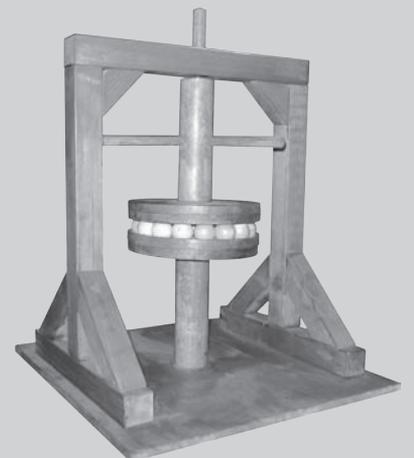


INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS METÁLICOS

CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
WALMAN BENÍCIO DE CASTRO
MARCELO FALCÃO DE OLIVEIRA

Blucher

INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS METÁLICOS



CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
WALMAN BENÍCIO DE CASTRO
MARCELO FALCÃO DE OLIVEIRA

INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS METÁLICOS

Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos
 © 2013 Claudio Shyinti Kiminami
 Walman Benício de Castro
 Marcelo Falcão de Oliveira
 Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1.245, 4º andar
 04531-012 – São Paulo – SP – Brasil
 Tel.: 55 (11) 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
 do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
 Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem
 autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela
 Editora Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Kiminami, Claudio Shyinti
 Introdução aos processos de fabricação de produtos
 metálicos / Claudio Shyinti Kiminami, Walman Benício de
 Castro, Marcelo Falcão de Oliveira – São Paulo: Blucher, 2013

Bibliografia.
 ISBN 978-85-212-0682-8

1. Metalurgia 2. Engenharia de materiais 3. Metais -
 produtos 4. Usinagem 5. Fundição 6. Metalurgia do pó
 I. Título II. Castro, Walman Benício de III. Oliveira, Marcelo
 Falcão de

12-0118

CDD-669

Índices para catálogo sistemático:

| | |
|------------------------------------|--------|
| 1. Metalurgia | 669 |
| 2. Metais: produtos | 669 |
| 3. Engenharia de materiais: metais | 620.11 |

Prefácio

Os Processos de Fabricação de Produtos Metálicos, com enfoque metalúrgico, pertencem ao conteúdo programático de diversas disciplinas dos cursos de graduação em Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Engenharia de Materiais, Desenho Industrial, Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Especialização em Engenharia Mecânica, Especialização em Engenharia de Materiais, entre outros. Nós, os autores, ministrando essas disciplinas por mais de 20 anos nesses cursos na Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal da Paraíba, Universidade Federal de Campina Grande e Universidade de São Paulo, pudemos aperfeiçoar um ordenamento dos conceitos e informações envolvidos na temática que acreditamos ser uma forma muito boa para transmitir esses conhecimentos aos alunos. Na forma de apostilas, a didática utilizada no presente livro foi testada e validada por mais de 7 anos.

Para a fabricação de produtos metálicos, são usados metais e ligas metálicas e processos que visam não só a dar forma com a precisão que o produto requer, mas também a conferir a este o conjunto de propriedades que o seu uso exige. As propriedades dependem do tipo de metal ou liga (de sua composição química) e, também, de sua microestrutura. A microestrutura, por sua vez, depende do histórico térmico/mecânico sofrido pelo metal durante o processamento. E as propriedades determinarão o desempenho do produto quando em uso.

Assim, no primeiro capítulo o conceito fundamental sobre a relação existente entre a composição química e microestrutura – processamento – propriedades – aplicação/desempenho do material é tratada. Nos capítulos seguintes são tratados os principais grupos de processos existentes: Fundição, Conformação Plástica, Usinagem, Soldagem e Corte, e Metalurgia do Pó. Embora a disciplina Ciência dos Materiais seja um prerequisite ao estudo dos Processos de Fabricação, a experiência nos mostra a importância de uma breve revisão sobre os fundamentos metalúrgicos envolvidos em cada grupo de processos, o que foi feito em cada capítulo. Também ao final de cada capítulo do grupo de processo específico, um caso – estudo de fabricação de um produto, cujo processamento principal é o tratado no capítulo, é apresentado. Um capítulo final com diversos casos – estudo de fabricação de produtos metálicos selecionados foi também incluído. Nesses casos – estudos, as etapas e rotas de fabricação de um determinado produto são apresentadas, assim como também uma discussão, sob o ponto de vista ampliada da correlação Processo – Composição – Microestrutura – Propriedade – Desempenho.

Acreditamos que também para as disciplinas em que os Processos são tratados específica e profundamente (como disciplinas de Fundição, Metalurgia do Pó, Soldagem, Conformação e Usinagem), o presente livro poderá ser usado para que o aluno tenha uma visão geral do processo específico que está estudando, assim como poderá contextualizar nas diversas rotas possíveis de fabricação o que está sendo estudado. Também acreditamos que esse livro possa atender a demanda de informação geral dos processos de fabricação dos profissionais que iniciam a sua atuação nos departamentos de compras de empresas, tendo, portanto, de tratar geralmente com uma série de fornecedores que envolvem diferentes processos de fabricação.

Os processos de acabamento e montagem, assim como os de tratamentos térmicos e fixação mecânica, embora façam parte da rota de fabricação de um produto metálico, não foram tratados na presente edição.

Os autores

Nota sobre os autores

CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI

Claudio Shyinti Kiminami é Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, UFSCar (1977), Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP (1979) e Doktor-ingenieur pela Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule, RWTH – Aachen, Alemanha (1986), com estágio de pós-doutoramento na Universidade da Flórida, Gainesville, Estados Unidos (1999). Foi professor da Universidade Federal da Paraíba, UFPB, em Campina Grande, de 1979 a 1989, e atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa, da UFSCar, onde trabalha desde 1990. Assumiu vários cargos administrativos na UFSCar, como chefe do DEMa (1996-1998), coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPG-CEM (2002-2004) e membro do Conselho Universitário (1996-1998), Coordenador dos cursos de pós-graduação da UFSCar (2005-2008), Pró-Reitor de Pesquisa da UFSCar (2008-2012). Pesquisador 1A do CNPq, é autor de mais de uma centena de trabalhos publicados em periódicos indexados no tema Solidificação e Fundição tendo enfoque no tema Ligas Amorfas, Metaestáveis e Nanoestruturadas. É orientador credenciado no PPG-CEM (CAPES 7) com orientações de mestres e doutores. Desde 1979 ministra disciplinas nas áreas de Materiais e Processos de Fabricação nos cursos de graduação em Engenharia de Materiais, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção e Desenho Industrial, e também no curso de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

WALMAN BENÍCIO DE CASTRO

Walman Benício de Castro é Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal da Paraíba, UFPB (1988), Mestre em Engenharia Mecânica pela UFPB (1992) e Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, UFSCar (1997). Foi professor da UFPB em Campina Grande, de 1989 a 2001, e atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica, DEM, da Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, desde 2002. Foi membro do Colegiado Pleno da UFCG de 2004 a 2006. Pesquisador 2 do CNPq, é autor de dezenas de trabalhos publicados em periódicos indexados no tema Solidificação e Ligas com Memória de Forma. É orientador credenciado no Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFCG – Campus I, com orientações de mestres e doutores. Desde 1989 ministra disciplinas nas áreas de Materiais e Processos de Fabricação nos cursos de graduação em Engenharia de Materiais, Engenharia Mecânica, Desenho Industrial, e também no curso de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

MARCELO FALCÃO DE OLIVEIRA

Marcelo Falcão de Oliveira é Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, UFSCar (1994), Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais (1997) e Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, com pós-doutoramento na mesma área, também pela UFSCar (2001). Foi professor da Universidade São Francisco em Itatiba, de 2002 a 2004. Em 2005 assumiu o cargo de docente do Departamento de Materiais da Universidade de São Paulo, USP, em São Carlos e em 2011 tornou-se Professor Livre-docente pela mesma universidade. Atualmente é Coordenador do Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e também da USP. Pesquisador nível 2 do CNPq, é autor de dezenas de trabalhos publicados em periódicos indexados nos temas Vidros Metálicos, Cristalização, Ligas Amorfas e Nanocristalinas. É orientador credenciado do Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da EESC/USP, com orientações de mestres e doutores. Desde 2005 ministra disciplinas nas áreas de Materiais e Processos de Fabricação nos cursos de graduação em Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção Mecânica, Engenharia de Materiais e Manufatura e também no curso de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

A nossas esposas e filhos, pelo carinho, suporte e paciência nos períodos de ausência na realização deste trabalho.

