O custo de capital do equipamento é alto, mas o custo de ferramental é baixo. O processo é rápido e pode ser totalmente automatizado.

Produtos típicos A soldagem por fricção é amplamente usada para unir peças automotivas, maquinaria agrícola e para soldar de forma rápida terminações de aço a brocas. É o melhor meio para ligar peças fundidas a eixos ou barras, ou mancais de distribuição a eixos.

O ambiente A soldagem por fricção é limpa e eficiente em termos de energia.

Processos concorrentes Soldagem MMA, soldagem MIG, soldagem TIG, soldagem por ultrassom.

Soldagem por difusão e por vitrificação

O que são? Unir cerâmicas é um problema porque elas são duras e frágeis. Uniões mecânicas geralmente exigem orifícios e criam altas forças de grampeamento e concentrações de tensão. A soldagem convencional é impraticável: as temperaturas de fusão das cerâmicas são muito altas e as tensões residuais levam à fratura. Adesivos grudam em cerâmicas, mas poucos são confiáveis acima de 300°C, faixa em que as cerâmicas costumam ser usadas. Dois processos evitam essas dificuldades: a soldagem por difusão e por vitrificação. Na soldagem por difusão, as superfícies que devem ser unidas são limpas, pressionadas de modo a entrar em contato íntimo e aquecidas a vácuo ou em uma atmosfera controlada. A difusão em estado sólido cria a ligação, que é de alta qualidade, mas o processo é lento e as temperaturas são altas. A soldagem por difusão é usada para cerâmicas e também para metais — entre os metais: titânio, compósitos com matriz de metal e certas ligas de aço e cobre são candidatos particulares. A soldagem por vitrificação depende do fato de que o vidro fundido umedece e se une a praticamente qualquer coisa. Para explorar essa qualidade, as superfícies que serão unidas são primeiro revestidas com uma fina camada de lama de vidro finamente moído, cuja composição é escolhida para se fundir a uma temperatura bem abaixo da temperatura de ligação por difusão, e com máxima compatibilidade entre as duas superfícies que serão unidas. Uma pequena pressão é aplicada em toda a interface e o conjunto é aquecido, derretendo o vidro e formando uma camada de ligação fina, mas forte.

Tipo de junção Todos os tipos de uniões.

Notas de design O processo permite a junção de materiais diferentes: cerâmica com cerâmica, cerâmica com vidro, metal com cerâmica, metal com metal. A ligação por vitrificação é particularmente versátil: o ajuste da composição do vidro de modo a cumprir os requisitos de temperatura de fusão e dilatação térmica permite ligações entre metal e cerâmica.

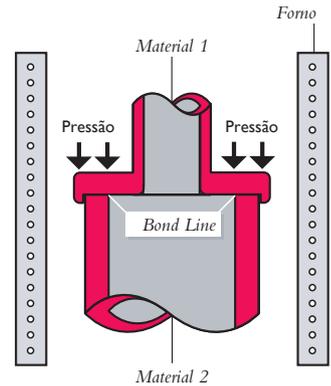
Observações técnicas Ligar materiais por difusão requer temperaturas três quartos acima de suas temperaturas de fusão e uma modesta pressão para manter as superfícies juntas. Cerâmicas se fundem a temperaturas muito altas — portanto, as temperaturas de processo são altas. A ligação por vitrificação resolve esse problema criando uma camada interfacial que se liga intimamente a ambas as superfícies, mas se funde a uma temperatura muito mais baixa.

Aspectos econômicos Esses processos demandam grande consumo de energia e são lentos. Porém, para algumas combinações de materiais, essa é a única opção.

Produtos típicos Para metais: montagem de painéis de titânio para aeronaves, e itens menores nos quais os metais que devem ser unidos são diferentes. Para cerâmicas e vidros: ligar esses materiais um ao outro e a metais.

O ambiente O impacto ambiental é baixo, exceto sob um aspecto: a demanda de energia é alta.

Processos concorrentes Para cerâmicas: uniões roscadas, adesivos. Para metais: uniões roscadas, soldagem por feixe de energia.



Atributos da soldagem por difusão e por vitrificação

Tamanho da junção	Com restrições
Espessura máxima, mm	1–100
Espessuras desiguais?	Sim
Une materiais diferentes?	Sim
Impermeável?	Sim
Temp. de processamento, °C	600–1800

Perfis de acabamento de superfície

Quase todo componente de um produto recebe algum tipo de acabamento de superfície. Processos de acabamento de superfície melhoram as qualidades térmicas, de fadiga, de atrito, de desgaste, de corrosão ou estéticas da superfície, deixando inalteradas as propriedades gerais. Do ponto de vista econômico esses processos são de grande importância, já que aumentam a vida útil dos materiais e permitem que sejam usados em condições de serviço mais rigorosas, conferindo-lhes multifuncionalidade (por exemplo, criando uma superfície resistente à corrosão sobre um substrato duro, mas quimicamente reativo, ou uma superfície isolante térmica sobre um substrato forte, mas metálico) e, é claro, criam muitas das características táteis e visuais de um produto.

A escolha de um acabamento de superfície depende do material no qual será aplicado e da função que o material deve desempenhar. Os processos usados para gravar a superfície do vidro são obviamente diferentes dos utilizados para texturizar polímeros; menos obviamente, também tintas e processos elétricos de revestimento muitas vezes são específicos em relação ao material. As páginas que vêm a seguir apresentam perfis de modos de tratar superfícies, descrevem os processos e suas funções e fornecem listas de materiais nos quais podem ser aplicados. Abrangem os processos mais comuns usados para criar qualidades visuais e táteis de produtos.

Mais informações podem ser encontradas nas fontes apresentadas sob o título *Leitura adicional*.

Leitura adicional316

Impressão

Serigrafia318

Tampografia.....319

Impressão de transferência por água.....320

Hot stamping.....321

Decoração no molde.....322

Galvanização

Metalização a vácuo.....323

Eletro galvanização.....324

Galvanização autocatalítica327

Anodização.....328

Polimento

Polimento mecânico329

Eletropolimento.....330

Polimento químico331

Revestimento

Pintura à base de solvente332

Pintura à base de água.....333

Eletropintura334

Revestimento por pintura a pó.....335

Esmaltação.....337

Outros

Gravação338

Texturização339

Leitura adicional

Há uma confusa diversidade de processos para tratamento de superfícies. Alguns (como a pintura) são aplicáveis a muitos materiais; outros (como a galvanização autocatalítica) são limitados a um só, ou a apenas alguns. A seleção não é fácil, em particular porque no momento não há uma única fonte de informação que permita a comparação de toda a gama de processos. As principais contribuições à seleção sistemática de processos de acabamento de superfícies derivam de fontes que, de modo geral, focalizam somente uma classe de processo ou uma classe de material: pintura, por exemplo, (Roodol, 1997); tecnologia de revestimento (Gabe, 1983; Rickerby e Matthews, 1991; Granger e Blunt, 1998); de tratamento a quente (Morton, 1991; Sudarshan, 1989); de corrosão (Strafford et al., 1984; Gabe, 1983); ou de eletrodeposição (Canning, 1978). Um número menor tenta uma resenha mais abrangente (ASM, 1982; Poeton, 1999; CES, 2002), mas estão longe de conseguir. Algumas das fontes que achamos úteis são apresentadas a seguir. Uma quantidade muito maior de informações pode ser encontrada na internet, embora o conteúdo e a qualidade sejam diferentes. Fizemos uso intensivo da internet, das informações fornecidas por empresas e dos livros que citamos a seguir para compilar os perfis apresentados.

ASM *ASM Metals Handbook, v. 5: Surface Cleaning, Finishing, and Coating*. 9ª ed. American Society for Metals. Cincinnati: Materials Park, 1982. (O volume desse prestigioso conjunto de manuais dedicado à engenharia de superfícies).

Bralla, J. G. *Handbook of Product Design for Manufacturing*. 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998. (A “bíblia” — uma compilação maciça de dados sobre processos de manufatura, de autoria de especialistas de diferentes áreas e editada por Bralla.)

Canning, W. *The Canning Handbook on Electroplating*. Birmingham: W. Canning, 1978.

CES 4 *The Cambridge Engineering Selector, versão 4*. Cambridge: Granta Design, 2002; www.grantadesign.com.

Gabe, D. R. *Coatings for Protection*. Londres: The Institution of Production Engineering, 1983.

Grainger, S. e Blunt, J. *Engineering Coatings, Design and Application*. 2ª ed. Londres: Abington, 1998. (Uma monografia dirigida a engenheiros técnicos que detalha processos para melhorar a resistência das superfícies ao desgaste e à corrosão.)

Morton, P. H. *Surface Engineering and Heat Treatment*. Londres: The Institute of Metals, 1991.

Poeton *The Poeton Guide to Surface Engineering*, 1999; www.poeton.co.uk/pands/sface/.

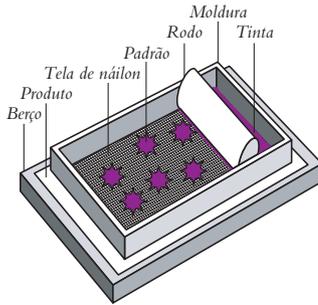
Rickerby, D. S. e Matthews, A. *Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering*. Nova York: Chapman and Hall, 1991.

Roobol, N. R. *Industrial Painting, Principles and Practice*. Cincinnati: Hanser Gardner, 1997. (Um guia abrangente para pintura e revestimento em resina.)

Strafford, K. N., Dalta P. K. e Googan, C. G. *Coatings and Surface Treatment for Corrosion and Wear Resistance*. Nova York: Ellis Horwood, 1984.

Sudarshan, T. S. *Surface Modification Technologies*. Nova York: Marcel Dekker, 1989.

Serigrafia



Atributos da serigrafia

Dureza da superfície, Vickers	5–10
Espessura do revestimento, μm	10–100
Cobertura de superfícies curvas	Ruim
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	15–25

O que é? Basta andar por qualquer rua e veremos exemplos de serigrafia (também conhecido comercialmente como *silk screen*): displays e cartazes anunciando produtos em lojas; anúncios nas laterais de ônibus; placas de identificação e painéis de controle em computadores e equipamentos de som; sacolas esportivas e camisetas; e até mesmo as criações de Pop Art de Andy Warhol. A serigrafia tem suas origens na prática japonesa do estêncil, mas o processo que conhecemos hoje vem das patentes registradas por Samuel Simon de Manchester na virada do século XX. Ele usou seda esticada e fixada a molduras para dar suporte a estênceis pintados a mão, um processo também usado por William Morris para criar seus famosos papéis de parede e estamparias têxteis. Durante a Primeira Guerra Mundial nos Estados Unidos, a serigrafia se firmou como um processo de impressão industrial; mas foi a invenção da fotogravura na década de 1930 que revolucionou o processo. Atualmente é um setor industrial de \$5 bilhões por ano.

Funções Cor, refletividade, textura.

Notas de design O processo pode ser aplicado a polímeros, vidro, metais, madeira, têxteis e, é claro, papel e papelão. Objetos planos e cilíndricos podem ser impressos. Várias cores também podem ser impressas, mas cada uma exige uma matriz separada.

Observações técnicas A matriz é composta de uma moldura de madeira ou alumínio na qual é esticada e fixada uma tela fina de seda ou náilon. A tela é revestida com uma emulsão ou película sensível à luz que — quando seca — bloqueia os orifícios da tela. A emulsão é exposta à imagem ou padrão a ser impresso com a utilização de luz ultravioleta que a endurece onde não há presença de grafismo. A tela é lavada para remover a emulsão onde ela não está endurecida, o que deixa um estêncil aberto da imagem que estava ali. A tela é ajustada na prensa, o produto a ser impresso é colocado sob a tela, e a parte superior da tela é inundada com tinta. Uma lâmina de borracha fixada a um cabo de madeira ou metal, denominada rodo ou puxador (não muito diferente de um limpador de para-brisa gigante) é passada pela parte superior da tela; esse instrumento força a tinta a atravessar a tela e chegar à superfície do produto. Para repetir o processo, o rodo inunda a tela novamente fazendo o mesmo movimento para trás, antes da próxima impressão. Tintas de epóxi dão proteção contra arranhões e podem ser usadas com produtos que atacam as tintas esmalte padrão.

Aspectos econômicos O custo de capital do equipamento é baixo. O processo é econômico para pequenos lotes e impressão com uma só cor. Cada cor adicional aumenta o custo porque é aplicada separadamente e requer registro.

Produtos típicos Cartazes, adesivos, bilhetes, identificadores de prateleiras, *banners*, painéis expositores, pastas para arquivar documentos, almofadas para mouses de computadores, placas de localização, identificação e sinalização, camisetas, painéis de controle e placas de identificação para computadores.

O ambiente Os produtos químicos, em particular os fluidos de limpeza, podem ser voláteis e tóxicos e exigem boa ventilação e proteção para o operador.

Processos concorrentes Tintas à base de solvente e água, tampografia; impressão de transferência por água.

Tampografia

O que é? A tampografia é semelhante ao sistema de impressão flexográfico, que utiliza uma matriz relevográfica de borracha ou fotopolímero. Na tampografia, a imagem é gravada em uma placa de aço, cobre ou náilon (clichê), da qual a tinta é transferida para uma almofada de silicone, chamada tampão. É usada como processo de decoração para formas irregulares e para as que não podem ser facilmente impressas por serigrafia. As etapas são as seguintes: (1) A imagem a ser transferida é gravada no clichê, em baixo relevo. O clichê é entintado, o excesso é retirado deixando tinta somente na área da imagem. À medida que os solventes se evaporam da área da imagem, aumenta a capacidade de adesão da tinta ao tampão. (2) O tampão é comprimido contra o clichê para transferir a tinta. Solventes evaporam da camada externa de tinta, onde esta é exposta à atmosfera, o que a torna mais aderente e mais viscosa. (3) O tampão é comprimido contra a superfície a ser decorada, ajusta-se ao formato dela e deposita a tinta. Se bem que a compressão seja considerável durante essa etapa, o tampão é projetado para rolar pela superfície do substrato sem borrar a imagem durante o deslizamento. (4) Quando o tampão é comprimido contra o produto, a adesão entre a tinta e o substrato é maior do que a adesão entre a tinta e a almofada, resultando na completa transferência da tinta e deixando o tampão limpo e pronto para o próximo ciclo (5). Métodos automáticos com vários tampões em série permitem decoração multicolorida barata. Máquinas manuais são usadas para pequenos volumes de produção; nesse caso, decorações multicoloridas exigem etapas separadas e tempo de preparação.

