



PRINCÍPIOS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO UTILIZANDO METAIS E POLÍMEROS

VALDEMIR MARTINS LIRA

Blucher

PRINCÍPIOS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO UTILIZANDO METAIS E POLÍMEROS

Blucher

Valdemir Martins Lira

PRINCÍPIOS DOS PROCESSOS
DE FABRICAÇÃO UTILIZANDO
METAIS E POLÍMEROS

Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros

© 2017 Valdemir Martins Lira

1ª edição digital – 2018

Editora Edgard Blücher Ltda.

Imagem da capa: iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o 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.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Lira, Valdemir Martins

Princípios dos processos de fabricação utilizando
metais e polímeros [livro eletrônico] / Valdemir
Martins Lira. – São Paulo : Blucher, 2017.

240 p. ; PDF.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-1084-9 (e-book)

1. Processos de fabricação – Metais 2. Processos
de fabricação – Polímeros 3. Automação 4. Controle
de produção 5. Engenharia de produção I. Título

16-0693

CDD 670

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia de produção – Processos de fabricação

Dedico este trabalho a minha querida esposa, pela abdicação de horas de lazer e pela compreensão para que eu pudesse iniciar, desenvolver e concluir este trabalho ao longo de 6 anos.

Dedico aos nossos filhos, Denise e Gustavo.

Dedico também a minha mãe, pelo incentivo em todos os momentos da minha vida, e a meu pai, pelos ensinamentos de disciplina e do trabalho.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste livro foi possível graças ao apoio e à colaboração de diversas pessoas e instituições de ensino e de pesquisa, às quais manifesto meus agradecimentos a seguir.

Foi possível graças também aos meus alunos de graduação que, em muitos momentos, durante a disciplina “Introdução aos Processos de Fabricação”, na Universidade Federal do ABC (UFABC), colaboraram com observações de conteúdos e exercícios que culminaram nesta obra.

Ao Professor Doutor Rovilson Mafalda, docente na UFABC, pela colaboração na elaboração do item que trata dos processos pela adição de material.

Ao engenheiro de automação e controle Leonardo Massato Nogamatsu, pela ajuda na elaboração de vários desenhos.

À UFABC, pelo ambiente agradável de trabalho e a disponibilização para utilização de equipamentos e do laboratório para a parte experimental da pesquisa.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP), pela minha formação prática na área de tecnologia mecânica.

À Editora Blucher pela publicação deste livro.

Aos inúmeros colegas da indústria e de escolas técnicas estaduais de São Paulo que contribuíram com uma ou outra observação e/ou informação técnica, que, ao serem colocadas em um documento, tornam-se de grande valia.

PREFÁCIO

Quando lecionamos um curso ou uma disciplina, procuramos, durante as aulas, na medida do possível, transmitir as informações de forma simplificada, para possibilitar alto grau de aprendizagem em pouco tempo de duração da aula.

Decorrente desse pouco tempo, o suplemento de conhecimento deve estar em um material didático calcado no conteúdo da disciplina. Esse conteúdo – especificamente o da disciplina denominada Introdução aos Processos de Fabricação, lecionada na grade curricular do curso de Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica na Universidade Federal do ABC – é volumoso e envolve duas direções de processos de fabricação, uma para materiais metálicos e outra para materiais poliméricos. A gama de informações é grande para uma disciplina que é oferecida em um único quadrimestre no ano. Por vezes, nos sentimos um pouco perdidos na ordenação dessas informações e, para suprir essa função, se fez necessário este material. Tal falta é sentida principalmente quando precisamos saber alguma informação do que foi ensinado pouco tempo atrás.

As informações são muitas e o tempo é pouco para podermos pesquisar em livros o que precisamos naquele momento. Enfrento este problema há cinco anos e, para minimizá-lo, fiz um levantamento dos mais diversos processos de fabricação e elaborei este material didático. São informações colhidas por meio de anotações, apontamentos realizados na indústria (experiência de dezessete anos),

curiosos técnicos, graduação tecnológica e bacharelado em engenharia (experiência de 23 anos), cursos em indústrias e estabelecimentos de ensino.

Serve também como um texto básico para a formação de engenheiros da área de automação e controle e de produção, utilizado em cursos de tecnologia e técnicos voltados para essa área, introdutório aos cursos de engenharia, tecnologia e técnico em mecânica. Indica-se ainda para outros profissionais do setor de manufatura e de desenvolvimento do produto, que, muitas vezes, não dispõem de material de consulta para entender e selecionar um processo para fabricar um produto de metal ou polímero.