Os autores

Agradecimentos

Aos técnicos, Edson Roberto D´Almeida e Diego Coimbra do DEMa/UFSCar, José Silvano Cerqueira Lima e Eliezer Dias Francisco do SMM-EESC-USP, pelo auxílio na preparação de amostras e micrografias.

À Roberta Marcondes Moraes do curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da EESC-USP, pela realização de diversas fotografias que ilustram este livro.

Às empresas Eaton, Faber-Castell, Mahle, Metalpó e Nigro Alumínio, pelas informações que nos ajudaram a desenvolver os casos – estudos.

A todos os alunos de graduação, que passaram pelas nossas disciplinas, por servirem de incentivo para a elaboração deste livro.

À Editora Blucher, por abraçar este projeto e nos ajudar a torná-lo realidade.

Os autores

Conteúdo

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO E OS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO. | 17 |
| 1.1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.2 | ROTAS DE PROCESSAMENTO | 18 |
| 1.3 | RELAÇÃO: COMPOSIÇÃO QUÍMICA – MICROESTRUTURA – PROCESSAMENTO – PROPRIEDADES – DESEMPENHO..... | 23 |
| 1.4 | BIBLIOGRAFIA..... | 27 |
| 2 | FUNDIÇÃO | 29 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 29 |
| 2.2 | FUNDAMENTOS..... | 31 |
| 2.2.1 | Fusão..... | 31 |
| 2.2.2 | Vazamento..... | 34 |
| 2.2.3 | Solidificação | 35 |
| 2.3 | FUNDIÇÃO EM AREIA..... | 39 |
| 2.4 | FUNDIÇÃO EM CASCA OU <i>SHELL</i> | 44 |
| 2.5 | FUNDIÇÃO EM MATRIZ POR GRAVIDADE..... | 46 |
| 2.6 | FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO..... | 48 |
| 2.7 | FUNDIÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO..... | 49 |
| 2.8 | FUNDIÇÃO DE PRECISÃO | 50 |
| 2.9 | OUTROS PROCESSOS | 53 |
| 2.9.1 | Conformação por <i>spray</i> | 53 |
| 2.9.2 | Tixofundição | 54 |
| 2.9.3 | Fundição em Molde Cheio | 56 |
| 2.10 | CASO – ESTUDO: EIXO DO COMANDO DE VÁLVULAS..... | 57 |
| 2.10.1 | Apresentação do produto | 57 |
| 2.10.2 | Características e propriedades exigidas..... | 57 |
| 2.10.3 | Material | 59 |
| 2.10.4 | Processo de fabricação | 61 |
| 2.11 | BIBLIOGRAFIA..... | 66 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3 | CONFORMAÇÃO PLÁSTICA | 67 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 67 |
| 3.2 | FUNDAMENTOS..... | 69 |
| 3.2.1 | Deformação plástica | 69 |
| 3.2.2 | Temperatura de conformação..... | 70 |
| 3.2.3 | Atrito e lubrificação | 74 |
| 3.3 | LAMINAÇÃO | 74 |
| 3.3.1 | Laminação convencional..... | 74 |
| 3.3.2 | Processo Manesmann..... | 77 |
| 3.3.3 | Laminação de roscas..... | 78 |
| 3.3.4 | Laminação transversal..... | 79 |
| 3.4 | FORJAMENTO..... | 80 |
| 3.4.1 | Forjamento em matriz aberta ou livre..... | 80 |
| 3.4.2 | Forjamento em matriz fechada..... | 81 |
| 3.4.3 | Operações correlatas | 83 |
| 3.5 | EXTRUSÃO | 84 |
| 3.6 | TREFILAÇÃO | 89 |
| 3.7 | CONFORMAÇÃO DE CHAPAS FINAS | 92 |
| 3.7.1 | Corte de chapas | 94 |
| 3.7.2 | Dobramento | 95 |
| 3.7.3 | Estampagem profunda ou embutimento..... | 95 |
| 3.7.4 | Processos correlatos | 97 |
| 3.8 | CASO – ESTUDO: CORPO DE PANELA DE PRESSÃO | 98 |
| 3.8.1 | Apresentação do produto | 98 |
| 3.8.2 | Características e propriedades exigidas..... | 100 |
| 3.8.3 | Material | 101 |
| 3.8.4 | Processo de fabricação | 102 |
| 3.9 | BIBLIOGRAFIA..... | 104 |
| 4 | USINAGEM | 105 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 105 |
| 4.2 | FUNDAMENTOS..... | 108 |
| 4.2.1 | Formação do cavaco e o material a ser usinado | 108 |
| 4.2.2 | Materiais para ferramentas de corte | 109 |
| 4.2.3 | Fluidos de corte | 112 |
| 4.2.4 | Usinabilidade..... | 112 |
| 4.3 | TORNEAMENTO | 113 |
| 4.4 | FRESAMENTO..... | 117 |
| 4.5 | APLAINAMENTO..... | 119 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.6 | FURAÇÃO | 120 |
| 4.7 | RETIFICAÇÃO | 122 |
| 4.8 | SERRAMENTO | 124 |
| 4.9 | PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS DE USINAGEM | 125 |
| 4.10 | CASO – ESTUDO: ENGRENAGEM DA CAIXA DE TRANSMISSÃO | 127 |
| 4.10.1 | Apresentação do produto | 127 |
| 4.10.2 | Características e propriedades exigidas..... | 128 |
| 4.10.3 | Material | 129 |
| 4.10.4 | Processo de fabricação | 130 |
| 4.11 | BIBLIOGRAFIA..... | 134 |
| 5 | SOLDAGEM E CORTE..... | 135 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 135 |
| 5.2 | FUNDAMENTOS..... | 136 |
| 5.2.1 | Fontes de energia | 136 |
| 5.2.2 | Gases de proteção..... | 139 |
| 5.2.3 | Revestimentos e fluxos | 142 |
| 5.2.4 | Metalurgia da soldagem | 142 |
| 5.3 | PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO | 144 |
| 5.3.1 | Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SAER)..... | 144 |
| 5.3.2 | Soldagem a Arco Submerso (SAS)..... | 146 |
| 5.3.3 | Soldagem a Arco com Arame Tubular (SAT)..... | 147 |
| 5.3.4 | Soldagem a Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (SATG) | 148 |
| 5.3.5 | Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (SAMG) | 149 |
| 5.3.6 | Soldagem a Arco Plasma (SAP) | 150 |
| 5.3.7 | Soldagem por Eletroescória (SEE) | 150 |
| 5.3.8 | Soldagem por Resistência por Ponto (SRP), por Costura (SRC) e por Projeção (SRPR) | 152 |
| 5.3.9 | Soldagem a Arco por Centelhamento (SAC) | 153 |
| 5.3.10 | Soldagem por Feixe de Elétrons (SFE) | 154 |
| 5.3.11 | Soldagem por Laser (SL)..... | 155 |
| 5.3.12 | Soldagem por Indução (SIN)..... | 156 |
| 5.3.13 | Soldagem por Oxi-Gás (SOG)..... | 156 |
| 5.3.14 | Soldagem por Aluminotermia (SAL)..... | 158 |
| 5.4 | PROCESSOS DE SOLDAGEM NO ESTADO SÓLIDO..... | 159 |
| 5.4.1 | Soldagem por Fricção (SFRI)..... | 159 |
| 5.4.2 | Soldagem por Explosão (SEXP) | 160 |
| 5.4.3 | Soldagem por Fricção-Mistura (FSW) | 161 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.5 | BRASAGEM E SOLDA BRANDA..... | 162 |
| 5.5.1 | Brasagem..... | 162 |
| 5.5.2 | Solda Branda..... | 163 |
| 5.6 | PROCESSOS DE CORTE..... | 165 |
| 5.6.1 | Oxi-corte..... | 165 |
| 5.6.2 | Corte com Eletrodo de carvão..... | 166 |
| 5.6.3 | Corte a Plasma..... | 166 |
| 5.7 | CASO – ESTUDO: QUADRO DE BICICLETA..... | 167 |
| 5.7.1 | Apresentação do produto..... | 167 |
| 5.7.2 | Características e propriedades exigidas..... | 167 |
| 5.7.3 | Material..... | 168 |
| 5.7.4 | Processo de fabricação..... | 171 |
| 5.8 | BIBLIOGRAFIA..... | 175 |
| 6 | METALURGIA DO PÓ..... | 177 |
| 6.1 | INTRODUÇÃO..... | 177 |
| 6.2 | FUNDAMENTOS..... | 177 |
| 6.2.1 | Densidade de compactação..... | 177 |
| 6.2.2 | Mecanismos de sinterização..... | 180 |
| 6.3 | PÓS METÁLICOS..... | 183 |
| 6.4 | MISTURA..... | 187 |
| 6.5 | COMPACTAÇÃO..... | 187 |
| 6.6 | SINTERIZAÇÃO..... | 188 |
| 6.7 | OPERAÇÕES SECUNDÁRIAS..... | 191 |
| 6.8 | OUTROS PROCESSOS..... | 192 |
| 6.8.1 | Laminação de pós..... | 192 |
| 6.8.2 | Prensagem isostática..... | 192 |
| 6.8.3 | Moldagem de pós por injeção..... | 193 |
| 6.9 | APLICAÇÕES..... | 194 |
| 6.10 | CASO – ESTUDO: BUCHA AUTOLUBRIFICANTE..... | 195 |
| 6.10.1 | Apresentação do produto..... | 195 |
| 6.10.2 | Características e propriedades exigidas..... | 197 |
| 6.10.3 | Material..... | 197 |
| 6.10.4 | Processo de fabricação..... | 198 |
| 6.11 | BIBLIOGRAFIA..... | 200 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | CASOS – ESTUDOS | 203 |
| 7.1 | PISTÃO DE MOTOR | 203 |
| 7.1.1 | Apresentação do produto | 203 |
| 7.1.2 | Características e propriedades exigidas | 203 |
| 7.1.3 | Material | 206 |
| 7.1.4 | Processo de fabricação | 207 |
| 7.2 | PONTA DE CANETA ESFEROGRÁFICA..... | 212 |
| 7.2.1 | Apresentação do produto | 212 |
| 7.2.2 | Características e propriedades exigidas..... | 212 |
| 7.2.3 | Material | 213 |
| 7.2.4 | Processo de fabricação | 215 |
| 7.3 | ROLAMENTO..... | 219 |
| 7.3.1 | Apresentação do produto | 219 |
| 7.3.2 | Características e propriedades exigidas..... | 221 |
| 7.3.3 | Material | 223 |
| 7.3.4 | Processo de fabricação | 224 |
| 7.4 | FILAMENTO DE LÂMPADA INCANDESCENTE | 230 |
| 7.4.1 | Apresentação do produto | 230 |
| 7.4.2 | Características e propriedades exigidas..... | 231 |
| 7.4.3 | Material | 231 |
| 7.4.4 | Processo de fabricação | 231 |
| 7.5 | BIBLIOGRAFIA..... | 235 |