Funções Cor, refletividade, textura.

Notas de design As vantagens da tampografia são a capacidade de imprimir sobre superfícies irregulares (como uma bola de golfe) e imprimir sobre cores ainda úmidas. A excelente qualidade de detalhes torna a tampografia também atraente para objetos planos. Está limitada a imagens relativamente pequenas em comparação com a serigrafia — normalmente menos de 0,1 m². Para grandes áreas a serem impressas são necessários clichês especiais de náilon.

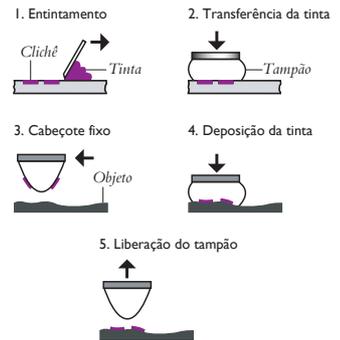
Observações técnicas Produtos de polímeros, vidro e metal podem ser impressos. Formas tridimensionais irregulares são possíveis. As tintas são resinas pigmentadas em suspensões de solventes orgânicos.

Aspectos econômicos Os custos de capital e ferramental são baixos. O processo é rápido e o produto pode ser manuseado imediatamente após a impressão.

Produtos típicos Copos, canetas, molduras de vidro, isqueiros, bolas de golfe.

O ambiente Solventes podem exalar vapores tóxicos, portanto, exige-se ventilação.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente e de água; serigrafia; impressão de transferência por água.

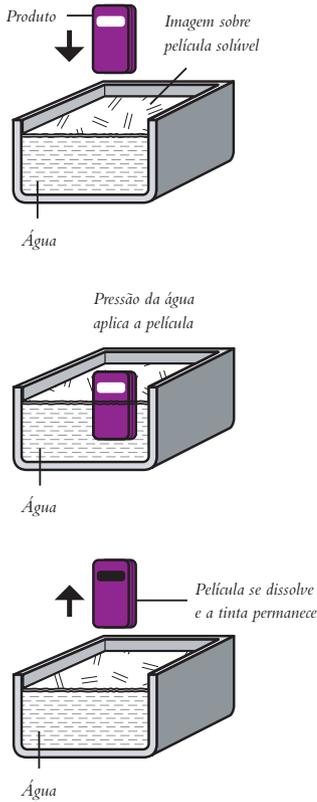


Atributos da tampografia

Dureza da superfície, Vickers	5–10
Espessura do revestimento, µm	6–10
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	15–30



Impressão de transferência por água



Atributos da impressão de transferência por água

Dureza da superfície, Vickers	5–10
Espessura do revestimento, µm	6–10
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	15–30

O que é? Qualquer criança sabe o que é um *transfer* — um modo fácil de aplicar imagens em papel, em produtos e até nelas mesmas. A imagem é impressa sobre uma fina película solúvel em água; quando colocada na água a película se dissolve, a imagem flutua livremente e pode ser transferida ao produto no qual adere. Impressão de transferência por água (*cubic printing*, em inglês), usa o mesmo princípio, em escala maior e comercialmente viável. A película e sua imagem flutuam sobre a superfície de um tanque de água. O produto é imerso no tanque, onde a pressão da água comprime a imagem sobre a superfície do componente.

Funções Cor, refletividade, textura.

Notas de design Impressão de transferência por água é muito versátil; formas curvas, complexas, podem ser impressas e a imagem pode ser multicolorida. O registro é difícil, portanto, a imagem costuma ser aplicada em uma única operação, e projetada para que não seja necessário um registro preciso.

Observações técnicas O padrão ou desenho é impresso sobre uma película solúvel em água. A película, especialmente tratada para ativar as tintas, flutua sobre a água, onde se dissolve e deixa as tintas da decoração sobre a superfície da água. O componente a ser decorado é empurrado para dentro da água para efetuar a transferência. A tinta flui sobre a superfície do objeto e o decora em três dimensões. Uma camada de proteção transparente é aplicada para proteger a superfície decorada. Produtos de polímero, cerâmica, vidro, metal e madeira podem ser impressos. A impressão sobre formas tridimensionais irregulares é possível.

Aspectos econômicos Os custos de capital e ferramental são baixos. O componente deve ser secado e recebe uma camada de acabamento, o que torna o processo relativamente lento.

Produtos típicos Automotivos: painéis de instrumentos, consoles, volantes, topos das alavancas de embreagem, redutores de velocidade, para-choques, viseiras. Equipamentos esportivos: raquete de tênis, molinetes, coronhas de armas de fogo, capacetes, tacos de golfe, óculos de sol, bicicletas. Produtos de computação: painel do monitor, teclados, mouses, notebooks, câmeras digitais, impressoras. Eletrodomésticos: aparelhos de TV, refrigeradores, máquinas de lavar e secar, cafeteiras, fornos de micro-ondas, equipamentos de som. Produtos de cozinha: vasilhas, baixelas de prata, hastes de taças, tigelas, jarras, saleiros e pimenteiros. Móveis: mesinhas auxiliares, mesas de café, maçanetas, molduras de quadros, porta-guardanapos, relógios.

O ambiente Impressão de transferência por água não apresenta nenhum problema ambiental significativo.

Processos concorrentes Pintura à base de água e solvente; serigrafia; tampografia.

Hot stamping

O que é? Na próxima vez que você vir um livro com letras douradas impressas na capa, pense em *hot stamping* (estampagem a quente, em português). É um processo a seco para aplicação permanente de um desenho, logo, texto ou imagem coloridos. É mais conhecido como um método de aplicação de texto ou decorações metálicas douradas ou prateadas. Uma matriz de metal aquecida (250–300°C) é comprimida contra uma folha de suporte colorida e o componente que está sendo impresso. A estampa, por esse processo, é criada quando a superfície em alto relevo da matriz entra em contato com a folha e transfere a película colorida que está na face da folha para o produto que está sendo impresso. A pressão da matriz cria um rebaixo que protege a imagem estampada contra abrasão, e o calor provoca a adesão do grafismo ao produto.

Funções Cor, refletividade, textura.

Notas de design Textos podem ser estampados a quente em áreas planas ou em relevo. No caso de superfícies irregulares, uma placa de silicone é usada para transmitir calor e pressão à folha. Há vários acabamentos decorativos disponíveis, incluindo folhas metálicas, acabamentos de veios de madeira e desenhos multicoloridos. O processo pode ser aplicado a polímeros, madeira, couro, papel, vinil, Mylar® e têxteis como poliéster e acetatos, e — com menor facilidade — a metal pintado. A decoração é permanente e resiste a descascamento, arranhões e abrasão.

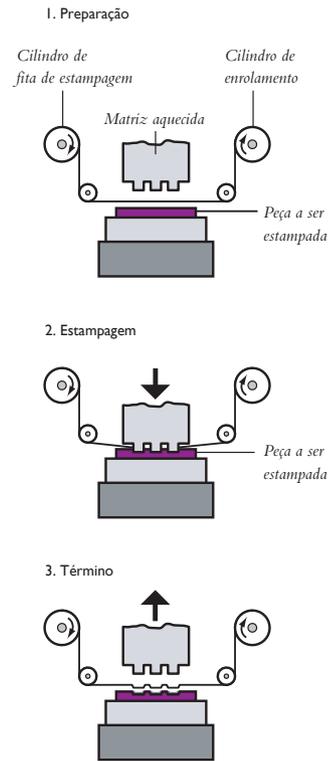
Observações técnicas Matrizes para *hot stamping* são feitas de magnésio, latão ou aço. Matrizes baratas obtidas por fotogravura funcionam bem para protótipos ou pequenos lotes de produção em áreas planas; matrizes para grandes lotes de produção são gravadas em latão ou aço. As folhas são feitas em quatro camadas: uma fina película de suporte, em geral poliéster, uma camada de liberação, uma camada decorativa — de pigmento ou metal — e um adesivo específico para o material do substrato.

Aspectos econômicos O custo do equipamento é baixo. O *hot stamping* com folha de polímero ou de alumínio é barato; com folha de ouro pode ser caro. As peças podem ser manuseadas e embaladas imediatamente. O tempo de preparação mínimo permite que os usuários mudem desenhos e cores conforme necessário pela simples troca de um cilindro seco ou kits de transferências.

Produtos típicos Embalagens de cosméticos e de varejo em geral, capas de livros, acabamentos automotivos, impressão comercial, bens de consumo, carcaças de computadores e fitas cassete.

O ambiente Não é necessária nenhuma mistura de tintas ou limpeza que envolva solventes orgânicos voláteis (VOCs). A matriz é quente, porém, fora isso, o processo é isento de poluentes.

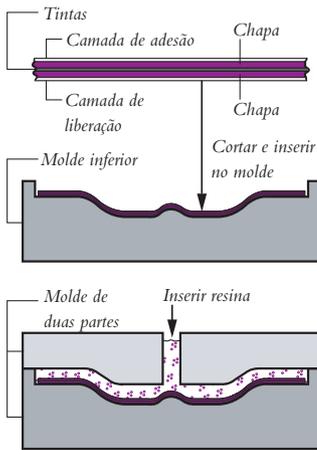
Processos concorrentes Pintura à base de solvente e água; tampografia; impressão de transferência por água.



Atributos do hot stamping

Dureza da superfície, Vickers	5–50
Espessura do revestimento, μm	1–50
Cobertura de superfícies curvas	Ruim
Temp. de processamento, °C	150–300

Decoração no molde



Atributos da decoração no molde

Dureza da superfície, Vickers	5–15
Espessura do revestimento, µm	10–500
Cobertura de superfícies curvas	Média a boa
Temp. de processamento, °C	125–200

O que é? A decoração no molde (*In-Mold Decoration* — IMD) permite que cores, gravuras e desenhos acuradamente registrados sejam aplicados a componentes moldados por injeção sem qualquer processamento secundário. A imagem, que pode ser multicolorida, é impressa sobre um filme de poliéster ou policarbonato, chamada folha ou chapa. Se o produto é plano ou levemente curvado, a chapa é alimentada como uma tira contínua, ou cortada e colocada diretamente no molde.

Para a produção de peças verdadeiramente tridimensionais, em primeiro lugar a chapa é moldada a quente segundo a forma da peça e então colocada na cavidade do molde. Resina líquida quente é injetada por trás da folha, ligando sua superfície à resina de moldagem e formando uma peça inteiramente decorada.

Funções Cor, textura, padronização, impressão; resistência à abrasão.

Notas de design A figura mostra a montagem de uma chapa mais complexa. As camadas decorativas são aplicadas à folha em ordem inversa: a camada de liberação diretamente sobre a folha, em seguida as várias camadas coloridas, e, por fim, a camada adesiva. Como os elementos gráficos são impressos na segunda superfície, o desenho é mantido entre duas finas camadas de polímero que o protegem contra desgaste e ruptura. Para mudar a decoração basta simplesmente trocar a chapa, sem mudar o molde tampouco o material.

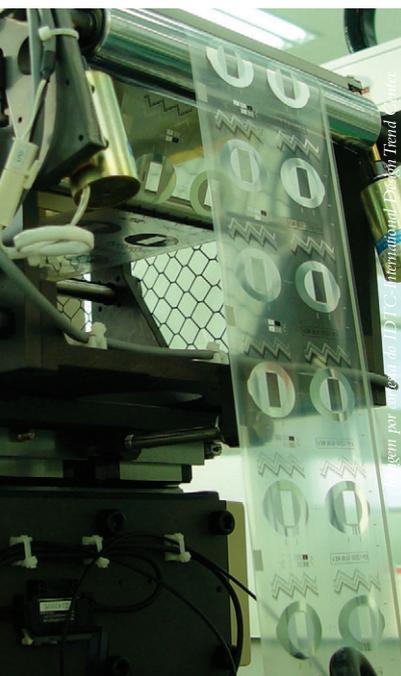
Observações técnicas No processo IMD contínuo, folhas de estampagem a quente modificadas passam por um rolete e entram no molde de injeção. Durante a injeção, a pressão e a temperatura do polímero fundido liberam a película de suporte, ligam-na à peça moldada e a comprimem para dentro da cavidade do molde, e, assim, moldam a película bidimensional segundo uma geometria tridimensional; contudo, às vezes o padrão pode ficar distorcido. No processo discreto, a folha é cortada e inserida no molde. Formas complexas exigem que a folha seja primeiro moldada termicamente até a forma aproximada da cavidade do molde antes da inserção. A maioria dos termoplásticos — incluindo o policarbonato, mas não o polietileno — pode ser decorada por IMD sem problemas.

Aspectos econômicos O IMD é simples e rápido e reduz o número de etapas no processo de fabricação, permitindo decoração de baixo custo de peças moldadas que antes exigiam um processo separado e caro de *hot stamping*, e oferece uma gama mais ampla de elementos gráficos e cores.

O ambiente O IMD está de acordo com os padrões ambientais restritivos da indústria automotiva. Polímeros reciclados podem ser usados, desde que não tenham nenhuma contaminação importante. A resina do molde e a película podem ser do mesmo tipo de material, o que aumenta o teor de reciclagem.

Produtos típicos Tampas frontal e posterior de telefones celulares, teclados, lentes, terminais de computadores, controles de aquecimento de automóveis, painéis de instrumentos, comandos articulados, cartões de crédito.

Processos concorrentes *Hot stamping*, serigrafia; impressão de transferência por água; tampografia.