Por último, esta obra não está concluída, de modo que aceito sugestões e críticas para melhorar, aprimorar e tornar o conteúdo mais abrangente e preciso. Com tais sugestões e críticas inseridas no livro, todos os leitores poderão usufruir de um material precioso para uso no ensino, na pesquisa e na aplicação de vários campos da fabricação de peças de metal/polímero.

Valdemir Martins Lira

São Paulo, Brasil

2017

CONTEÚDO

ESTRUTURA DO LIVRO	15
---------------------------------	-----------

PARTE I – HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE FABRICAÇÃO.....	17
--	-----------

1 – INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE FABRICAÇÃO.....	19
---	-----------

1.1 Breve histórico evolutivo da fabricação e da tecnologia.....	19
1.2 Século XX: o século da tecnologia	23

2 – SISTEMA PRODUTIVO	25
------------------------------------	-----------

2.1 Sistema de produção.....	26
2.2 A ocupação da mão de obra e os setores de produção	26
2.3 Tipos de indústrias.....	28
2.4 Tipos de produção.....	30

2.5 Automação da manufatura	30
2.6 Referências.....	33

PARTE II – MEIOS DE TRANSFORMAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO CONTÍNUO E DISCRETO 35

3 – TEMPERATURA EM METAIS COMO AGENTE DE TRANSFORMAÇÃO.....37

3.1 Introdução.....	37
3.2 Eletroerosão.....	39
3.3 <i>Laser</i>	43
3.4 Plasma	46
3.5 Fundição.....	48
3.6 Lingotamento.....	57
3.7 Sinterização	59
3.8 Exercícios resolvidos.....	61
3.9 Exercícios propostos	64
3.10 Referências.....	65

4 – RESISTÊNCIA MECÂNICA E TEMPERATURA COMO AGENTES DE TRANSFORMAÇÃO.....67

4.1 Forjamento	69
4.2 Extrusão de metal.....	75
4.3 Trefilação	78
4.4 Laminação.....	82
4.5 Estampagem	87
4.6 Torneamento	91
4.7 Fresamento.....	99

4.8 Aplainamento	105
4.9 Furação	107
4.10 Serramento.....	111
4.11 Alargamento	113
4.12 Brochamento.....	117
4.13 Roscamento.....	120
4.14 Mandrilamento	122
4.15 Retificação	124
4.16 Brunimento	126
4.17 Superacabamento.....	131
4.18 Polimento.....	133
4.19 Lapidação	134
4.20 Jato d'água, jato abrasivo e fluxo abrasivo	136
4.21 Exercícios propostos	139
4.22 Referências.....	140

5 – TEMPERATURA EM POLÍMEROS COMO AGENTE DE TRANSFORMAÇÃO.....141

5.1 Extrusão.....	142
5.2 Injeção de termoplástico	154
5.3 Termoformagem	166
5.4 Rotomoldagem	170
5.5 Injeção de termofixo.....	178
5.6 Referências.....	181
5.7 Exercícios propostos	181

6 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR ADIÇÃO DE MATERIAL: TEMPERATURA EM POLÍMEROS E METAIS COMO AGENTE DE TRANSFORMAÇÃO.....187

6.1	Estereolitografia.....	188
6.2	<i>Fused deposition modeling</i> (FDM)	189
6.3	<i>Selective laser sintering</i> (SLS)	191
6.4	Processo por adição – FDM e estereolitografia: exemplo prático.....	192
6.5	Soldagem.....	194
6.6	Exercícios resolvidos.....	205
6.7	Exercícios propostos	208
6.8	Referências.....	210

7 – EXERCÍCIOS ADICIONAIS211

7.1	Resolvidos	211
7.2	Propostos.....	216

8 – RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS223

ÍNDICE REMISSIVO.....233

APÊNDICE237

REFERÊNCIAS.....240

ESTRUTURA DO LIVRO

Na Parte I do livro, tem-se os Capítulos 1 e 2, com seus conteúdos como descrito a seguir. No Capítulo 1, tem-se a introdução aos sistemas de fabricação, e é apresentado um breve histórico evolutivo da fabricação e da tecnologia. No Capítulo 2, descrevem-se os vários tipos de sistemas produtivos e ao final, estão listados exercícios propostos e resolvidos e bibliografia de referência. Para fechar o capítulo, descreve-se o papel da automação da manufatura e a integração das funções de um sistema fabril discreto.

Na Parte II, tem-se os meios de transformação dos processos de fabricação contínuos e discretos, subdivididos nos Capítulos 3, 4, 5 e 6. Neles, são apresentadas as classificações por meios e seus agentes de transformação de cada grupo de processos, seguidos de uma sucinta explanação da teoria do princípio dos processos em si, apresentando grandezas físicas e os materiais processados para fornecer ao aluno, de forma direta e básica, os princípios de cada processo. Ao final de cada item, há exercícios resolvidos, exercícios propostos e bibliografia para ampliar e aprofundar o conhecimento.