1

Especificações do produto e os processos de fabricação

1.1 INTRODUÇÃO

Para a fabricação de produtos metálicos são usados processos que visam dar forma (geometria, dimensões, acabamento superficial) ao metal puro ou liga metálica com as especificações estabelecidas para o produto, e também conferir a este o conjunto de propriedades (resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade etc.) exigido para o seu bom desempenho.

A forma de um produto metálico pode ser diversa, alguns com geometrias simples, como de fios condutores elétricos, e outros com geometrias complexas, como do bloco de um motor de automóvel; alguns com dimensões pequenas, como de filamento de lâmpada incandescente, com dimensões de algumas dezenas de micrômetros de espessura, e alguns com grandes dimensões, como um rotor de turbina de hidroelétrica com vários metros de diâmetro; alguns com precisão dimensional bastante rigorosa, como da ponta de uma caneta esferográfica ou dos dentes de uma engrenagem, e outros com precisão dimensional pouco rigorosa, como de uma tampa de bueiro fundida ou uma enxada forjada; alguns com acabamento superficial bastante fino, como de uma joia ou talheres, e outros sem nenhuma exigência de acabamento superficial controlado, como martelos ou marretas forjadas.

As propriedades especificadas para um determinado produto metálico podem envolver propriedades mecânicas (resistência mecânica, dureza, tenacidade, resistência à fadiga, resistência à fluência, módulo de elasticidade e capacidade de amortecimento), propriedades não mecânicas (térmicas, óticas, magnéticas, elétricas), propriedades de superfície (resistência à corrosão, oxidação, fricção, abrasão, desgaste), propriedades estéticas (aparência, textura), propriedades de produção

(facilidade de fabricação, de união, de acabamento, de montagem) e propriedades ou atributos econômicos (preço e disponibilidade do material e de processos).

Os produtos podem envolver um só tipo de material e poucos processos diferentes para a sua fabricação, como são os casos de um clip de papel, parafuso e agulha; como também envolver vários materiais, várias peças e vários processos diferentes, como são os casos de uma bicicleta, um carro, uma lavadora de roupas e um avião. Na fabricação desses últimos produtos são envolvidos dois grupos de operações: operações de processamento, que visam dar forma e controlar a microestrutura das peças, portanto, controlar as propriedades; e operações de montagem, que unem as diversas partes.

Assim sendo, existe uma relação complexa e importante a ser considerada para a seleção do material e da rota de processamento, que é a relação entre as especificações do produto (forma, propriedades), metal ou composição da liga e os processos de fabricação.

1.2 ROTAS DE PROCESSAMENTO

A Figura 1.1 apresenta esquematicamente um fluxograma de rotas de fabricação dos produtos metálicos, no qual os fenômenos metalúrgicos, os processos e alguns exemplos de produtos das diversas etapas de fabricação são apresentados. Nessa figura foi incluída também a etapa de obtenção dos metais e ligas pela redução do minério. De maneira geral a fabricação de um determinado produto envolve uma sequência de processos metalúrgicamente distintos, mas interdependentes, pois o histórico térmico e mecânico do material em processos anteriores influencia os posteriores.