Metalização a vácuo

O que é? Os espelhos eram fabricados por um processo complexo que envolvia prata dissolvida em mercúrio. Hoje, são feitos por metalização PVD (*Physical Vapor Deposition*), um processo pelo qual uma fina camada de metal — usualmente alumínio — é depositada por vapor sobre um componente. O vapor ou névoa é criado em uma câmara de vácuo por aquecimento direto ou por feixe de elétrons do metal e se condensa sobre a peça fria, de modo muito parecido com a condensação do vapor de um banho quente sobre o espelho de um banheiro. Na metalização PVD não há nenhuma diferença de potencial entre a fonte do vapor e a peça. Na galvanização iônica, o vapor é ionizado e acelerado por um campo elétrico (a peça é o catodo e a fonte de material de metalização é o anodo). Na pulverização catódica, íons de argônio são acelerados pelo campo elétrico e atingem um alvo de metal que, por sua vez, ejeta íons do metal sobre a superfície da peça. Com a introdução de um gás reativo, pode-se formar compostos (Ti pulverizado em uma atmosfera de N_2 para dar um revestimento duro de TiN, por exemplo).

Funções Cor, refletividade, textura; dureza, desgaste; condutividade elétrica; proteção contra corrosão aquosa e por solventes orgânicos.

Notas de design A metalização a vácuo é amplamente usada para dar um acabamento metálico refletivo sobre peças inteiriças e películas de polímeros, metal, vidro e cerâmica.

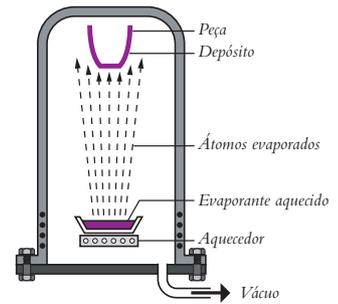
Observações técnicas Superfícies limpas são essenciais. Alumínio, cobre, níquel, zircônio e outros metais podem ser depositados.

Aspectos econômicos Alto custo de capital, porém baixo custo de ferramental. Em se tratando de estética, a metalização PVD é preferida à eletro galvanização para polímeros e cerâmicas em razão de sua velocidade, qualidade e ausência de produtos químicos desagradáveis.

Produtos típicos Guarnições de automóveis, eletrodomésticos e utensílios de cozinha, ferragens de portas e janelas, acessórios para banheiros, placas de circuito impresso.

O ambiente Alto volume de produção, boa qualidade e limpeza — em particular a ausência de produtos químicos desagradáveis — tornam esse processo atraente do ponto de vista ambiental.

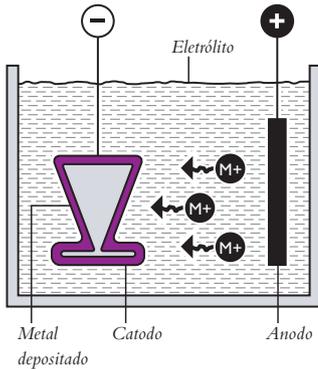
Processos concorrentes Eletro galvanização; galvanização autocatalítica.



Atributos da metalização a vácuo

Dureza da superfície, Vickers	10–40
Espessura do revestimento, μm	1–80
Cobertura de superfícies curvas	Média a boa
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	18–120

Eletro galvanização



Atributos da eletro galvanização

Dureza da superfície, Vickers	Depende do material de revestimento
Espessura do revestimento, μm	1–1000
Cobertura de superfícies curvas	Depende do banho
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	5–80

O que é? Quando, em 1800, Alessandro Volta descobriu como fazer uma bateria elétrica, deu a partida para o desenvolvimento da eletroquímica. Em 1806, Humphrey Davy, prolífico inventor, tinha desenvolvido modos de galvanizar partindo de sais e soluções — a eletro galvanização. A peça (catodo) e a fonte de material metalizador (anodo) são submersos no eletrólito aquoso no qual uma corrente elétrica contínua impulsiona íons de metal da fonte para a peça, criando um fino revestimento de metal.

Funções Cor, textura, refletividade; resistência à corrosão e ao desgaste; proporciona condutividade elétrica e bom contato elétrico.

Notas de design A galvanização para finalidades estéticas tem sua origem na galvanização de prata e ouro de louças e talheres (*Sheffield Plate*), e na galvanização de cromo e níquel para obter superfícies brilhantes e duráveis. Atualmente, a maioria dos polímeros pode ser galvanizada, mas é preciso tomar cuidado para evitar que o revestimento se rompa ou descasque quando em uso. A capacidade de galvanizar formas complexas depende do que é denominado “cobertura de superfície” do banho de galvanização. Alguns polímeros têm uma cobertura de superfície muito ruim, o que significa que somente superfícies planas ou ligeiramente curvas podem ser galvanizadas; outros — muitas vezes auxiliados por misteriosos aditivos patenteados acrescentados ao banho de galvanização — podem galvanizar formas complexas, mesmo que tenham reentrâncias.

Observações técnicas Praticamente qualquer metal pode ser eletro galvanizado. Polímeros (ABS, PET, ABS/polycarbonato, óxido de polifenileno, polissulfona, polipropileno, náilon, poliéster, poliacetal, poliestireno, polycarbonato, epóxi/vidro) e outros materiais que não conduzem eletricidade têm de ser revestidos antes com um material condutor de eletricidade. A limpeza e a preparação da superfície são essenciais. A faixa usual de espessura do revestimento é de 1 a 50 μm , embora espessuras de até 1mm sejam rotineiras. Em geral, revestimentos mais espessos podem ser produzidos por outros processos mais baratos e mais convenientes: spray térmico, imersão a quente ou recobrimento. A temperatura de processamento fica na faixa de 5–80 $^{\circ}\text{C}$. A capacidade de revestimento — facilidade com a qual a eletro galvanização pode ser aplicada — aumenta nessa ordem: alumínio, aço doce, latão, cobre. Muitos processos de eletro galvanização resultam em tensões internas que podem ser reduzidas por tratamento a quente.

Aspectos econômicos O custo do equipamento para eletro galvanização é relativamente alto, mas o custo do ferramental é baixo. Aplicações de depósitos finos, em particular sobre pequenas peças ou áreas, pode tornar o processamento de grandes lotes com essa técnica muito competitivo.

Produtos típicos Podemos ter uma ideia da imensa faixa de aplicações da eletro galvanização, técnica e estética, percorrendo a lista de materiais que completa este perfil.

O ambiente Muitos banhos de eletro galvanização podem causar danos ambientais e riscos para a saúde. Alguns contêm produtos químicos desagradáveis — os que têm cianogênicos são absolutamente detestáveis. A proteção contra poluentes químicos e vapores tóxicos requer precauções especiais, assim como o descarte do fluido de galvanização. O cádmio é tóxico, e atualmente



Imagem por cortesia do IFETC - Instituto Federal de São Carlos

está banido da lista de materiais de galvanização em muitos países da Europa. Alternativas para a galvanização com cromo, um dos processos mais agressivos, foram procuradas, mas até agora nenhuma foi encontrada. O níquel pode causar alergias e deve ser mantido longe do contato com a pele. Todavia, essas notícias tão desanimadoras não são universais: a eletro galvanização é amplamente usada para revestimento com cobre, ouro, prata, estanho e zinco.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente e água; polimento mecânico; polimento elétrico; galvanização autocatalítica, anodização, metalização a vácuo.

Alumínio

A eletro galvanização com alumínio pode substituir a galvanização por imersão em alumínio líquido a quente, mas não é muito usada.

Latão

Luminárias e bandejas de latão, guarnições de baixo custo, ferragens internas de automóveis, móveis tubulares, utensílios domésticos, brinquedos, ferragens para urnas funerárias, bugigangas, adesão entre borracha e aço.

Bronze

Bijuteria de bronze, placas de portas, ferragens, troféus, armações de bolsas, subcamada para níquel e cromo, estruturas de apoio, talheres, artefatos domésticos.

Cobalto

Peças eletro galvanizadas de ligas de cobalto, espelhos, refletores, aplicações onde é exigida alta dureza.

Co-Ni

Gravação magnética Co-Ni, revestimento magnético permanente em tambores de memória para computadores digitais, eletroconformação.

Cobre

Subcamada de cobre (melhor adesão, prevenção da fragilização por hidrogênio), isolamento de fios elétricos, camadas de interrupção durante tratamento a quente e fresagem química, lubrificante durante estiramento, revestimentos condutores em utensílios de cozinha, eletroconformação.

Ouro

Pontas de penas de ouro para canetas, joalheria, relógios e embalagens de cosméticos, instrumentos musicais, refletores, placas de identificação, armações de óculos, braceletes, troféus, folheados, contatos elétricos, molas, peças eletrônicas, equipamento de laboratório.

Níquel

Base de níquel para peças finas cromadas, guarnições para automóveis, eletrodomésticos, máquinas comerciais e bens de consumo, eletroconformação, reconstituição de peças desgastadas ou mal usinadas.

Ródio

Acabamento resistente para bijuterias, insígnias, emblemas, instrumentos musicais, instrumentos médicos e cirúrgicos, equipamento de laboratório, equipamento ótico, contatos elétricos, refletores e espelhos.

Prata

Talheres de prata, candelabros, isqueiros e instrumentos musicais, mancais, instrumentos cirúrgicos, equipamento químico, contatos elétricos.

Estanho

Recipientes de estanho para alimentos e bebidas, evaporadores de refrigeradores, equipamentos para processamento de alimentos e laticínios, ferragens, peças para eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos, arame de cobre, mancais.

Estanho-níquel

Utensílios de cozinha de estanho-níquel, pesos analíticos, instrumentos cirúrgicos, peças de relógio, bombas para produtos químicos, válvulas e dispositivos de controle de fluxo, resistência à corrosão marinha.

Estanho-zinco

Peças de rádio e televisão de estanho-zinco, cabos de conexão, conjuntos de relés, proteção galvânica de peças de aço que entram em contato com alumínio.

Zinco

Eletrodomésticos e peças automotivas de zinco, acabamento de peças pequenas (acoplamentos hidráulicos, parafusos, porcas, rebites, arruelas, pregos, dobradiças, cabides, ganchos), conduítes elétricos, silos, tirantes, peneiras, equipamentos para comutação telefônica.

Galvanização autocatalítica

O que é? Galvanização autocatalítica é a eletrogalvanização sem eletricidade. Depende de uma diferença naquilo que é denominado potencial elétrico quando um metal é imerso em uma solução que contém íons de um outro metal. Os íons do metal na solução são depositados sobre a superfície da peça pela ação de um agente químico redutor presente em uma solução metálica salina. No caso da galvanização autocatalítica do níquel (a aplicação comercial mais significativa do processo) o sal é o cloreto de níquel e o agente redutor é o hipofosfato de sódio. Uma vez iniciada, a reação pode continuar e não há limite teórico para a espessura do revestimento. A galvanização autocatalítica é usada quando é impossível ou impraticável usar a eletrogalvanização normal — quando se trata de revestir superfícies internas complexas, ou quando a precisão dimensional da peça é crítica, por exemplo.

Funções Dureza da superfície e resistência ao desgaste; proteção contra a corrosão; condutividade elétrica; permeabilidade magnética; estética.

Notas de design A maioria dos metais e polímeros pode ser revestida. Normalmente a camada de revestimento é aplicada a não metálicos como base condutora para eletrogalvanização subsequente. A uniformidade da camada de revestimento é boa, mesmo em peças de formas muito complexas.

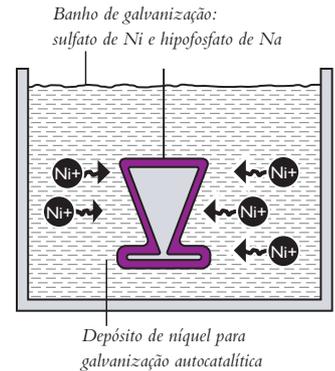
Observações técnicas As principais galvanizações autoeletrolíticas em uso corrente são de níquel (Ni, NiP, NiB, e revestimentos de compostos de níquel contendo SiC ou PTFE) e cobre. Ligas ferromagnéticas Co-P, Ni-Co-P, Ni-Fe-P podem ser galvanizadas sobre fitas e discos magnéticos. Etapas especiais de processamento são necessárias para polímeros, porque esses materiais não são condutores e não catalisam a redução química do níquel; nesse caso, a adesão resulta somente da ligação mecânica da camada de revestimento à superfície do substrato. Para melhorar isso, normalmente os polímeros são cauterizados em soluções ácidas ou solventes orgânicos para aumentar a aspereza de suas superfícies e proporcionar mais zonas de ligação.

Aspectos econômicos A galvanização autocatalítica é mais cara do que a eletrogalvanização: aproximadamente 50% mais para a galvanização com níquel. As taxas de deposição são muito mais lentas e os custos dos componentes químicos são mais altos; todavia, custos de equipamentos e energia são menores. Apesar dessas diferenças de custos, a escolha entre os dois processos é determinada mais por fatores físicos do que econômicos ou quantidades de produção.

Produtos típicos Escoadouras de calor, mancais radiais, cabeçotes de pistões, componentes de trens de aterrissagem, linguetas de teares, guias de ondas de radar, mecanismo de acionamento de computadores, tambores e discos de memória de computadores, chassis, conexões, pás de rotores, anéis de estatores, pás de compressores e propulsores, motores de motosserras.

O ambiente É preciso enfrentar os problemas usuais do descarte de resíduos químicos, porém, fora isso, o processo não é tóxico.

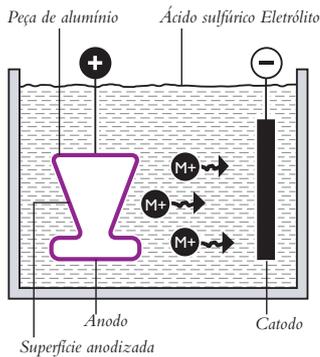
Processos concorrentes Eletrogalvanização, metalização a vácuo.