Ainda, nos Capítulos 7 e 8, há uma série de exercícios adicionais e resoluções de exercícios propostos ao longo do livro.

Em todos os processos descritos, existem QRcodes¹, imagens em forma de códigos para leitura via aplicativo instalado em celular, *tablet* e outros aparelhos. Ao serem acessados, tais códigos conduzem a um vídeo explicativo relativo ao processo. Este recurso possibilita uma melhor compreensão do tema em estudo.

1 Na ocasião da publicação deste livro, todos os vídeos estavam disponíveis.

PARTE I

**HISTÓRICO DOS
SISTEMAS DE
FABRICAÇÃO**

INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE FABRICAÇÃO

**FABRICAR É TRANSFORMAR MATÉRIAS-PRIMAS
EM PRODUTOS ACABADOS POR MEIO DE UMA
VARIEDADE DE PROCESSOS**

1.1 BREVE HISTÓRICO EVOLUTIVO DA FABRICAÇÃO E DA TECNOLOGIA

Desde os primórdios da história da humanidade, a sobrevivência e a subsistência do homem sempre estiveram calcadas no desenvolvimento de métodos, técnicas e utensílios/mecanismos para defesa ou para facilitar o trabalho, como os primeiros processos (feitos há mais de 6 mil anos) para fundir, forjar, furar e ralar (Tabela 1.1). A mecanização começou na Pré-História, por volta de 3500 a.C., com a invenção da roda e do arado na Mesopotâmia e os primeiros utensílios com uso de bronze na Tailândia (Ásia), cobre na Europa e fundição do bronze na África. Em 700 a.C., surgiu o uso de utensílios de ferro na Europa Ocidental. Em termos de máquinas,

em 1000 a.C., surgem os primeiros tornos, na época denominada Idade do Bronze; os metais predominantes eram cobre, zinco e estanho.

Com o avanço da ciência e da tecnologia na Europa em 1770, propicia-se o surgimento da automação nos meios de transporte, com a máquina a vapor de James Watt, em 1769. Em relação às máquinas fabris, Cartwright constrói a máquina de tear em 1772, e Eli Whitney, o descaroçador de algodão, nos Estados Unidos, em 1793. Ainda nessa época, surgem os primeiros relatos conhecidos sobre torneamento por Jacques Plumier (*L'art de torneurs*) e a divisão do trabalho propagada por Adam Smith em 1700. Esse cenário culmina com a Revolução Industrial, que tem início na Inglaterra em 1780.

Desde os primórdios da Primeira Revolução Industrial, também denominada revolução do carvão e do ferro, ocorrida em 1780, e posteriormente da Segunda Revolução Industrial, do aço e da eletricidade, iniciada em 1860, os processos de fabricação vêm evoluindo e obtendo níveis cada vez maiores de produtividade. Desde então, métodos, técnicas, mecanismos e materiais foram criados para operacionalização e melhorias dos sistemas produtivos.

Naquela época, o foco era o processo de fabricação, pois, em um primeiro momento, a principal preocupação residia em serem descobertos meios de produzir em massa os bens que já então eram necessários.

O processo de fabricação alavancou o desenvolvimento da mecanização das máquinas. Em seguida, o foco passou a ser a otimização da organização de chão de fábrica, visando a rentabilização dos investimentos efetuados no equipamento. Nasce o taylorismo, que introduz as preocupações com a otimização do trabalho e, posteriormente, o fordismo, que introduz a noção de arranjo de máquinas na forma de linha de produção, além da visualização do aproveitamento do mercado consumidor de escala.

Tabela 1.1 Histórico dos descobrimentos dos materiais tradicionais e não tradicionais e os processos de fabricação e máquinas

		Ouro	10.000	a.C. ← 0 → d.C		Processos de fabricação e máquinas
Tradicionais	metais	Cobre	5.000			Fundir, forjar, furar, ralar, mecanização (arado), primeiros tornos
		Bronze	2.500			
		Ferro	0			
		Ferro fundido	1600			
		Aço		1780	Automação nos meios de transporte, máquina a vapor	
		Aço-liga		1910		
		Superligas		1940	Forno de indução	
		Pedra	Desde o surgimento da humanidade			
		Sílex	6.000			Triturar, cortar
		Cerâmica	5.000			Cortar
cerâmicas	Cimento	1.000			Trituração, moagem e aquecimento	
	Cimento <i>Portland</i>		1910			
	Cermets		1940	Sinterização		
	Vidro	1.000			Fundir	
	Madeira	Desde o surgimento da humanidade		Serrar		
Não tradicionais	polímeros	Celuloide		1860		
		Parquesine		1862	Injeção, compactação e compressão	
		Baquelite		1910		
		PVC/PMMA/PS		1930		
		LDPE/PU/ER		1940	Injeção, extrusão, sopro, termoformagem, rolagem	
		HDPE/PP/PC		1950		