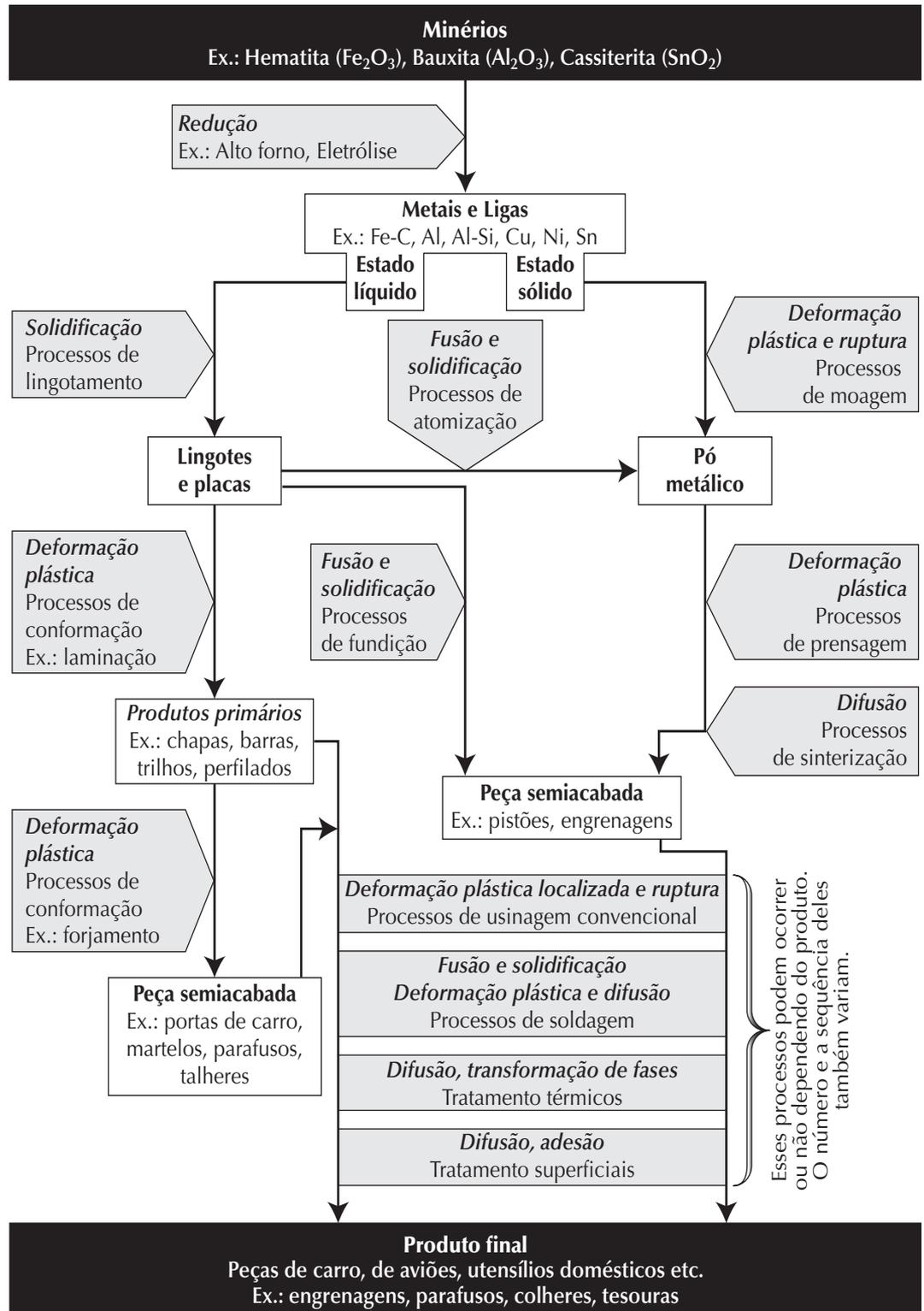
O fluxograma mostra primeiramente a etapa em que os metais e ligas são obtidos. Os metais puros (elementos metálicos), com raras exceções, como, por exemplo, níquel e ferro dos meteoritos, não ocorrem na natureza em sua forma pura, mas geralmente na forma de óxidos (Hematita, Fe_2O_3 ; Bauxita, Al_2O_3 ; Cassiterita, SnO_2), sulfetos (Calcopirita, CuFeS_2 ; Galena, PbS), entre outros. Processos de redução são empregados para a separação dos elementos metálicos puros (Al, Cu, Ni, Sn) ou combinados com um segundo elemento (por exemplo, Fe-C).

As combinações de elementos metálicos com outros elementos (metálicos e também com pequenas quantidades de não metais) são chamadas de “ligas”. As ligas, pela combinação de elementos, possibilitam a ampliação de propriedades possíveis de serem alcançadas pelos metais puros para atender às especificações dos produtos metálicos, como, por exemplo, aumento de dureza por mecanismos de endurecimento, ou aumento de resistência à corrosão pela adição de elementos formadores de filmes passivos. As Figuras 1.2 e 1.3 apresentam as duas grandes famílias de ligas metálicas, a de ligas ferrosas e a de ligas não ferrosas, usadas para a fabricação de produtos.

Os fenômenos metalúrgicos envolvidos em cada processo de fabricação estão indicados no fluxograma da Figura 1.1 em tom de cinza, sendo eles: fusão, solidificação, deformação plástica, ruptura, difusão e transformação de fases no estado sólido. Os processos indicados no fluxograma são: lingotamento, atomização, moagem, conformação, fundição, prensagem, sinterização, usinagem e corte, soldagem e tratamentos térmicos e superficiais, através dos quais é dada forma especificada (geometria, dimensões e acabamento superficial) e microestrutura adequada ao metal ou liga metálica.

Figura 1.1

Fluxograma de rotas para fabricação de produtos metálicos. Os fenômenos metalúrgicos estão indicados pelos quadros em tom cinza.



Os metais e ligas, a partir do estado líquido são, por **processos de lingotamento**, solidificados na forma de placas (0,05 a 0,30 m de espessura, 0,30 a 4 m de largura e comprimento de alguns metros) ou ainda na forma de lingotes (blocos com 0,10 a 0,30 m de largura, 0,10 a 0,30 m de altura e comprimento de 0,60 a 2 m). Os lingotes podem ser transformados, por **processos de conformação**, produzindo barras, trilhos e perfilados. Aplicando sequencialmente outros **processos de conformação**, chapas e barras podem ser transformadas em muitos