Atributos da galvanização autocatalítica

Dureza da superfície, Vickers	600–1100
Espessura do revestimento, μm	20–120
Cobertura de superfícies curvas	Muito boa
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	20–50

Anodização



Atributos da anodização

Dureza da superfície, Vickers	600–1000
Espessura do revestimento, μm	1–500
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	0–40

O que é? O alumínio é um metal reativo, porém, em objetos de uso diário não sofre corrosão nem descoloração. Isso porque uma fina película de óxido — Al_2O_3 — forma-se espontaneamente sobre sua superfície, e essa película, embora invisível, é altamente protetora. A espessura da película pode ser aumentada e sua estrutura controlada por anodização. O processo é eletrolítico; normalmente o eletrólito é ácido sulfúrico diluído (15%). O objeto a ser anodizado é o anodo (+) do banho, com uma diferença de potencial de alguns volts entre ele e o catodo inerte. Isso estabelece um enorme gradiente de potencial na película de óxido, o que faz aumentar sua espessura. A película mais espessa dá maior proteção, e pode ser colorida ou padronizada.

Funções Cor, refletividade; proteção contra corrosão e desgaste.

Notas de design A anodização é, na maioria das vezes, aplicada a alumínio, mas magnésio, titânio, zircônio e zinco podem ser tratados desse modo. O óxido formado por anodização é duro, resistente à abrasão e resiste bem à corrosão. O óxido é microporoso, o que permite a absorção de corantes, resultando em uma refletividade metálica com um atraente lustro metálico e colorido; permite repetibilidade de padrão.

Observações técnicas Há três tipos principais de eletrólitos: banhos de “fraca dissolução” são baseados em ácido bórico; formam uma camada de óxido fina (0,1 a 1 μm) e não porosa. Banhos de “média dissolução” são baseados em uma solução de 3–10% de ácido crômico, 20% de ácido sulfúrico e 5% de ácido oxálico. Produzem uma camada dupla de óxido: uma fina camada inicial de barreira não porosa e uma camada porosa sobreposta a ela. Banhos de “forte dissolução” contêm eletrólitos baseados em ácido fosfórico. A capacidade de aceitação de corantes da película depende da composição da liga: alumínio puro e ligas de Al-5Mg também são bem adequados.

Aspectos econômicos O custo do equipamento é moderadamente alto, mas é baixo o custo de ferramental. Tratamentos alternativos são a cromação e a fosfatação: os custos em ordem crescente são: anodização > cromação > fosfatação.

Produtos típicos A anodização é usada rotineiramente para proteger e colorir alumínio; películas anódicas de barreira em camadas de alumínio, titânio ou tântalo são a base dos componentes de resistores e capacitores de película fina para a indústria eletrônica; a película anódica é explorada na indústria da impressão para chapas de impressão fotolitográficas.

O ambiente Os produtos químicos envolvidos na anodização são agressivos, mas manipuláveis. O descarte dos fluidos de anodização usados requer um circuito de reciclagem.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente e água; eletrogalvanização; galvanização autocatalítica; metalização a vácuo; polimento químico; eletropolimento.



Polimento mecânico

O que é? “Dar um brilho” é uma metáfora para trabalho duro, metáfora relevante aqui. O polimento mecânico é lento e caro, e só deve ser usado quando absolutamente necessário. Há outras variantes, entre elas abrasão e afiação. Todas usam um abrasivo fino, suspenso em cera, óleo ou algum outro fluido, que é esfregado contra a superfície a ser polida por um disco ou correia de polimento ou por uma matriz conformada.

Funções Cor, refletividade, textura; resistência ao desgaste; redução do atrito; melhor resistência à fadiga.

Notas de design Praticamente qualquer metal ou cerâmica pode ser polido com ferramentas e técnicas adequadas. Normalmente o polimento é aplicado sobre superfícies cônicas, cilíndricas, planas ou esféricas, mas superfícies parabólicas de grandes espelhos também podem ser polidas. Há outros modos de polimento — eletropolimento, polimento químico — que dão uma superfície altamente refletiva, porém, se a precisão for essencial, como ocorre em sistemas óticos de precisão ou em peças de máquinas de precisão, então o polimento mecânico é a única opção.

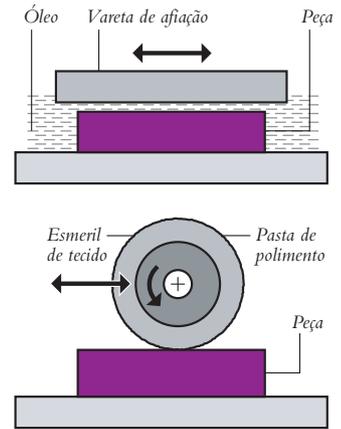
Observações técnicas O polimento usa rodas ou correias giratórias e abrasivos com ou sem lubrificantes. A quantidade de material removida é menor do que com esmeril e produz uma superfície mais macia. O polimento pode ser dividido em quatro etapas: preparar a superfície aumentando a aspereza do material; engraxar; polir; lusturar com camurça. Da fase da preparação da superfície até a fase da camurça, são usados abrasivos cada vez mais finos e mais macios, e a pressão é reduzida. O composto de polimento pode estar na forma de uma barra sólida ou de um líquido. Enquanto compostos sólidos são usados em operações manuais, os líquidos são melhores quando usados em máquinas automáticas: o tempo de produção diminui, já que não se consome tempo para trocar as barras ou varetas.

Aspectos econômicos O custo do equipamento e do ferramental para polimento manual é baixo (custo de capital de \$100 a \$1.000; custo do ferramental de \$10 a \$200) mas a taxa de produção é baixa. Os custos de equipamentos de polimento automático são maiores (custo de capital de \$20.000 a \$1.000.000, ferramental \$1.000 a \$10.000), mas a taxa de produção é mais alta. O polimento mecânico é caro; deve-se evitar superespecificação.

Produtos típicos Pistões, pinos, engrenagens, eixos, rebites, válvulas e acessórios hidráulicos, lentes e espelhos para equipamentos óticos de precisão (esmerilhados e polidos até precisão melhor do que $0,1 \mu\text{m}$).

O ambiente Os riscos dependem da operação específica, da peça, do revestimento superficial e do tipo de sistema abrasivo usado.

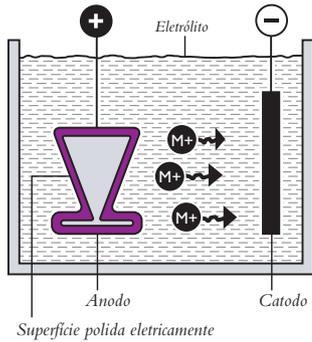
Processos concorrentes Eletropolimento; polimento químico.



Atributos do polimento mecânico

Dureza da superfície, Vickers	A mesma do substrato
Espessura do revestimento	Não é relevante
Cobertura de superfícies curvas	Ruim
Temp. de processamento, °C	0–30

Eletropolimento



Atributos do eletropolimento

Dureza da superfície, Vickers	A mesma do substrato
Espessura do revestimento	Não é relevante
Cobertura de superfícies curvas	Média
Temp. de processamento, °C	0–90

O que é? Eletropolimento é eletro galvanização ao contrário. Oferece um meio para escapar do alto custo do polimento mecânico, porém, à custa de menor precisão. A peça é ligada ao lado positivo de uma fonte de corrente contínua de baixa tensão enquanto um catodo é conectado ao lado negativo, ambos imersos em uma solução condutora. Durante o processo, uma camada de óxidos ou sais se forma sobre a superfície da peça; a camada controla a dissolução, de modo que pontos altos de uma superfície áspera são dissolvidos mais rapidamente do que pontos mais baixos. O resultado final é uma superfície de metal com uma aparência macia e brilhante.

Funções Cor, refletividade, textura.

Notas de design A maioria dos metais pode ser polida eletricamente. Superfícies polidas por esse processo são brilhantes e sua capacidade de refletir calor e luz é superior. Entretanto, a refletividade da superfície é menos parecida com a dos espelhos do que as superfícies polidas por processos convencionais. Pode-se polir formas mais complexas do que com polimento mecânico, mas o grau de polimento é menor em orifícios, recessos e fendas do que em superfícies mais proeminentes.

Observações técnicas O eletropolimento é adequado para aços inoxidáveis, aços doces e aços de baixa liga, ligas de alumínio, latão e zinco para fundição em molde, berílio-cobre, níquel-prata, molibdênio e tungstênio. Não é necessário nenhum pré ou pós tratamento especial. O acabamento superficial mais econômico obtido com esse processo é de $0,4 \mu\text{m}$; pode-se conseguir $0,05 \mu\text{m}$ — mas a um custo mais alto.

Aspectos econômicos Normalmente o processo não requer nenhum ferramental especial, portanto, é econômico para todos os níveis de produção. Demanda menos mão de obra e equipamento mais barato do que o polimento mecânico, mas o custo de capital inicial pode ser alto. O tempo de processo para qualquer peça fica na faixa de 3–10 minutos incluindo-se o tempo requerido para limpeza, enxágue e outras etapas preliminares e subsequentes.

Produtos típicos Usado para peças pequenas de até 20mm^2 de área: contatos elétricos, rebites, parafusos em miniatura; também usado para peças de até 1m^2 : grandes painéis de metal.

O ambiente Muitos banhos de eletropolimento apresentam riscos ambientais e para a saúde. Alguns contêm produtos químicos desagradáveis — os que contêm cianogênios exigem cuidado particular. A proteção contra poluentes químicos e vapores tóxicos requer precauções especiais, assim como o descarte do fluido de polimento.

Processos concorrentes Polimento mecânico; polimento químico; eletro galvanização; galvanização autocatalítica; metalização a vácuo.

Polimento químico

O que é? Se uma barra de sabão com superfície áspera for imersa em água, emergirá mais lisa do que quando entrou. Isso porque o sabão se dissolve mais rapidamente nos picos de aspereza do que nos vales, pois o gradiente de concentração local é maior ali. O polimento químico segue um princípio semelhante. É um processo pelo qual uma superfície é alisada por dissolução química controlada em um banho de ácido contendo aditivos que, por criarem uma camada de contorno superficial, provocam a dissolução mais rápida das saliências do que das partes planas ou reentrâncias de superfície — não há nenhum suprimento externo de energia. Normalmente o processo é executado em altas temperaturas para aumentar a taxa de polimento. O polimento químico, como o eletropolimento, é um modo de dar brilho a uma superfície, realçando a refletividade, mas sem a precisão dimensional do polimento mecânico. E claro, muito mais barato.

Funções Cor, refletividade; textura.

Notas de design O polimento químico oferece grande liberdade para polir itens que tenham orifícios cegos e outras áreas em baixo relevo. Pode tratar peças de formas diferentes ao mesmo tempo. A refletividade da superfície é menor do que a obtida com eletropolimento; muitas vezes a superfície polida quimicamente é anodizada em seguida para produzir uma camada protetora de óxido, límpida e incolor.

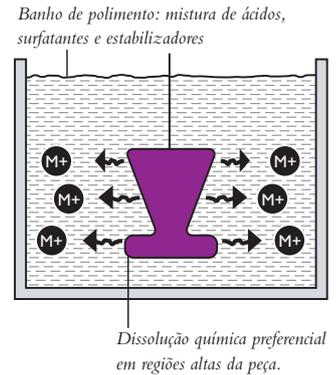
Observações técnicas Alumínio, cobre e aço inoxidável são comumente tratados por polimento químico. Em geral, os banhos de polimento químico se baseiam em combinações de ácido fosfórico, ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido hidrocloreto, ácidos orgânicos e surfatantes e estabilizadores especiais; alguns são baseados em peróxidos. O processo é controlado pela composição química do banho, pela temperatura e pelo tempo de imersão.

Aspectos econômicos O polimento químico tende a substituir o eletropolimento em razão dos custos mais baixos. O processo é barato para montar e operar: não é necessário ter nenhuma fonte de energia nem estruturas caras; o investimento de capital e os custos de mão de obra são baixos.

Produtos típicos Joalheria, peças de lâminas de barbear, guarnições automotivas, canetas-tinteiro, refletores para holofotes, guarnições arquitetônicas, eletrodomésticos, refletores térmicos para peças de veículos espaciais.

O ambiente Os produtos químicos envolvidos nesse processo são agressivos, mas manipuláveis. O descarte dos fluidos utilizados no polimento químico requer um circuito de reciclagem.

Processos concorrentes Polimento mecânico; eletropolimento; metalização a vácuo; eletrolgalvanização; galvanização autocatalítica.



Atributos do polimento químico

Dureza da superfície, Vickers	Depende do substrato
Espessura do revestimento	Não é relevante
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	55–140

Pintura à base de solvente



Atributos da pintura à base de solvente

Dureza da superfície, Vickers	10–16
Espessura do revestimento, µm	10–1000
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	10–100

O que é? Observar secagem de tinta é sinônimo de tédio. Mas as tintas modernas estão longe de serem monótonas. Na pintura à base de solvente, materiais corantes (pigmentos) estão em suspensão, com agentes de ligação (resinas), em um solvente orgânico volátil (*Volatile Organic Solvent* — VOC). Quando uma camada fina é aplicada a uma superfície, o solvente evapora; as resinas mantêm os pigmentos no lugar e formam uma camada protetora e decorativa. Hoje, poucas pinturas são diferentes disso. Atualmente, novos desenvolvimentos dão formulações que secam em segundos, têm cores que não desbotam, texturas macias, efeitos visuais, poderosas qualidades protetoras e muito mais. Mas — e sempre tem um mas — há um problema. Tintas à base de solvente são ruins para o meio ambiente, mas tão ruins que seu futuro está ameaçado.

Funções Cor, textura, toque; proteção contra corrosão e bactérias; proteção contra desgaste.

Notas de design Tintas à base de solvente dão o revestimento mais macio e uniforme e o maior controle da cor — a indústria automobilística e a maioria dos designers de produtos insistem em usá-las. Tintas metálicas misturam alumínio em flocos ao revestimento; o truque é que a camada seja suficientemente fina para que os flocos de metal fiquem em um plano, de modo que a cor não “mude” quando vista de ângulos diferentes. A cor é determinada pelo diferencial de absorção e reflexão dos vários comprimentos de onda da luz; a cor vista é aquela cujo comprimento de onda é o menos absorvido naquele ângulo de visão.

Observações técnicas Tintas são aplicadas com pincéis, por imersão ou com pistolas de spray e podem ser aplicadas a praticamente qualquer superfície, desde que esteja suficientemente limpa.

Aspectos econômicos Pintura é eficiente em custo. O custo do equipamento é baixo para pintura não automatizada, mas pode ser alto em caso de automatização. A indústria de tintas é um negócio de \$75 bilhões por ano.

Produtos típicos Aproximadamente metade de todas as tintas são usadas para decorar e proteger edificações, a outra metade para produtos manufaturados, muito particularmente automóveis e eletrodomésticos; aplicações náuticas criam importante mercado para formulações de alto desempenho contra corrosão e sujeira; “tintas para impressão” são tintas que desempenham papel central nas áreas de publicação e embalagem.

O ambiente Emissões originárias da evaporação dos solventes das tintas à base de solvente (VOCs) são tóxicas, reagem a luz solar e formam um nevoeiro e, em geral, são hostis ao meio ambiente. Fabricantes de automóveis e outros sofrem pressão cada vez maior para cumprir padrões exigentes de defesa ambiental. Agora, os solventes devem ser recuperados, queimados ou reciclados. Há um incentivo crescente para substituí-las por tintas à base de água (porém de secagem lenta) ou por revestimentos de polímero (mas que ainda não podem oferecer a mesma qualidade de superfície).

Processos concorrentes Pintura à base de água; revestimento a pó; eletropintura.

Pintura à base de água

O que é? Tintas à base de água (ou látex) são resinas e pigmentos sintéticos, mais agentes coalescentes, mantidas em dispersão em água por surfatantes. Secam por evaporação da água; os agentes coalescentes promovem a fusão das partículas de resina (coalescência) à medida que a água evapora para formar uma camada contínua.

Funções Cor, textura, toque; proteção contra corrosão, ataques de fungos e bactérias; proteção contra desgaste.

Notas de design Tintas à base de água são baseadas em dispersões de acrílico, uretano, acetato de polivinila (PVA) ou epóxi. Emulsões acrílicas são usadas em aplicações externas, onde suas características como não amarelar e também sua excelente resistência às intempéries são notáveis. Uretanos à base de água são adequados para utilização onde a boa flexibilidade e tenacidade são importantes, como em revestimentos de couro e polímero, mas sua maior desvantagem é o alto custo. PVA e epóxis têm boa resistência às intempéries. Tintas à base de água demoram mais para secar do que muitas tintas à base de solventes orgânicos, e dão um acabamento superficial não muito bom.

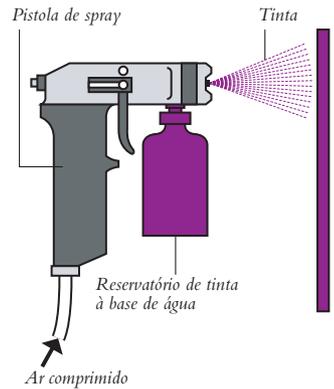
Observações técnicas Tintas à base de água devem ser protegidas contra congelamento e aplicadas a uma temperatura mínima de 10°C. O controle da temperatura e da umidade é crítico para o tempo de secagem. Às vezes é necessária cura a quente. Deve-se usar pigmentos compatíveis com água. Partículas metálicas normalmente são revestidas antes de serem misturadas à tinta para evitar reação química com a água. Muitos aglomerantes convencionais (alquilas, acrílicos e epóxis) podem tornar-se solúveis em água pela anexação química de grupos polares como carboxilas, hidroxilas e amidas. Dispersões são partículas muito pequenas de aglomerantes, menores do que 0,1 µm de diâmetro, dispersas em água. Emulsões, ou látex, são diferentes das dispersões porque o tamanho das partículas é muito maior, da ordem de 0,1 µm ou mais; são obtidas por precipitação em água, portanto, não precisam ser dispersas mecanicamente.

Aspectos econômicos Sistemas de pintura com tinta à base de solvente normalmente podem ser convertidos para sistemas de pintura com tinta à base de água com pequeno investimento de capital. O custo de tintas à base de água depende do tipo; podem ser menos caras do que suas equivalentes à base de solvente.

Produtos típicos Assoalhos, lacas para madeira, tintas decorativas, revestimentos automotivos, revestimentos de polímero, tintas, adesivos.

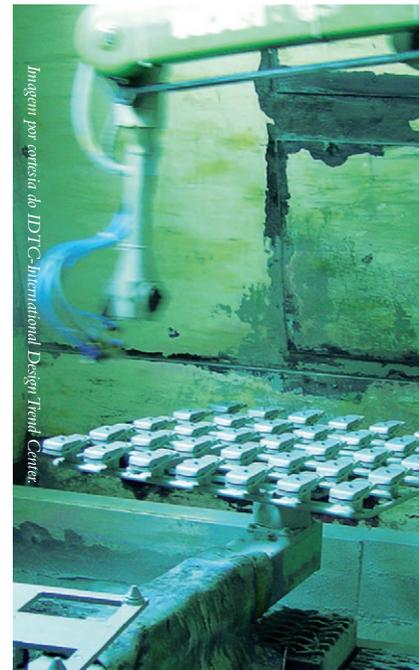
O ambiente Tintas à base de água reduzem emissões de VOCs e a exposição dos trabalhadores a poluentes tóxicos e não representam risco de incêndio. Estão desbancando as tintas à base de solvente, embora estas sequem rapidamente e produzam um acabamento superficial melhor, com melhor adesão.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente; revestimento a pó; eletropintura.

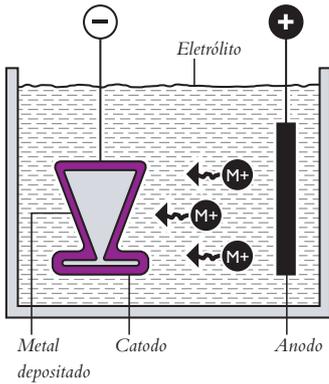


Atributos da pintura à base de água

Dureza da superfície, Vickers	10–16
Espessura do revestimento, µm	10–1000
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	10–100



Eletropintura



Atributos da eletropintura

Dureza da superfície, Vickers	5–15
Espessura do revestimento, μm	10–30
Cobertura de superfícies Curvas	Boa
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	25–230

O que é? Na eletropintura, a peça forma o catodo em uma célula eletrolítica. O anodo é inerte — normalmente grafite ou aço inoxidável — e o eletrólito é uma solução aquosa na qual o pigmento é emulsificado. Um ambiente alcalino é criado no catodo, promovendo a coagulação do verniz. As partículas de pigmento carregadas são arrastadas pelo campo elétrico até a superfície da peça, onde formam uma película fortemente ligada. A película é relativamente fina (10–30 μm), mas dá boa resistência à corrosão, em particular se cozida a 150–230 $^{\circ}\text{C}$ após a deposição. Outras camadas de tinta são aplicadas por cima. O princípio pode ser comparado com a eletrogalvanização e é amplamente usado na indústria automobilística.

Funções Cor, refletividade; resistência à corrosão.

Notas de design O processo é muito usado para obter subcamadas uniformes em peças grandes e complexas. Presta-se à produção de grandes volumes de produtos recobertos com a mesma cor; são exemplos a eletropintura de uma tinta branca em esquadrias de janelas e portas de metal e a subcamada de partes da carroceria de automóveis. A camada de tinta é distribuída uniformemente sobre a superfície, mesmo em áreas que, caso contrário, seriam inacessíveis. A principal desvantagem é o requisito de uma única cor uniforme.

Observações técnicas Películas de eletropintura são depositadas em um tanque de imersão. O banho consiste em concentrado de resina e concentrado de pigmento misturados com água não ionizada e pequenas quantidades de solubilizadores e antiespumantes. A concentração de sólidos não voláteis no banho varia de aproximadamente 10 a 20%, dependendo do tipo e da composição. Às vezes esse processo utiliza tintas de autoforese; são tintas redutíveis em água depositadas em superfícies de metal pela ação catalisadora do metal sobre os materiais da tinta presentes no banho. Atualmente, somente ligas ferrosas ativam as eletrotintas disponíveis no comércio. Estruturas automotivas tubulares são revestidas por esse método porque todo o comprimento do tubo pode ser revestido por dentro e por fora com igual facilidade.

Aspectos econômicos O custo do ferramental é baixo; o custo de capital é médio.

Produtos típicos Subcamadas para envernizar peças de carrocerias de automóveis, revestimentos de uma cor só para eletrodomésticos, painéis e molduras arquitetônicas.

O ambiente O processo não apresenta nenhum risco particular ao ambiente, além do descarte dos fluidos usados no banho.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente e água; revestimento a pó.

Revestimento por pintura a pó

O que é? Partículas de poeira aderem à tela de um aparelho de TV por causa da diferença entre a carga elétrica da poeira e da tela. Esse efeito é usado para finalidades práticas a pintura eletrostática a pó. É um processo eficiente e amplamente usado para aplicar acabamentos decorativos e protetores a peças metálicas ou condutoras. O pó é uma mistura de pigmento e resina finamente moídos, aspergido por meio de um bocal negativamente carregado sobre a superfície a ser revestida. As partículas do pó, carregadas, aderem à superfície da peça eletricamente aterrada. A diferença de carga atrai o pó até lugares da peça onde a camada de pó (que é isolante) é mais fina, acumulando uma camada uniforme e minimizando a perda do pó. Em seguida a peça é aquecida para fundir a camada e formar um revestimento macio em um forno de cura. O resultado é um revestimento uniforme e resistente, de alta qualidade e acabamento atraente.

No revestimento polimérico por chama-spray, um termoplástico em forma de pó (80–200 μm) é alimentado por meio de um dosador em uma chama de gás-ar que funde o pó e o arremessa contra a superfície a ser revestida. O processo é versátil, pode ser mecanizado ou operado manualmente e pode acumular revestimentos de até 1mm de espessura. Uma ampla gama de pós de termoplásticos pode ser usada e o processo é barato. As desvantagens: deposição visível e acabamento superficial inferior ao de outros processos.

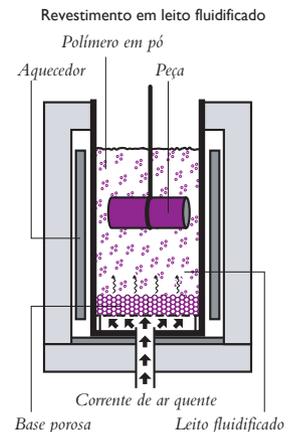
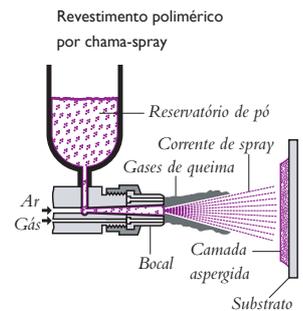
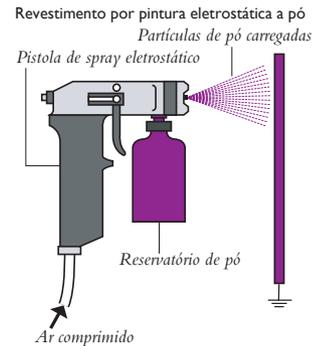
Uma rosca quente, mergulhada em açúcar fino, emerge com uma camada doce e crocante. O revestimento em leito fluidificado funciona quase do mesmo jeito. A peça, aquecida a 200–400 $^{\circ}\text{C}$, é imersa por 1 a 10 segundos em tanque contendo pó de revestimento, fluidificado por uma corrente de ar. A peça quente derrete as partículas que aderem a ela e formam um revestimento espesso com excelente adesão.

No revestimento por leito eletrostático, o leito é semelhante, mas a corrente de ar recebe uma carga elétrica ao entrar no leito. O ar ionizado carrega as partículas à medida que elas sobem, formando uma nuvem de partículas carregadas. A peça aterrada é coberta pelas partículas carregadas ao entrar na câmara. Não é preciso preaquecer a peça, mas uma posterior cura a quente é necessária. O processo é particularmente adequado para revestir pequenos objetos com geometrias simples.

Funções Cor, textura, toque; proteção contra corrosão aquosa e orgânica; proteção contra desgaste.

Notas de design As aplicações de revestimento por pintura a pó são limitadas às que suportam as temperaturas de processamento exigidas para fundir, curar e formar a película — mas isso inclui todos os metais. É fácil automatizar o processo e ele pode criar películas finas (50 μm), com boa cobertura das bordas. Películas grossas podem ser aplicadas em uma única operação e, em geral, a tenacidade do revestimento é melhor do que a de suas contrapartes baseadas em líquidos. Revestimentos a pó estão disponíveis em ampla variedade de brilhos e texturas.

Observações técnicas A pintura eletrostática a pó é aplicado rotineiramente a componentes de aço, alumínio, magnésio, latão, cobre, ferro fundido e à maioria das ligas metálicas. Pode ser aplicado a não metais se antes a superfície for transformada em condutora. A pesquisa e desenvol-



Atributos do revestimento por pintura a pó

Dureza da superfície, Vickers	10–16
Espessura do revestimento, μm	50–2000
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	125–400

vimento de pós que podem ser curados a temperaturas mais baixas vem permitindo que a aplicação do revestimento a pó seja feita a superfícies não metálicas como cerâmicas, madeira e polímeros. Os materiais de revestimento típicos são náilons, poliésteres, polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila (PVC), fluoreto de polivinilideno (PVDF) e copolímeros de ácido etilenoacrílico (EAA).

Quase todos os metais, cerâmicas, e até mesmo madeiras podem ter revestimento polimérico aplicado por chama-spray — diferentemente do revestimento eletrostático a pó, não é necessário que a superfície seja condutora. Revestimentos típicos são polietileno de alta e baixa densidades, polipropileno, poliésteres termoplásticos e poliamidas (Náilon 11). Pode ser necessário preaquecer a superfície até 150–250°C. O revestimento em leito fluidificado funciona bem com náilons, PVC, acrílicos, polietileno, polipropileno, silicones, EVA e poliestireno. O processo dá boa cobertura, em particular a formas irregulares, permitindo o revestimento simultâneo de superfícies externas e internas. É possível obter camadas espessas em pouco tempo, com pouco desperdício de pó.