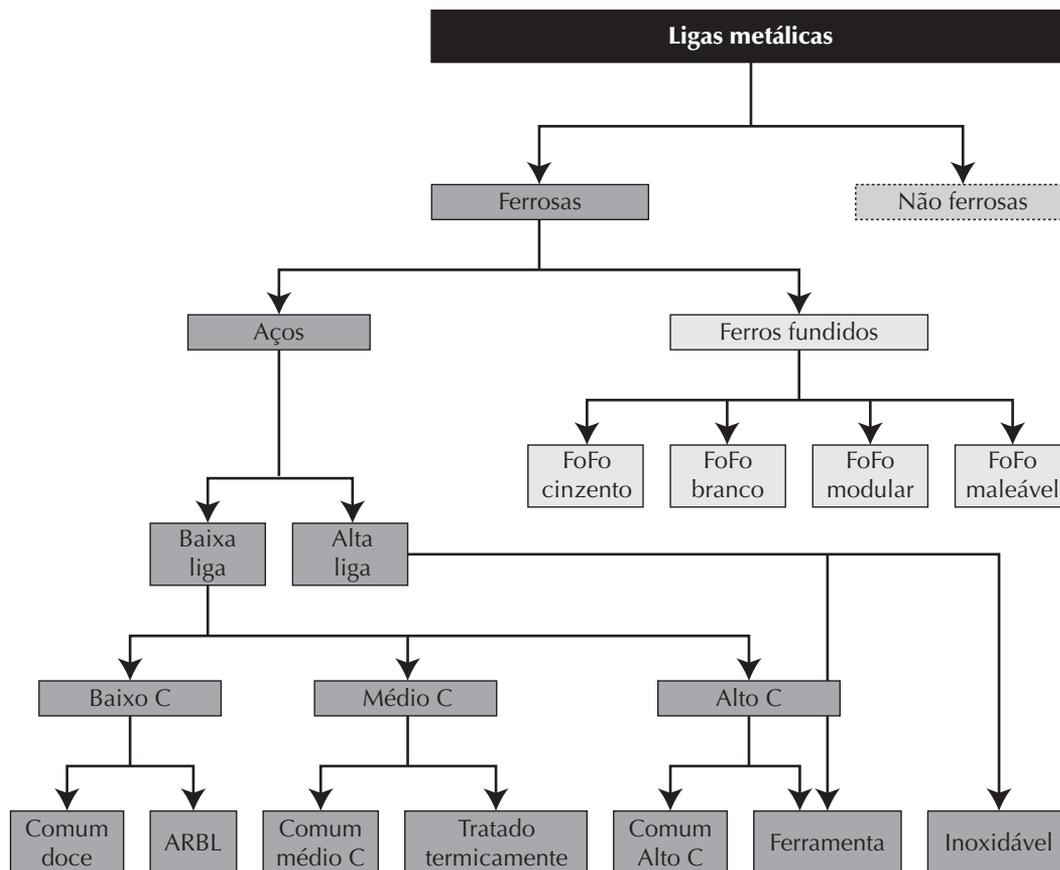


Figura 1.2
 Família de ligas ferrosas existentes para fabricação de produtos metálicos. (FoFo = ferro fundido; ARBL = liga de alta resistência e baixa liga).

outros produtos como, portas de carros, bielas, parafusos e talheres. Outra possibilidade é a produção de ligas pela refusão e mistura de lingotes de diferentes metais ou ainda pela adição de outros elementos que, por sua vez, são transformados em produtos semiacabados por **processos de fundição**; esses **fundidos**, após operação de acabamento, dão origem a diversos produtos como pistões e blocos de motor.

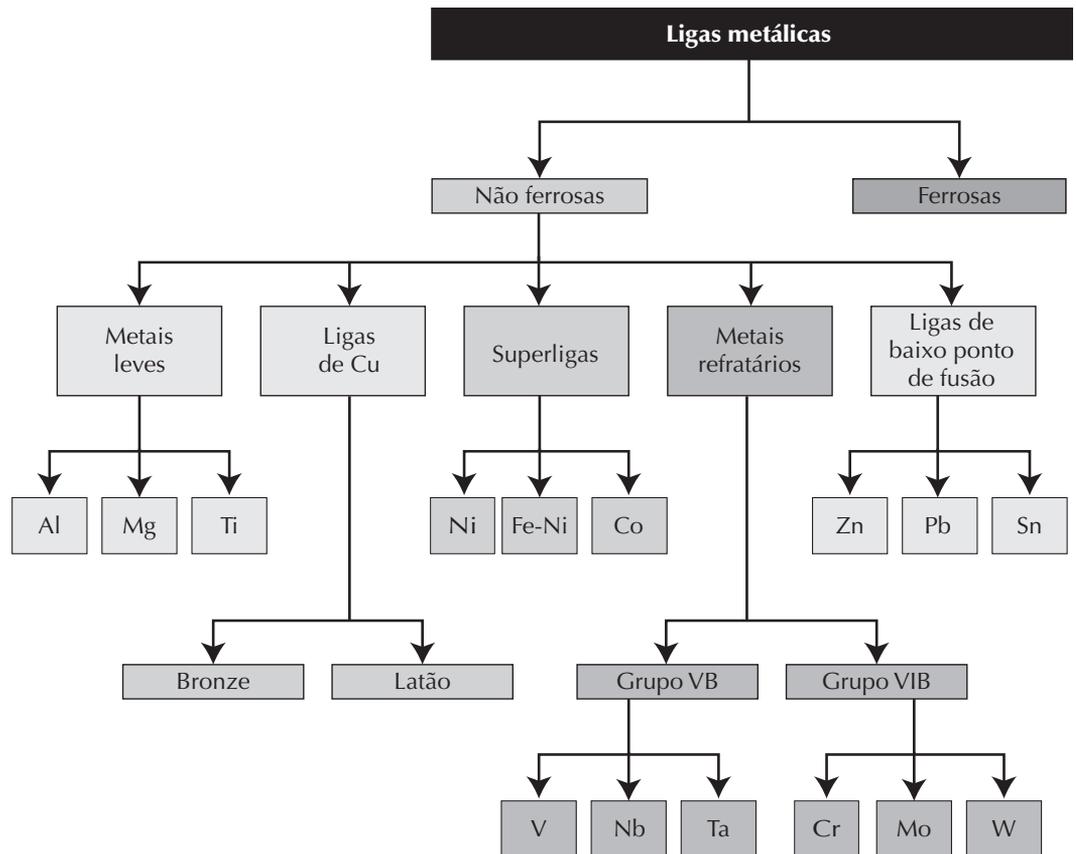
Outra rota de fabricação, depois do lingotamento, é a produção de pós metálicos através de processos denominados de atomização, nos quais o metal (ou liga) fundido é pulverizado em pequenas gotículas que se solidificam. Em alguns casos, esses pós metálicos também podem ser obtidos a partir da moagem, diretamente depois de processos de redução. As ligas ou metais na forma de pó são a matéria prima dos processos de **metalurgia do pó** que, por compactação e sinterização, produzem peças como buchas autolubrificantes e filtros metálicos.

Os **processos de usinagem** são utilizados para fabricação de determinados produtos que exigem, em alguns casos, de precisão dimensional (por exemplo, certos tipos de engrenagens e parafusos) e também para dar acabamento (ajuste das geometrias, dimensões e acabamento superficial) às peças semiacabadas. Os **processos de soldagem** são usados para a união de peças na fabricação de produtos mais complexos e, em alguns casos, de grandes dimensões.

A adequação da microestrutura, para conferir ao produto as propriedades especificadas, pode requerer ainda **tratamentos térmicos e tratamentos superficiais**.

As principais rotas de fabricação de produtos metálicos são os processos de fundição, de soldagem, de conformação plástica, de usinagem e metalurgia do pó.

Figura 1.3
Família de ligas não ferrosas existentes para fabricação de produtos metálicos.



Fundição é um processo no qual a liga fundida é vazada, isto é, vertida por gravidade ou injetada sob pressão, para dentro de um molde onde se solidifica na forma da cavidade desse molde. A fundição é usada para fabricação de peças de ligas de alumínio (pistões de motores), de aços (turbinas de hidroelétricas), de ferro fundido (blocos de motor, discos de freio), de ligas de cobre (conectores elétricos), de ligas de níquel (palhetas de turbina de aviões), de ligas de titânio (próteses) e outras.

Processos de conformação são processos de fabricação nos quais uma intensa força é aplicada na liga metálica no estado sólido provocando sua deformação plástica (deformação permanente) e, assim, mudando a sua forma até aquela da peça desejada. Esses processos usam uma ferramenta, geralmente chamada de matriz, com que se aplicam as forças necessárias. O metal, então, se deforma e toma a forma determinada parcialmente ou quase totalmente pela geometria da matriz. Os processos de conformação podem ser divididos em dois grandes grupos: os processos de conformação de volumes, que são caracterizados por significativas deformações e grandes mudanças de forma, e os processos de conformação de chapas que são as operações aplicadas a chapas, tiras e bobinas. Os processos de conformação são usados para fabricação de diversas peças e produtos importantes tais como carrocerias dos automóveis (estampagem de chapas), trilhos de trem (laminação), ferramentas como alicates e chaves de boca (forjamento), trilhos para cortinas (extrusão), fios elétricos (trefilação), talheres (estampagem) e latas para refrigerantes (corte, dobramento e estampagem).