Aspectos econômicos O revestimento por pintura a pó é a técnica de acabamento de crescimento mais rápido, e agora representa mais de 10% de todos os acabamentos industriais. Para o revestimento eletrostático de polímero, o custo de capital é médio, o custo do ferramental é baixo, e o equipamento não é portátil — é um processo de oficina. A taxa de revestimento fica entre 5 e 20 $\mu\text{m/s}$. Para revestimento polimérico aplicado por chama-spray, o custo de capital é baixo, o custo do ferramental é baixo e o equipamento é portátil. Não há limite para o tamanho da peça. A taxa de revestimento fica entre 10 e 30 $\mu\text{m/s}$. Para o revestimento em leito fluidificado, o custo de capital é mais alto do que o por chama-spray; o custo de ferramental é baixo. A taxa de revestimento fica entre 20 e 50 $\mu\text{m/s}$.

Produtos típicos Indústria automotiva: rodas, para-choques, calotas, trincos de portas, guarnições decorativas e peças corrugadas, plataformas de caminhões, radiadores, filtros, várias peças de motor. Eletrodomésticos: painéis frontais e laterais de fogões e refrigeradores, topos e tampas de arruelas, tambores de secadoras, gabinetes de aparelhos de ar condicionado, aquecedores de água, prateleiras de máquinas de lavar pratos, internos de fornos de micro-ondas; o revestimento a pó substituiu o esmalte de porcelana em muitas peças de máquinas de lavar e secar roupas. Arquitetura: esquadrias para janelas e portas e móveis modulares. Produtos de consumo: acessórios de iluminação, antenas, componentes elétricos, tacos de golfe, esquis e componentes, bicicletas, gabinetes para computadores, lapiseiras e canetas.

O ambiente O processo não usa solventes e quase não libera compostos orgânicos voláteis (VOCs), portanto, os operadores não são expostos a altos níveis de toxidez. Poluição do ar, riscos de incêndio e compostos orgânicos voláteis são baixos. O excesso de pó aspergido é reciclado, misturado e aspergido novamente com material virgem, o que aumenta a utilização até 99% em peso.

Processos concorrentes Anodização, pintura orgânica e à base de água.

Esmaltação

O que é? Esmaltação é pintura com vidro. Cria revestimentos de excepcional durabilidade: as máscaras mortuárias esmaltadas dos Faraós do Egito parecem tão brilhantes, vibrantes e perfeitas hoje como quando foram criadas há mais de 3000 anos (Tutancâmon, 1358–1340 a.C.). Uma fina camada de pó de vidro com aglomerante e agente corante é aplicada ao objeto a ser esmaltado por pintura, spray ou serigrafia; então a camada é fundida ao objeto, em geral feito de ferro fundido, aço, cobre, prata ou até mesmo — no caso de Tutancâmon — ouro prensado, criando um revestimento contínuo fortemente ligado de vidro colorido. É um processo a quente — o objeto que está sendo esmaltado deve ser aquecido até a temperatura de fusão do pó de vidro, o que limita sua utilização a metais e cerâmicas.

Funções Cor, textura, refletividade; resistência à corrosão; resistência a arranhões.

Notas de design Revestimentos de esmalte têm excepcionais dureza, resistência ao desgaste e à corrosão e podem ter uma gama ilimitada de cores.

Observações técnicas O vidro usado para esmaltação deve fluir com facilidade, ser úmido e se ligar à superfície de metal, e ter um coeficiente de expansão apenas um pouco diferente do coeficiente do metal subjacente. Consegue-se isso com a utilização de um vidro rico em óxido bórico (até 35%), que também propicia ligações fortes e cores lustrosas. Na prática, em geral a esmaltação une dois tipos diferentes de vidro: a camada de base inclui óxidos de cobalto e níquel, que ajudam a formar uma forte ligação com o metal; a segunda camada contém a cor e a decoração. O resultado é um revestimento extremamente durável que suporta choque térmico.

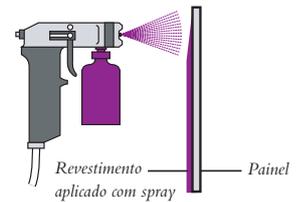
Aspectos econômicos A esmaltação não é barata — é lenta, e também demanda muita energia. A escolha desse processo depende do equilíbrio entre qualidade e custo — suas qualidades estéticas e de durabilidade são inigualáveis.

Produtos típicos No lar: banheiras, máquinas de lavar roupa, aquecedores, *cooktops*, lareiras, fogões elétricos e a gás, mostradores de relógios e utensílios de cozinha. Em lugares que você não consegue ver: tubulações de água quente, tanques de armazenamento, sistemas de exaustão de automóveis, circuitos impressos e trocadores de calor. Em lugares que você consegue ver: sinalização de rua, sinalização e murais ferroviários. Na indústria da construção: painéis arquitetônicos internos e externos, faixas, tímpanos e divisórias.

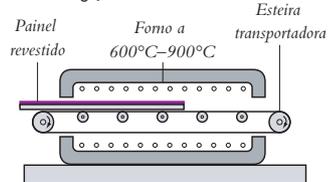
O ambiente O processo exige altas temperaturas mas, fora isso, não agride o meio ambiente. Superfícies esmaltadas são fáceis de limpar (até os grafites podem ser removidos sem dano), resistentes a arranhões e excepcionalmente higiênicas.

Processos concorrentes Pintura à base de solvente e água; revestimentos a pó — embora nenhum deles dê coberturas de dureza e durabilidade comparáveis.

Cobertura por pistola de spray



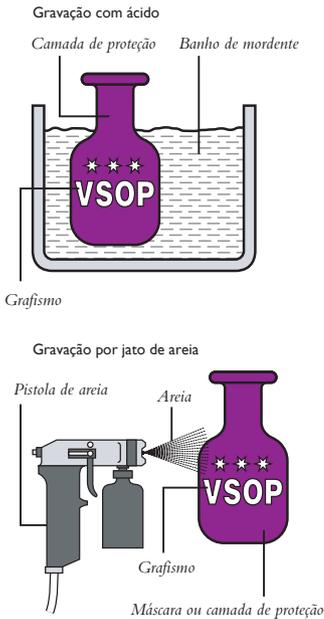
Fusão e ligação



Atributos da esmaltação

Dureza da superfície, Vickers	7k–10k
Espessura do revestimento, µm	500–1000
Cobertura de superfícies curvas	Boa
Temp. de processamento, °C	600–900

Gravação



Atributos da gravação

Dureza da superfície, Vickers	7k–10k
Espessura do revestimento, μm	500–1000
Cobertura de superfícies curvas	Depende do processo
Temp. de processamento, $^{\circ}\text{C}$	18–60

O que é? Há três processos básicos de gravação. A gravação química é amplamente usada para decorar objetos de vidro, metal e polímero. As áreas ou padrões que serão gravados são expostos a um ácido ou “mordente”; as áreas que não serão gravadas são protegidas com cera. O vidro costumava ser gravado por ácido hidrofúorídrico, um produto químico particularmente nocivo que exala vapores venenosos; hoje, foi substituído em grande parte por géis de gravação patenteados, por gravação por jato de areia ou por gravação com uma ponta de diamante. Cobre, zinco, níquel e aço são gravados em várias combinações de ácidos sulfúrico, nítrico e hidrocloreídrico.

A gravação por jato de areia utiliza um jato de partículas angulares de areia em uma corrente de gás pressurizado para provocar a corrosão da superfície que não esteja protegida por uma máscara. O método funciona bem com metais, cerâmicas e polímeros.

A eletrocorrosão é um modo não tóxico de gravar metais. Nesse processo o banho ácido é substituído por um banho de sulfato de cobre (para corroer cobre) ou sulfato de zinco (para corroer zinco) que não precisa ser substituído. O objeto, protegido por cera onde necessário, é o anodo (+) de um banho de eletropolimento, e sua superfície será corroída nas áreas não protegidas pela cera.

Funções Cor, textura, padronização, decoração.

Notas de design A gravação é amplamente usada para decorar vidro e metal. A liberdade de design está limitada apenas pela técnica de criar a máscara de cera que resiste ao ataque.

Observações técnicas Há técnicas para gravar vidro, azulejos, madeira, pedra, metais, polímeros. Os ácidos usados para a gravação química são, por sua natureza, particularmente agressivos, e exigem recipientes, manuseio e descarte especiais. A gravação por jato de areia é menos exigente, porém, menos controlável.

Aspectos econômicos A gravação química é lenta e cara. A gravação com areia e a eletrocorrosão são mais rápidas e mais baratas.

Produtos típicos Decoração de objetos de vidro, metal, polímero ou madeira. Arte: joalheria, ornamentos, relógios, marcadores de livros, fotografias gravadas em metal, medalhões, arte urbana, cartazes comemorativos, interruptores elétricos. Publicidade: placas, cartões de visita, letreiros, placas, troféus, elementos de capa para relatórios anuais, logo ou etiquetas para colocar em produtos, botões de elevadores, sinais para colocar em portas, crachás, insígnias, decoração de escritório.

O ambiente A gravação química apresenta grandes problemas ambientais associados a vapores tóxicos, produtos químicos agressivos e à dificuldade de descartar os banhos usados. A gravação por jato de areia e a eletrocorrosão não têm nenhum desses problemas.

Processos concorrentes Texturização.

Texturização

O que é? Texturas podem ser criadas de várias maneiras: por fundição ou moldagem com uma ferramenta entalhada ou por laminação entre rolos entalhados (a placa com “padrão de losangos” usada para pisos de aço é feita desse modo). Com prensa de corrugar, comprimindo a chapa entre matrizes entalhadas: placas pré-fabricadas de até 0,8mm de espessura podem ser corrugadas para dar padrões refletivos cintilantes; esse processo é usado também para aumentar a tenacidade e a resistência à flexão, o que permite o uso de materiais com bitolas menores para caixas e latas. Por jato de areia ou polimento abrasivo, tratamento que deixa a superfície microscopicamente mais áspera de maneira aleatória ou seguindo um padrão (como em “alumínio escovado”). Por texturização a laser, comumente aplicada a rolos ou matrizes; o feixe de laser pulsado cria diminutas crateras na superfície do rolo segundo um padrão controlado com precisão que então é transferido à peça durante a operação de laminação. Por eletrotextrização, um processo parecido com a usinagem por descarga elétrica (*Electro-Discharge Machining* — EDM), mas que utiliza eletrodos de grafite conformados para alisar ou dar textura à superfície da peça. E por gravação química (“corrosão” e “polimento químico”) de moldes, rolos e matrizes, ou da própria peça.

Funções Cor, textura, toque; atrito (garra).

Notas de design A texturização é importante no design por razões técnicas, bem como estéticas. Pode melhorar a aparência do produto, dando-lhe uma superfície visualmente interessante, além de ocultar minúsculas falhas, arranhões e marcas afundadas. Pode melhorar a pega e contribui para as qualidades táteis de um produto.

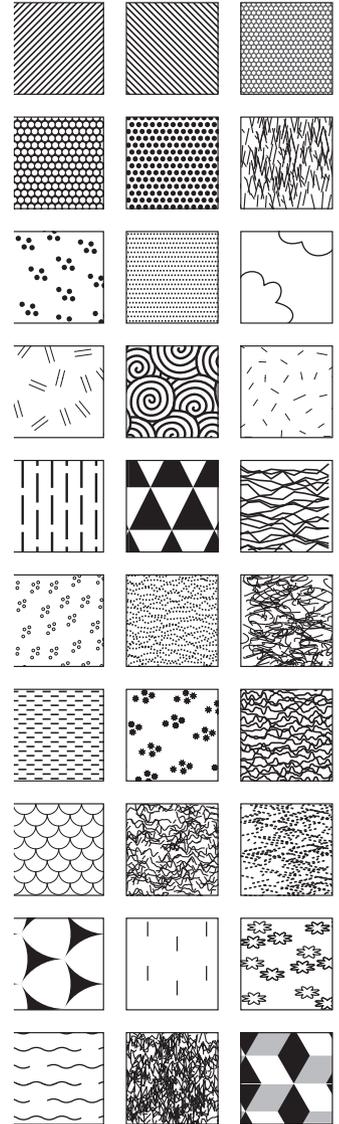
Observações técnicas Praticamente qualquer material pode ser texturizado por algum dos métodos descritos aqui. A texturização por roletes entalhados ou por prensa de corrugar é limitada a formas simples (como chapas); os métodos de eletrotextrização, gravação química e ferramentas entalhadas permitem mais liberdade de forma.

Aspectos econômicos O custo depende do processo. Alguns, como o jato de areia e a laminação com roletes entalhados são rápidos e baratos. Outros, como a texturização a laser e a gravação química são mais lentos e, por consequência, mais caros.

Produtos típicos Há duas classes muito gerais de aplicação: a que imprime aspectos visuais e a que cria características táteis em um produto.

O ambiente Processos de texturização não apresentam nenhum risco ambiental particular.

Processos concorrentes Gravação.



Atributos da texturização

Dureza da superfície, Vickers	Depende do substrato
Temp. de processamento, °C	18–30

Índice

A

Abafamento, 92
veja também Amortecimento
 Abridores de garrafas, 113, 115
 Acetal, 219, 225
 Aços, 240, 242, 243
 Aços de baixa liga, 243
 Aços inoxidáveis, 21, 67, 113, 152, 153, 242
 Aços-carbono, 140, 152, 153, 240, 243, 281, 298
 Acrílicos, 197, 279, 333, 336
 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), 214
 Adesão de têxteis, 293
 Adesão por aspersão (spray), 292
 Adesivos, 44, 114, 206–207, 216, 224, 225, 227, 259, 292–295, 298, 313
 Adesivos anaeróbicos, 295
 Adesivos baseados em isocianato, 294
 Adesivos com base de imida, 294
 Adesivos de cianoacrilato, 293
 Adesivos de fusão a quente, 216, 295
 Adesivos estruturais, 292
 Adesivos fenólicos, 294
 Adesivos sintéticos, 292
 Aeroespacial, 14, 119, 161, 163, 238, 244, 245, 246
 Agrupamento, aglomeração, 59, 60, 119
 Alumina, 75, 205, 252
 Alumínio, 20, 25, 41, 47, 48, 67, 75, 82, 83, 86, 87, 97, 100, 114, 119, 131, 145, 146, 147, 150, 165, 166, 204, 205, 238, 244, 245, 250, 276, 281, 297, 323, 325, 328, 331, 332, 335
 Amortecimento, 79, 80, 92, 151, 166, 198, 225, 245
 Análise *trade-off*, 141
 Análise de falhas, 35
 Análise de tensões, 35, 60, 107
 Análise estatística, 55, 56
 Análise, em seleção de materiais, 145, 148
 Anodização, 328
 Antropomorfia, 62–63
 Apelo tátil, 4
veja também Toque
 Apelo visual, 21
 Apresentações visuais, 48, 64
 Arqueologia, 119
 Arquitetura, 3, 4, 16, 17, 41, 98, 105–107, 120, 250, 300, 336
 Arquivos CAD, 43, 286, 287
 Art *déco*, 19, 31, 118, 119
 Assento para crianças em automóveis, 127, 128
 Atributos acústicos, 76, 80–81, 174
 Atributos associativos, 30, 31, 81
 Atributos elétricos, 58
 Atributos físicos, 57, 58
 Atributos formais, 118
 Atributos mecânicos, 58, 61
 Atributos técnicos, 29, 30, 34, 56–61, 85–86, 95–98, 209–230, 240–248, 252–254, 259–265
 Atributos térmicos, 58, 60
 Atributos visuais, 78–80
 Atrito, 220, 281
 Automóveis, 10, 13, 17, 69, 72, 145, 203, 205, 209, 224, 225, 243, 274, 332
 Avaliação do ciclo de vida, 72

B

Balsa, 77, 257
 Bambu, 43, 152, 257
 Bancos de dados, 32, 124, 129, 132
 Baquelite, 22, 38, 118, 196, 197, 199, 205, 230, 294
 Bicicletas, 14, 86, 87, 113–114, 129, 136, 145–146, 147, 199, 216, 282, 306, 336
 Biodegradação, 223, 265
 Biologia celular, 12
 Biomecânica, 62
 Bomba de insulina, 130
 Borrachas, 76, 198, 232
 Borrachas butílicas (nr), 198, 214, 232
Brainstorming, 42, 43, 50, 166
 Brasagem, 114, 206–207, 306
 Brilho do som, 92
 Bronze, 80, 81, 83, 119, 196, 250–251, 278, 306, 325
 Busca aleatória, 41, 50, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 144, 150, 175
 Busca na internet, 177, 316

C

Cabos de aço sob tração, 106, 107
 Cadeiras, 25, 46, 107–108, 109, 110, 111, 113, 214, 217, 271
 Cádmiu, 205, 307, 324
 Caixas de CD, 148–150, 212
 Calandragem, 199, 204
 Calor, 41, 77, 91
 Câmeras digitais, 320
 Canetas, 36–39
 Cânhamo, 256
 Carboneto de boro, 205, 252, 256
 Carboneto de silício, 205, 252, 256
 Carboneto de tungstênio, 205, 252, 285
 Cargas mecânicas, 10, 107
 Caso específico, 209–230, 240–254, 259, 264–265
 Celuloses, 167, 223, 257, 296
 Cera perdida, 278
 Cerâmicas
 adesão, 335
 cimentos, 196, 295
 extrusão, 206–207, 281, 285
 ligação por difusão, 206–207, 313
 polimento, 329
 revestimento, 41, 95, 153, 206–207, 335, 337
 sintetização de pó, 285
 Ciência dos materiais, 32–33, 56
 Cilindros, junção, 290, 303
 Classificação, 56, 57, 58, 60, 95, 96, 97, 123–126, 245, 292
 Clientes, 124
 Cloreto de polivinila (PVC), 224
 Coeficiente de dilatação térmica, 190, 191, 205, 247
 Coeficiente de perda, 151, 188
 Colagens, 42, 112, 119
 Coleções, 18, 41, 42, 50
 Coleções de amostras, 41–42
 Comercialização, 15, 159, 163
 Componentes na escala micron, 11
 Composição, 56, 242, 254, 307, 313, 334
 Compósitos, 5, 11, 56, 58, 66, 75, 147, 160, 196, 202, 203, 204,
 Compósitos com matriz de metal, 204–205, 312
 Compósitos de matriz de polímero, 147, 161, 284
 Compósitos reforçados com fibras, 255, 275

Materiais e Design

- Compósitos reforçados, 255, 256, 275
 - veja também* Compósitos reforçados com fibras
- Compressão e sinterização, 285
- Compressão isostática a quente, 285
- Computadores pessoais, 18
- Concreto armado, 105, 107
- Condições de contorno, 9, 13, 136
- Condutividade térmica, 76, 191, 205, 244, 245, 247, 250, 252, 257, 271
- Conformação, 95-100, 268-287
- Conformação de chapas, 282-293
- Conformação de volumes, 96, 199
- Conformação por laminação, 282
- Conformação sob pressão, 282
- Consumo de combustíveis, 71
- Cor, 4, 15, 18, 19, 20, 30, 38, 39, 42, 43, 65, 112, 117, 199, 214, 223, 321, 322, 324, 328, 329, 332, 334, 337
- Cortiça, 66, 67, 76, 257
- Costura, 296
- Couro, 257
- Crepitação, 323
- Criatividade, 30, 32, 38, 42-43, 173, 271
- Cristalização, 197, 260
- Cubic Printing*, 320, 321
- Custo, 6, 14, 29, 34, 36, 68, 72, 73, 97, 145, 161, 162, 198, 282, 286, 328, 330, 336, 339
- D**
- Dados técnicos, 95-96, 98
- Decibéis (dB), 66
- Decoração, 3, 4, 83, 118, 321, 322, 338
- Decoração no molde, 322
- Deformação plástica, 280
- Densidade, 23, 66, 145, 151, 154, 155, 173, 180, 181, 182, 183, 184, 210, 212, 214, 216, 225, 236, 284, 335
- Descarte, 55, 70, 72
- Descarte de produtos, 12, 13, 70, 97
- Desejo (querer), 10
- Desempenho, 14, 15, 129, 136, 137, 161, 198
- Desenho esquemático, 32
- Desenvolvimento, 14, 22, 34, 37, 163
 - veja também* Pesquisa e desenvolvimento
- Design industrial, 4, 15-18, 29, 55-56
- Diagramas de fases, 32
- Diagramas de propriedades de materiais, 32
- Diagramas de Venn, 32
- Diferenciação, 15, 18, 21
- Difusividade térmica, 91, 301
- Diretrizes básicas de projeto, 34, 36, 132, 143, 144
- Dispositivos MEMS, 11
- Dureza, 76, 91, 243
- E**
- Ebonite, 37, 198
- Ecodesign, 70-71
 - veja também* Impacto ambiental
- Ecologia, 9
- Economia, 17, 68, 244
- Economias de livre mercado, 9
- Eficiência, 4, 13, 17
- Elastômeros, 63, 76, 198-199, 232-235
- Elastômeros clorados, 198, 234
- Elastômeros de etileno-acetato de vinila (EVA), 234
- Elastômeros de fluorocarbono, 234
- Elastômeros de nitrila, 233
- Elastômeros de polibutadieno, 233
- Elastômeros de polissulfeto, 233
- Elastômeros estireno butadieno, 232
- Elastômeros propileno-etileno, 233
- Eletrocorrosão, 338
- Eletrodeposição, 323-327
- Eletro galvanização, 324-326
- Eletro galvanização com cobre, 319
- Eletro galvanização com estanho, 325-326
- Eletro galvanização com prata, 325
- Eletro galvanização com ródio, 325
- Eletro galvanização com zinco, 248, 324, 326
- Eletropintura, 334
- Emissões, 13
- Emoções, 64, 117
- Emotions*, 64
- Encolhimento, 198, 206
- Energia, 13, 71, 72, 73, 75, 236
- Engenharia de precisão, 147
- Ensino de engenharia, 133
- Epóxis, 78, 198, 236, 293, 333
- Equipamentos esportivos, 56, 63, 161, 163, 270, 320
- Ergonomia, 39, 61-67
- Esboço, 43
- Escala, 3, 11, 12, 108, 110, 119, 240
- Escala multidimensional, 58
 - veja também* MDS
- Esmaltação, 337
- Especificações, 34
- Espumas, 43, 166, 180, 236, 259
- Estampagem, 321
- Estanhão, 307
- Estereolitografia, 286
- Estética, 15-18, 56, 68, 76-81, 82, 98, 112, 113, 126, 127, 130, 174, 264
- Estilo de vida, 12, 68
- Estrutura atômica, 56, 180
- Estruturas de suporte, 11
- Estruturas semelhantes a conchas ou cascas, 128
- Estudos de caso
 - da IDEO, 45-49
 - em materiais e design, 142
- Evolução de materiais, 21-22, 194, 196
- Expectativas, 13, 17
- Exposições, 41, 117
- Extrusão, 98, 217, 281
- Extrusão direta, 281
- Extrusão indireta, 281
- Extrusão por impacto, 281
- F**
- Fabricação de objetos laminados, 286
- Fatores humanos, 39, 62
- Fechos, 298
- Fechos rosqueados, 298
- Feiras comerciais, 30, 41, 50
- Ferramentas de software, 60, 73, 177
- Ferro forjado, 83, 105, 107
- Ferro fundido, 23, 75, 105, 107, 196, 240, 257, 277, 308, 310, 311, 335

- Fiação, 282
 Fibra de vidro, 66, 107, 155, 163, 238
 Fibras, 58
 Fibras de aramida, 216, 225, 256
 Fibras de carbono, 5, 56, 114, 159, 163, 203, 228, 238, 255, 284
 Flexão, curvatura, 105, 107, 145, 180, 205, 236, 282, 297, 339
 Forças do mercado, 10, 161
 Forças para mudanças, 11
 Forjamento a quente em molde, 280
 Forjamento em molde, 280
 Formas, 50, 63, 76, 97, 98, 173, 205, 217, 225, 248, 268
 Formas circulares, 312
 Formas com paredes finas, 271-272, 276, 282, 283, 284
 Formas complexas, 33, 97, 197, 248, 270, 276, 277, 322, 330
 Formas curvas, 147, 320
 Formas ocas, 272, 276, 278
 Formas planas, 282
 Formas simétricas em relação ao eixo, 308
 Formas sólidas, 81, 273
 Fornecedores, 5, 35, 42, 60
 Fragilidade, 81, 106, 107, 152, 242
 Frio, 77, 91
 Funcionalidade, 10, 108, 112
 Fundição, 22, 198, 199, 206-207, 217, 225, 236, 244, 245, 260, 278, 339
 Fundição centrífuga, 206-207, 279
 Fundição de precisão, 278
 Fundição em areia, 277
 Fundição em areia verde, 277
 Fundição em casca, 277
 Fundição sob pressão, 97, 276
- G**
 Galvanização autocatalítica, 327
 Galvanização com cromo, 324
 Galvanização iônica, 323
 Gerenciamento de ruído, 65-67
 Gerenciamento térmico, 67
 Gosto, 15, 18, 30, 38, 76, 120, 126, 165
 Grampos, 297
 Gravação, 250, 338, 339
 Gravação por jato de areia, 338
 Gravação química, 338
- H**
Hot Stamping, 321
- I**
 Ícones, 64
 Identidade corporativa, 20
 Identidade de marca, 16-17, 118
 Imaginação, 31, 32
 Impacto ambiental, 71, 133, 144
 Impressão superficial, 65
 Impressão, 318, 319, 320
 Indexação, 45, 50, 124
 Indicadores, 64
 Índices de material, 137-138
 Informação, 32, 55, 63-65, 124-129
 Inovação, 5, 11, 17-18, 21, 45, 158-169
 Inspiração, 4, 11, 15, 40-45, 131-132, 133, 173, 193
 Insumos primários, 12, 13, 70, 73
- Interfaces, 15-16, 18-19, 61-67
 Investimento, 9, 13-15
 Ionômeros, 222
 Iridio, 38
 Isolamento, 22, 66-67, 80, 216, 236, 257
 Isopreno, 232
- J**
 Juntas de luva, 307
 Juntas de topo, 292, 302
 Juntas macho e fêmea, 290
 Juntas sobrepostas, 290
- K**
 Kevlar®, 199, 203
- L**
 Laminação, 204
 Laminação a frio, 280
 Laminação a quente, 280
 Laminação de perfis, 280
 Latão, 21, 250-251, 285, 299, 306, 311, 321, 325
 Legislação, 71, 72
 Leis da mecânica, 11
 Ligação por verificação, 206-207, 313
 Ligas, 204, 244-248
 Ligas de alumínio, 140, 145, 152, 163, 204, 244, 248, 277
 Ligas de cobalto, 205, 325
 Ligas de cobre, 277, 280, 311
 Ligas de magnésio, 145, 245
 Ligas de memória de forma, 64, 204, 262
 Ligas de níquel, 247
 Ligas de titânio, 140, 246
 Ligas de zinco, 248, 276
 Ligas superplásticas, 204
 Limite de elasticidade, 138
 Linguagem de projeto, 15, 115-116
 Lista de características, 108-115
 Logo, 87, 152
- M**
 Maçarico de soldar, 308
 Machados de gelo, 152-154
 Maciez, 76, 91
 Madeira, 20, 21, 43, 66, 81, 105, 113, 159, 165, 196, 258, 293, 321, 335
 Manufatura
 expressão por meio de, 100
 móveis para escritório, 144-147
 produto, 55, 288
 Manuseio de materiais, 41
 Mapa mental, 43
 Mapas de distâncias, 59
 Mapas de mecanismo de deformação, 32
 Máquinas fotográficas, 21-22, 276, 320
 Marketing, 63, 68
 Materiais
 classificação, 56, 57
 coleções de amostras, 41-42, 112
 consumo, 69-70, 161
 desenvolvimento, 14, 163, 173
 e forma, 113-114
 estrutura de informações, 124-126, 165