A **metalurgia do pó** é um processo de fabricação pelo qual uma mistura de pós metálicos (ou metálicos e cerâmicos) é compactada em matrizes formando aglomerados com a forma desejada que é, em seguida, aquecida a altas temperaturas

(estando ainda o material no estado sólido ou parcialmente líquido geralmente) em atmosfera controlada para a consolidação das partículas. Esse processo é chamado de sinterização. A metalurgia do pó é aplicada para fabricação de pequenas peças e produtos, tais como, ferramentas, pequenas engrenagens, pequenos componentes de armas, filtros (porosos) e componentes de motores.

A **soldagem** é um processo de fabricação pelo qual duas ou mais partes metálicas, de ligas similares ou não (dissimilares), são unidas permanentemente assegurando que na região da junta soldada as propriedades sejam adequadas ao uso do produto final. Ela pode ser feita por fusão localizada das partes a serem unidas, no estado sólido ou ainda por fusão somente de um metal de adição (brasagem e solda branda). A soldagem, além de ser utilizada na produção de produtos, é muito importante como processo de manutenção e reparo, objetivando o prolongamento da vida útil dos componentes metálicos. Tem um vasto campo de aplicações, sendo usada desde a manufatura de uma simples cadeira até naves espaciais; ela é muito utilizada nas indústrias naval, automobilística, nuclear, energética, aeroespacial, eletrônica, petroquímica e da construção civil em plataformas marítimas etc.

A **usinagem** é um processo de manufatura no qual uma ferramenta de corte é usada para remover material de um sólido de tal maneira que o remanescente tenha a forma da peça desejada. Os processos principais de usinagem são torneamento, furação, fresamento e aplainamento. A usinagem é aplicada a uma grande variedade de materiais, gerando qualquer geometria regular, tais como superfície plana, cilindros e orifícios redondos. É frequentemente usada como processo secundário ou de acabamento quando a peça for produzida por fundição, conformação plástica ou metalurgia do pó.

Uma das etapas finais na fabricação de diversos componentes geralmente é a dos **tratamentos térmicos**, que consistem no aquecimento e resfriamento controlado para alterar a microestrutura final e, conseqüentemente, as propriedades finais da peça, como dureza e resistência mecânica. Um tratamento térmico bastante empregado é a tempera seguida de revestimento. A têmpera aumenta muito a dureza e resistência de certos aços, porém, tornando-os frágeis (“quebra-diços”); o revenimento corrige esse problema, mas com alguma perda de dureza. Outro tipo de tratamento térmico bastante empregado é o **termoquímico**, no qual a temperatura é controlada e utilizam-se compostos que promovem a adição de um elemento químico na camada superficial das peças. Essa adição altera a composição química da superfície e, conseqüentemente, a microestrutura. Os tratamentos termoquímicos geralmente são utilizados para aumentar a dureza e resistência ao desgaste da superfície das peças.

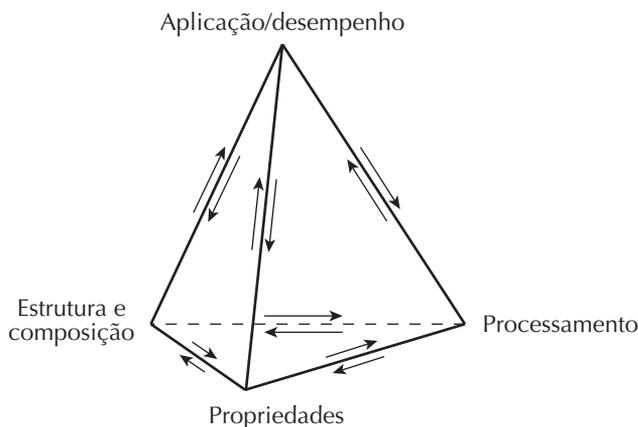
Outros **tratamentos superficiais** bastante utilizados são aqueles destinados à proteção da superfície contra a corrosão e oxidação. Um exemplo bastante comum é a galvanização, na qual uma fina camada de um metal mais propenso à corrosão é depositada na superfície das peças. Essa camada sofre corrosão no lugar da peça, protegendo-a por algum tempo. As chapas de aço galvanizadas, usadas na confecção de calhas e rufos nos telhados das casas, é um exemplo comum. Pode-se também depositar metais mais nobres e muito resistentes à corrosão. A deposição de material cerâmico para aumentar muito a dureza na superfície também é possível. Filmes poliméricos também são utilizados, principalmente para isolar o metal do ambiente corrosivo, como é o caso das tintas.

1.3 RELAÇÃO: COMPOSIÇÃO QUÍMICA – MICROESTRUTURA – PROCESSAMENTO – PROPRIEDADES – DESEMPENHO

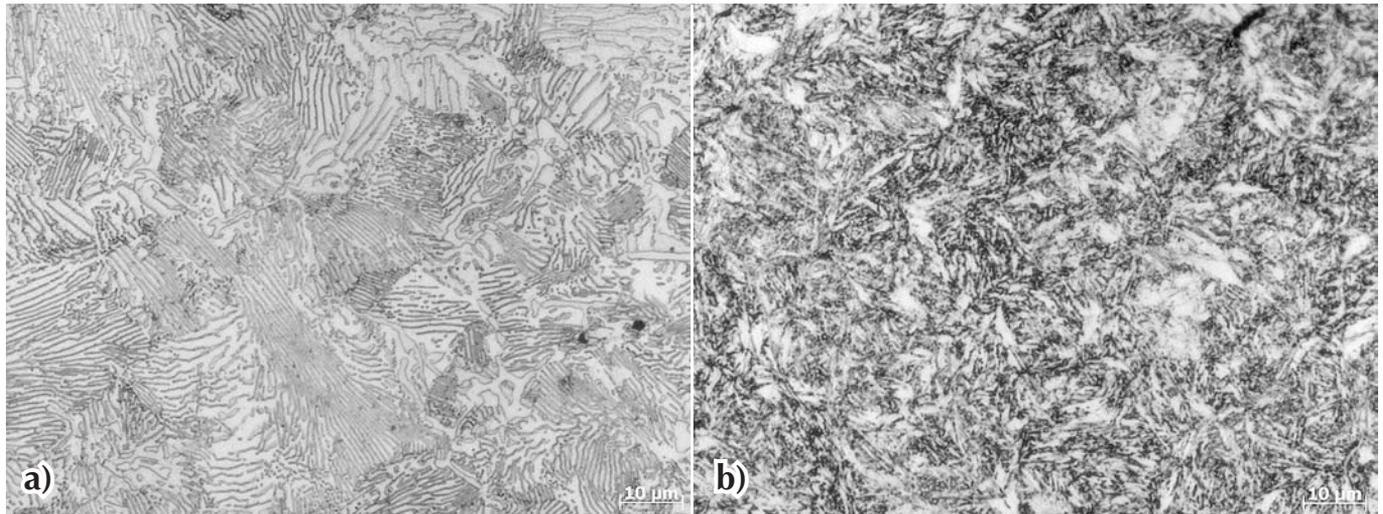
Para a fabricação de produtos metálicos são usados metais e ligas metálicas e processos que visam não só dar forma, com a precisão que o produto requer, mas também conferir a este o conjunto de propriedades que o seu uso exige. As propriedades dependem do tipo de metal ou liga (de sua composição química) e, também, de sua microestrutura. A microestrutura, por sua vez, depende do histórico térmico/mecânico sofrido pelo metal durante o processamento. E as propriedades irão determinar o desempenho do produto quando em uso.

A Figura 1.4 ilustra esquematicamente a relação existente entre a composição química e microestrutura – processamento – propriedades – aplicação/desempenho do material.

Figura 1.4
Ilustração da inter-relação existente entre a composição química e microestrutura – processamento – propriedades – aplicação/desempenho de um produto metálico.



Um exemplo da relação entre a composição química e microestrutura – processamento – propriedade é o caso de um aço ao carbono com 0,8% de carbono (composição eutetoide) conforme ilustrado na Figura 1.5. Esse aço poderá apresentar, dependendo do processo ao qual for submetido, microestruturas totalmente distintas e, portanto, um conjunto de propriedades também totalmente distintas. Por exemplo, se processado de maneira que, a partir de uma temperatura acima da eutetoide, que é 723 °C (996 K), seja resfriado lentamente (por exemplo, aquecimento dentro de um forno e o desligamento deste mantendo a peça em seu interior resultando numa taxa de resfriamento da ordem de 3 °C/s (276 K/s); tratamento térmico denominado de recozimento), apresentará uma microestrutura constituída pelo microconstituente denominado de perlita (lamelas de ferrita e cementita) que apresentará uma baixa dureza e alta ductilidade. Entretanto, esse mesmo aço, se processado de maneira que, a partir da mesma temperatura acima da eutetoide, que é 723 °C (996 K), seja resfriado rapidamente (por exemplo, colocando a peça dentro d'água resultando em taxa de resfriamento da ordem de 300 °C/s; tratamento denominado de têmpera), apresentará uma microestrutura constituída da fase martensita que terá uma alta dureza e baixa ductilidade.

**Figura 1.5**

Microestruturas do aço ao carbono com 0,8% C resfriados de uma temperatura acima da eutetóide, 723 °C, a taxas diferentes, resultando em microestruturas e, portanto, propriedades diferentes.

a) Resfriado a 3 °C/S, microestrutura perlítica.

b) Resfriado a 300 °C/S, microestrutura martensítica.

Na seleção do processo de fabricação de um produto é estratégica a identificação da rota que, com o menor número de etapas (que geralmente significa um menor custo) seja possível dar forma ao material e fazer com que a microestrutura formada seja aquela que dê as propriedades necessárias. Por exemplo, no caso de um martelo fabricado com um aço ao carbono com 0,8% de carbono (composição eutetoide), a forma é dada por forjamento a altas temperaturas e, sequencialmente, a peça é resfriada rapidamente, temperando-a. Assim, a energia gasta para aquecimento para a etapa de forjamento é aproveitada para o tratamento térmico, economiza-se, dessa forma, energia e tempo.

Outro aspecto importante é a seleção do material, isto é, a seleção da composição química a ser usada na fabricação de um determinado produto. A composição química é importante, pois, dependendo dela, certas propriedades podem ou não ser alcançadas, ou ainda, certos processos podem ou não ser aplicados. Por exemplo, se a estratégia é conferir alta dureza a um produto de aço ao carbono pelo tratamento térmico de têmpera, como é o caso do martelo citado anteriormente, o aço deve ter um teor de carbono mínimo em torno de 0,4%, pois somente com esse teor mínimo o aço ao carbono estará susceptível a ser endurecido por esse tratamento. Se a peça exigir, para o seu bom desempenho, uma altíssima dureza, o teor de carbono deve ser ainda mais elevado considerando que a dureza do aço, após o tratamento térmico de têmpera, é mais elevada quanto maior o teor de carbono, até uma concentração em torno de 0,8%. Uma característica do processo a ser usado para dar o formato ao produto, por outro lado, pode tornar inviável toda essa estratégia de conferir as melhores propriedades pela seleção da melhor composição química. Um exemplo são as chapas finas da liga Fe-Si, usadas em núcleos de transformadores. Para esse produto, as propriedades elétricas e magnéticas mais adequadas ao melhor desempenho seriam alcançadas com o uso de liga com alto teor de Si, pois, com isso, a resistividade aumenta e, portanto, diminuem a perda de energia do núcleo de transformador. Estudos mostram que o teor ótimo de Si para otimizar as propriedades elétricas e magnéticas é de 6,5% de Si. Contudo, para a fabricação das chapas finas o processo de laminação deve ser usado e, para isso, o material deve apresentar ductilidade; mesmo quando aquecida, a liga Fe-6,5%Si se apresenta frágil, o que inviabiliza a sua laminação. Por isso as chapas finas usadas para núcleos de transformadores são produzidas com a liga Fe-3,5%Si, composição que, embora não apresente as melhores propriedades, tem teor máximo de Si que

Tabela 1.1 – Influência da alteração da composição química e processamento nas propriedades e aplicações do cobre

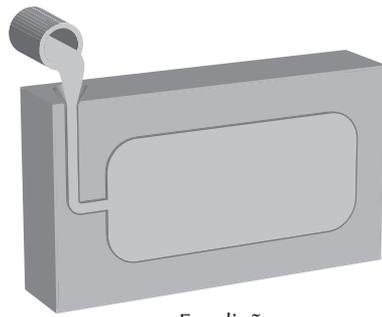
| Composição química | Processamento | Limite de escoamento aproximado (MPa) (*) | Aplicação típica |
|----------------------|---|---|-------------------------------|
| Cu com 99,99% pureza | Tratado termicamente por recozimento, tamanho de grão em torno de 10 µm | 50 | Condutores elétricos em geral |
| Cu com 99,99% pureza | Deformado a frio, encruado | 300 | Contatos elétricos |
| 75%Cu-25%Ni | Tratado termicamente por recozimento | 150 | Tubos para trocador de calor |
| 75%Cu-25%Ni | Deformado a frio, encruado | 400 | Fabricação de moedas |

(*) Expressa a resistência mecânica da liga, a qual a resistência ao desgaste está diretamente relacionada.

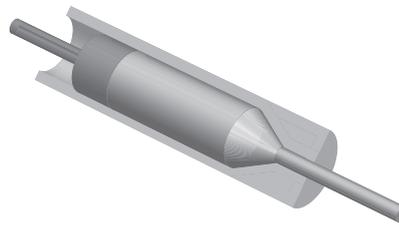
permite a sua boa laminação, permitindo a produção em larga escala e barateando o produto final. Nesse caso uma característica de processo foi determinante para a seleção da composição em detrimento à otimização da microestrutura – propriedades – desempenho.

Também, algumas rotas, embora mais trabalhosas e, portanto, geralmente mais custosas, podem ser a única alternativa em certos casos para conciliar as características necessárias ao processamento com as características necessárias ao bom desempenho. A Tabela 1.1 ilustra, para o caso do cobre, como a alteração da composição química (adição de Ni no Cu) e/ou da alteração da microestrutura pela deformação a frio (encruamento) e do tratamento térmico por recozimento alteraram drasticamente a resistência mecânica, a resistividade elétrica, a condutividade térmica e, conseqüentemente, sua aplicabilidade. A **adição de 25%Ni** na composição do Cu eleva a resistência mecânica, mas também aumenta bastante a resistividade; com isso fica inviabilizado o seu uso como condutor elétrico, mas é bastante adequado para o seu uso em trocadores de calor. Já a **deformação a frio**, que provoca na microestrutura deformações nos grãos, também eleva a resistência mecânica, tanto do Cu puro como da liga Cu-Ni, mas também com perda de condutividade, tanto térmica quanto elétrica. No caso do Cu puro, a perda de condutividade, sendo pequena, ainda permite o seu uso como contato elétrico em que a elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste é importante. Contudo, no caso de Cu-Ni, a alta resistência mecânica alcançada acarreta perda muito grande de condutividade inviabilizando seu uso em trocadores de calor; para uso em moedas, que são cunhadas a frio, a alta resistência mecânica (resistência ao desgaste) é bastante benéfica e as condutividades, tanto elétrica quanto a térmica, são propriedades que não afetam o seu desempenho. Assim, por essas características de alteração da composição química e/ou microestrutura, é possível atender especificações distintas tanto para o caso de condutores elétricos, com maior ou menor resistência mecânica, quanto para trocadores de calor ou moedas.