Materiais e Design

- evolução em uso, 21–23, 196
 - multidimensional, 12, 54–87
 - novos, 158–169
 - seleção, 36, 67, 108, 122–134
 - análise, 136–141
 - inspiração, 125, 128, 131–132, 133
 - similaridade, 123, 125, 128, 130–131, 132, 133, 150–152, 155
 - síntese, 125, 128, 130, 131, 133, 145–147, 152–154
 - sensibilidade ao custo de, 161, 162
 - serviços de informação, 42, 164
 - utilização reduzida, 133
 - vida útil, 12, 13, 70
 - Materiais acionadores, 64
 - Materiais condutores, 10, 67
 - Materiais de engenharia, 11, 60, 196
 - Materiais estruturais, 10, 14
 - Materiais flexíveis, 65, 66
 - Materiais funcionais, 12, 14
 - Materiais imitadores, 12, 87
 - Materiais leves, 11, 43, 71
 - Materiais naturais, 257
 - Materiais renováveis, 13, 223
 - Materiais resistentes a altas temperaturas, 11
 - Materiais translúcidos, 130, 150, 206–207, 209, 212, 220, 223, 228
 - Materiais transparentes, 130, 148, 150, 203, 209, 212, 214, 216, 217, 223, 224, 228, 279
 - Matriz material/processo, 113, 114, 115
 - MDS (escala multidimensional), 58, 80–81, 165
 - Mercados saturados, 9
 - Metais, 57, 75, 81, 87, 97
 - adesão, 288, 292–295
 - amorfos, 260
 - anodização, 328
 - brasagem, 306
 - camada de revestimento, 332–337
 - cauterização, 338
 - conformação, 282
 - eletro galvanização, 323
 - espumas, 164, 165, 259
 - extrusão, 281
 - fundição, 259, 266
 - junção por difusão, 313
 - Metalurgia do pó, 285
 - polimento, 329–331
 - refratários, 277
 - soldagem, 300
 - Metais amorfos, 12, 159, 160, 260
 - Metais refratários, 277, 285, 304
 - Metalização, 323
 - Metalização a vapor, 323
 - Metalização de PVD, 323
 - Métodos de aspersão (spray), 284
 - Métodos de fabricação flexíveis, 10
 - Métodos de laminação de compósitos, 146, 284
 - Métodos de laminação de compósitos, 284
 - Micrografias, 32
 - Microssistemas eletromecânicos, 11
 - Miniaturização, 11, 13, 21
 - Modelagem, 34, 43, 91–93
 - Modelagem por deposição de material fundido, 287
 - Modelos de superfícies tridimensionais, 34
 - Modelos de superfícies, 34
 - Módulo de elasticidade, 59, 180, 184, 186, 188
 - Módulo de flexão, 150
 - Módulo de Young, 180
 - Moldagem, 97, 114, 197, 198, 270–275
 - Moldagem de espuma expandida, 236, 273
 - Moldagem por bolsa a vácuo, 284
 - Moldagem por compressão, 198, 236, 248, 274
 - Moldagem por difusão, 313
 - Moldagem por injeção, 163–169
 - Moldagem por injeção, 97, 98, 114, 266, 270
 - Moldagem por sopro, 97, 206–207, 219, 222, 234, 236, 272
 - Moldagem por sopro e extrusão, 272
 - Moldagem por transferência de resina, 198, 275
 - Moldagem rotacional, 113, 234, 271
 - Motores elétricos, 10, 22
 - Móveis de escritório, 144–147
 - Museus, 40, 41
- N**
- Náilon, 78, 153, 155, 216, 287
 - Natureza, 44
 - Necessidade, 9, 10, 11, 18, 33–34, 36, 108
 - veja também* Querer
 - Niquelação, 324
 - Novos materiais, 10, 56, 158–169, 255
- O**
- Objetivos, 124, 125, 128, 136–137, 138, 140, 144
 - Objetos simbólicos, 3
 - Observação, 30–31
 - Obsolescência, 68, 69
 - Olfato, 76
 - Otimização, 9, 13, 34, 59
 - Otimização multiobjetivos, 136, 140
 - Ouro, 30, 38, 87, 35
 - Óxidos, 206–207
 - Óxidos de metais, 100, 206–207
- P**
- Padrões, 71, 72–73
 - Padrões ISO, 55, 72
 - Padronização, 118
 - Painel semântico, 42, 112, 119
 - Parafusos, 99, 152, 250, 298
 - Participação de mercado, 4, 23
 - Patins com rodas em linha, 154, 156
 - Pau-brasil, 150, 151
 - Pedra, 77, 98, 105
 - Pensamento visual, 31–33
 - veja também* Mapeamento
 - Percepção, 29, 30–31, 83–85, 98, 112, 130, 174
 - Perfis
 - adesões, junção, 292–313
 - conformação, 270–287
 - materiais, 196–265
 - Permeabilidade magnética, 247, 327
 - Personalidade, 2, 4, 5, 39, 81–86, 112, 174
 - Personalização, 70
 - Peso, 30, 37, 84, 145–146, 154, 155, 197, 245, 246, 259, 260, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287

- Pespontar, 296
 Pesquisa científica, 9
 Pesquisa e desenvolvimento, 10, 11, 14
 Pictogramas, 64
 Pintura, 332-334
 Pintura à base de água, 333
 Pintura à base de solvente, 332
 Placas, junção, 290
 Plásticos, 167, 199
 veja também Polímeros
 Poliamida (PA), 216
 Policarbonato (PC), 218
 Policloropreno, 235
 Poliestercetona (PEEK), 203, 238
 Poliésteres, 197, 198, 203, 228
 Poliestireno (PS), 212
 Polietileno (PE), 155, 209, 236
 Polimento, 329-331, 329
 Polimento elétrico, eletropolimento, 330
 Polimento mecânico, 329
 Polimento químico, 329, 331, 339
 Polímeros, 21, 22-23, 180
 adesão, 292-295
 atributos estéticos, 76, 80
 cauterização, 338
 classificação, 197-203
 espumas, 57, 63, 67, 76, 77, 236-237
 extrusão, 281
 fundição, 276-279
 galvanização, 324
 reforçado com fibras, 58, 144, 151, 160, 203, 255
 revestimentos, 333
 soldagem, 98, 160, 300, 301, 303, 304, 305
 Polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP), 75, 78, 140, 160
 Polímeros reforçados com fibra de vidro, 151, 255
 Polímeros reforçados com partículas, 58
 Polimetilmetacrilato (PMMA), 217
 Polioximetileno (POM), 218, 219
 Polipropileno (PP), 210
 Politetrafluoretileno (PTFE), 220
 Poliuretano (PU), 225
 Preocupações com a saúde, 19
 Processo cortar e selar, 304
 Processo de projeto, 9, 10, 15, 17, 33-36, 45, 87
 Processos, 4, 14, 45, 95, 96, 97, 98
 Processos baseados em laser, 160
 Processos de pensamento, 5, 12, 29-33, 34
 Processos de superfície, 97, 98, 99
 Produção, 14, 56, 205
 veja também Produção em massa
 Produção em massa, 17, 127, 144, 300
 Produtos
 atributos, 126
 coleções, 18
 desenvolvimento, 34
 diferenciação, 15, 18
 personalidade, 4, 15, 30, 38
 requisitos, 34, 72
 Produtos médicos, 160
 Projeto, 1, 8, 28, 56, 60, 62, 63, 66, 67, 68, 70, 87, 115, 116, 119, 142, 167, 175
 Projeto assistido por computador (Computer aided design — CAD), 43, 286, 287
 Projeto conceitual, 34
 Projeto de engenharia, 29
 veja também Projeto técnico
 Projeto técnico, 5, 15, 29, 30, 57, 60
 Propriedade intelectual, 14
 Propriedades mecânicas, 280
 Propriedades que dependem do tempo, 160
 Prototipagem, 43, 286, 287
 Prototipagem por deposição, 287
 Prototipagem rápida, 43, 160, 286-287
 Publicidade, 39, 120, 336, 338
 Pultrusão, 147, 198, 204
- Q**
 Qualidade, 10, 12, 17, 18, 20, 21, 46, 55, 67, 70, 78, 87, 100, 118, 119, 236, 240, 278, 279, 284, 312, 319
 Qualidade de vida, 17
 Querer, 10
 veja também Desejar; Precisar
- R**
 Raciocínio dedutivo, 30, 32, 133
 Raciocínio indutivo, 44
 Rebites, 119, 145, 150, 245, 297
 Reciclagem, 13, 72, 127
 Reconhecimento de padrões, 57
 Recursos de ensino, 5
 Recursos naturais, 68-69
 Refletividade, 67, 78-79, 98, 101, 240, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 251, 259, 260, 262, 318, 319, 320, 321, 323, 324, 328, 329, 330, 331, 334, 337
 Regulamentação, 13
 Relógios digitais, 11
 Relógios, 18
 Repuxamento a frio, 281
 Resíduos de produtos, 12, 13, 72, 272
 Resiliência, 85, 86, 93, 128, 148, 149, 173, 186, 210, 222, 233, 284
 Resinas fenólicas, 230, 293
 Resistência a abrasão, 84, 210, 219, 222, 225, 233, 243, 252, 256
 Resistência a arranhões, 337
 Resistência a corrosão, 34, 57, 238, 240, 242, 247, 255, 260, 262, 324, 334, 337
 Resistência a fadiga, 219, 228, 238
 Resistência a impacto, 206-207, 292
 Resistência a solventes, 209, 216, 224, 225, 234, 293
 Resistência ao desgaste, 153, 252, 324, 327, 329
 Restrições, 62, 107, 109, 110, 112, 115, 128, 131, 136-137, 144, 149, 151, 152, 174, 218
 Reutilização de materiais, 4
 veja também Reciclagem
 Revestimento de polímero por chama, 335
 Revestimento em leito fluidificado, 335, 336
 Revestimento por pó, 335
 Revestimento por pó, 335-336
 Revistas, 41, 83, 150
 Rigidez, 56, 58, 85, 86, 92, 154, 155, 165, 182, 198, 203, 209, 210, 214, 236, 238
 Risco, 14, 19, 29, 73, 82, 153, 160, 161

S

Saturação do mercado, 9, 15, 19, 21
Secadores de cabelo, 22, 168
Segurança, 128, 144, 212, 214, 217, 218, 223, 236, 247
Seleção
 por análise, 129-130, 133, 136-141, 145, 148-150
 por inspiração, 131-132, 133
 por similaridade, 130-131, 133, 150-152, 155
 por síntese, 130, 133, 145-147, 152-154
Sensibilidade ao custo do material, 161, 162
Sensores, 20, 23, 64
Série cromática, 177
Serigrafia, 100, 318, 319, 320, 322, 337
Silicato de sódio, 252, 277
Silicones, 227, 294
Similaridade, em seleção de materiais, 130-131, 133, 150-152, 155
Sinterização, 206-207, 252, 285
Sinterização seletiva a laser, 286
Síntese, em seleção de material, 128, 130, 131, 133, 145-147, 152-154
Solda MIG, 309
Soldadura de refluxo, 307
Soldadura, 307
Soldagem, 160, 219, 242, 308-312, 313
Soldagem a arco, 309, 310
Soldagem a gás inerte de tungstênio (TIG), 310
Soldagem a gás quente, 300
Soldagem de metal por arco elétrico a gás de proteção (MIG), 309
Soldagem manual a arco elétrico com metal, 308
Soldagem manual a arco elétrico com metal, 308
Soldagem por barra quente, 301
Soldagem por costura, 311
Soldagem por feixe de elétrons, 304, 305
Soldagem por feixe de energia, 304-305
Soldagem por fricção inercial, 312
Soldagem por fricção, 312
Soldagem por placa quente, 302
Soldagem por pontos, 311
Soldagem por projeção, 311
Soldagem por resistência, 311
Soldagem por ultrassom, 219, 303
Soldagem TIG, 310
Soluções estruturais, 4
Som, audição, 65-66, 80-81, 92
Supercola, 293
Superfícies, 67, 99-100
Superfícies bioativas (biopassivas), 12
Superfícies irregulares, 319, 321
Sustentabilidade, 12-13, 68-76
Swatch, 18

T

Tamanhos de lotes, 97, 266, 270, 272, 276, 277, 278, 282, 283, 284
Tampografia, 319
Taxa de crescimento global, 12
Tecidos, 296
Técnicas de montagem em escala nano, 12
Tecnologia de mostradores, 160

Tecnologia, 11-12, 19, 20, 22, 69, 130, 160, 168, 196, 272
Telefones celulares (portáteis), 18-19
Tenacidade, 57, 58, 119, 128, 155, 184, 203, 209, 210, 212, 214, 216, 217, 218, 219, 220, 222, 223, 224, 225, 227, 228, 230, 234, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 252, 254, 259, 260, 264, 265, 333
Tenacidade a fratura, 155, 184
Tensão, 36, 105, 107, 205, 206-207, 292, 296
Tensão de cisalhamento, 292, 307
Tensão de escoamento, 93, 137, 138, 182, 260, 262, 264, 265, 299
Termoconformação, 283
Termoconformação a vácuo, 214, 283
Termoconformação auxiliada por tampão, 283
Termoconformação sob pressão, 283
Termofixos
 adesivos, 293
 conformação, 198
Termoplásticos
 adesivos, 295
 elastômeros, 198-199, 234
 fundição, 279
 moldagem, 198
 prototipagem, 286, 287
 revestimento por pó, 335
 revestimentos, 335
 soldagem, 300, 301, 302, 303, 304
 termoconformação, 283
Textura, 39, 41, 42, 43, 67, 112, 116, 127, 152, 318-324, 329-333, 335, 337-339
Tijolo, 75, 105, 106, 205, 206-207
Tipo de fontes, 64
Tipologia, 118, 119
Tom, 80, 92
Toque, 20, 76
 veja também Tato
Toque, 66, 76-77, 91
 veja também Apelo tátil
Toxidez, 336
Transferências, 148, 320, 321
Transição dúctil para frágil, 153

U

União de encaixe, 299
União mecânica, 297, 313
Utilidade, 3, 36, 39, 209, 210

V

Vedações, 292
Veículos militares, 116, 119
Viabilidade, 13, 14
Vibrações, 65, 66, 236, 257
Vidro de cal de soda, 254
Vidro de sílica, 254
Vidro de silicato de boro, 205, 252, 254
Vidros, 77-78
Visualização, 108, 109, 112, 174
Vitrocerâmicas, 254
Vulcanização, 198