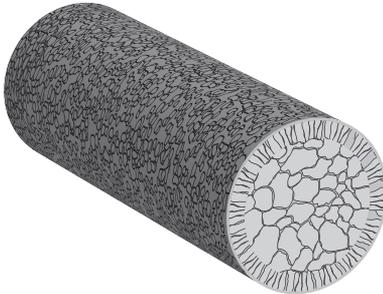
Outro exemplo, que bem ilustra a relação entre microestrutura - processamento - propriedades é o caso da fabricação de uma peça de geometria cilíndrica por duas rotas diferentes: fundição ou extrusão, conforme mostrado na Figura 1.6. Considerando que uma determinada liga possa ser usada por esses dois processos para se obter a forma desejada, cada um deles irá resultar em microestruturas dis-



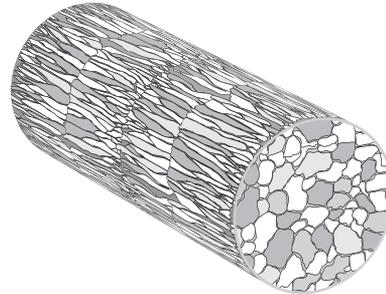
Fundição



Extrusão



Peça fundida



Peça extrudada

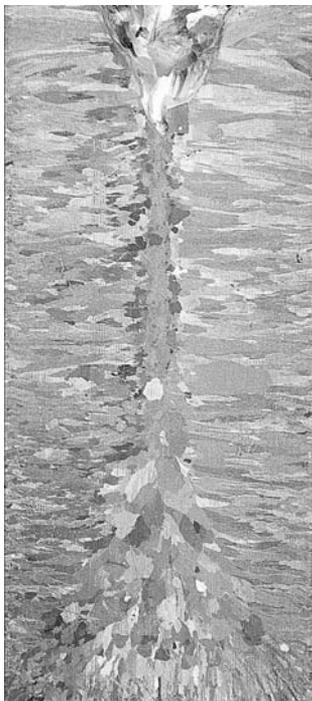
Macrografia da peça fundida
(seção longitudinal)Macrografia da peça extrudada
(seção longitudinal)**Figura 1.6**

Ilustração de peça cilíndrica fundida e extrudada e as diferenças microestruturais resultantes.

tintas. Na peça fundida, os grãos se apresentarão com diversos tamanhos, sendo menores nas partes superficiais (camada coquilhada – onde o metal foi resfriado mais rapidamente) e alongados da região superficial para o centro da peça. Na peça extrudada, os grãos se apresentarão alongados e na direção da deformação plástica induzida pelo processo de extrusão. Considerando que muitas das propriedades dependem do tamanho e formato dos grãos, por exemplo, os metais com tamanhos de grão menores tendem a ser, pela alta área de contornos de grãos,

mais resistentes mecanicamente; na peça fundida, as propriedades mecânicas na superfície serão diferentes da região central enquanto que na peça extrudada os grãos alongados e direcionados levam a uma anisotropia na resistência mecânica na peça (valores diferentes entre a direção longitudinal e a transversal). As peças processadas por essas duas diferentes rotas, embora similares no formato e dimensões, apresentarão propriedades distintas e, portanto, desempenho diferente dependendo de sua aplicação. Sendo os fenômenos metalúrgicos distintos nessas duas rotas (solidificação na fundição e deformação plástica na extrusão), têm-se outras diferenças como a presença de defeitos (vazios ou óxidos), qualidade do acabamento superficial e precisão dimensional. Esse exemplo mostra claramente que, para conferir ao material a forma exigida pela peça pode ter diferentes rotas, mas que invariavelmente levam a produtos com diferenças de precisão dimensional e/ou acabamento superficial, além de diferenças microestruturais e, portanto, com propriedades diferentes. Existem casos em que um produto pode ser fabricado, atendendo todas as especificações estabelecidas, por mais de uma rota; nesse caso, o fator custo se torna o determinante para a escolha.

Ainda na interrelação esquematizada na Figura 1.4, é importante observar que cada processo de fabricação tem limitações quanto às características metalúrgicas do metal ou liga a ser trabalhada e das formas a serem conferidas, isto é, nem todas as ligas e composições podem ser processadas por determinadas rotas e nem todos os processos podem produzir determinadas formas. Por exemplo, com tungstênio, cuja temperatura de fusão é superior a 3.000 °C (3.273 K), não é possível processar uma peça por fundição pelo problema em se conseguir um material para a confecção do molde que suporte receber o metal fundido. Nesse caso, a rota geralmente usada é a da metalurgia do pó, que não envolve a fusão do metal. Por outro lado, certas peças, como é o caso de filtros metálicos, são necessariamente processadas pela metalurgia do pó; nesse caso, outros processos são incapazes de conferir à peça os orifícios com dimensões controladas, de tamanho micrométrico e interconectados, necessários ao bom desempenho do produto.

Assim, a seleção da rota de processamento de um produto metálico deve ser feita já na etapa de projeto do produto, pois há uma relação complexa entre as especificações de forma e de propriedades, escolha do metal ou liga e a rota de processamento. O bom desenvolvimento de um produto requer a reunião de conhecimento de diversas áreas, sendo, portanto, um trabalho de equipe de profissionais de diversas especialidades.

1.4 BIBLIOGRAFIA

American Welding Society – “Welding Handbook”, 7th Ed., AWS-USA, v. 1, 2, 3, 4 e 5, 1984.

Ashby, M. F., “Materials Selection in Mechanical Design”, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 1995.

ASM, Metals Handbook, 10th Ed., Materials Park, Ohio.

Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys (1990)

Vol. 2, Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special Purpose Materials (1990)

Vol. 3, Alloy Phase Diagrams (1992)

- Vol. 4, Heat Treating (1991)
- Vol. 5, Surface Engineering (1994)
- Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering (1993)
- Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology (1992)
- ASM, Metals Handbook, 9th Ed., ASM, Materials Park, Ohio.
- Vol. 1, Properties and Selection: Irons and Steels (1978)
- Vol. 2, Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Pure Metals (1979)
- Vol. 3, Properties and Selection: Tool Materials and Special-Purpose Metals (1980)
- Vol. 4, Heat Treating (1981)
- Vol. 5, Surface Cleaning, Finishing, and Coating (1982)
- Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering (1983)
- Vol. 7, Powder Metallurgy (1984)
- Vol. 8, Mechanical Testing (1985)
- Vol. 9, Metallography and Microstructures (1985)
- Vol. 10, Materials Characterization (1986)
- Vol. 11, Failure Analysis and Prevention (1986)
- Vol. 12, Fractography (1987)
- Vol. 13, Corrosion (1987)
- Vol. 14, Forming and Forging (1988)
- Vol. 15, Casting (1988)
- Vol. 16, Machining (1983)
- Vol. 17, Nondestructive Evaluation & Quality Control (1989)
- Black, B. J., "Workshop, Process, Practices & Materials", 2nd Ed., Arnold-Hodder Headline Group, 1997.