1.1.1 Cenário das revoluções industriais

É importante salientar a importância do cenário da sociedade nas revoluções industriais, pois nota-se um elo inseparável desses acontecimentos com o processo evolutivo dos sistemas de produção, das descobertas de materiais e da invenção de máquinas e equipamentos.

A seguir, descreve-se sucintamente os principais acontecimentos que proporcionaram a mudança da sociedade de um sistema feudal para uma sociedade calcada na produção.

1780 a 1860	Revolução do carvão e do ferro
a)	Mecanização da agricultura, máquinas de fiar, tear, hidráulica, primeiras máquinas-ferramentas projetadas segundo princípios modernos etc.
b)	Aplicação da força motriz na indústria com a invenção do motor elétrico e do gerador por M. Faraday na Grã-Bretanha em 1821.
c)	Desenvolvimento do sistema fabril • Artesão → operário. • Rural → urbana. • Divisão do trabalho em tarefas.
d)	Crescimento do transporte e da comunicação • Navegação a vapor (1807). • Locomotiva a vapor (1825). • Rádio (1836).
e)	Aumento do poder capitalista

1860 a 1914	Revolução do aço e da eletricidade, surgimento de novos materiais
a)	Fabricação do aço Em 1856, é descoberto o processo Bessemer, que possibilita a produção do aço em escala industrial. O aço ferramenta é o principal material de ferramentas de usinagem. Em 1900, Taylor apresenta o aço rápido.
b)	Plástico Em 1860, foi desenvolvido um plástico chamado celuloide, utilizando para substituir o marfim na confecção de bolas de bilhar e de peças delicadas como caixa de pó de arroz. Não fez sucesso no início, mas em 1889 George Eastman passou a uti-

lizá-lo na produção de filmes fotográficos. Contudo, o celuloide era muito inflamável, chegando a explodir. Em 1862, Alexander Parkes criou um material duro que podia ser moldado. Denominado Parkesine, foi o primeiro plástico semissintético.

c) Substituição do vapor por eletricidade

- Em 1874, primeiro bonde elétrico (Nova York).
- Em 1878, primeira iluminação elétrica de rua (Londres).
- Em 1882, primeira usina hidrelétrica (Wisconsin, EUA).

d) Derivados de petróleo

O primeiro poço de petróleo foi perfurado na Pensilvânia (EUA) em 1859.

e) Aparecimento do automóvel:

- Invenção do motor a combustão e aperfeiçoamento do dínamo em 1873.
- Daimler e Benz abrem caminho para a fabricação do automóvel na Alemanha.
- Dunlop, em 1888, inventa o pneu com ar comprimido (pneumático).
- Henry Ford: produção em massa, linha de montagem; desenvolve a montagem da correia transportadora para a produção do automóvel em 1913.

f) Novos tipos de organizações capitalistas (sociedades industriais).

g) Fim do artesanato

O consumidor perdeu o poder de influenciar na definição dos produtos que iria consumir, decisão que fica a cargo dos projetistas.

1.2 SÉCULO XX: O SÉCULO DA TECNOLOGIA

Com a aplicação do conceito da produção em massa de Henry Ford, no início do século XX, os sistemas de fabricação foram dotados de novas exigências técnicas, novas máquinas e novos materiais, como o baquelite, plástico verdadeiramente sintético, inventado em 1909. As empresas desenvolveram o conceito de aprimoramento de seus produtos, por exemplo, a partir de 1920, com as indústrias siderúrgicas, de automóveis e petroquímica. Essa última passou a fornecer matéria-prima excelente para a fabricação de plásticos. Isso resultou em uma série de materiais com diferentes propriedades calóricas, elétricas, ópticas e de moldagem. Já as máquinas sofreram grande aprimoramento, graças ao desenvolvimento tecnológico, como a invenção do computador, em 1930, possibilitando a incorporação de controles automáticos às máquinas.

A produção seriada de produtos sempre esteve associada a fatores de descoberta e de desenvolvimento tecnológico na sociedade. Assim, calcados nas vantagens computacionais, surgem os sistemas informatizados e máquinas automatizadas que proporcionaram grande desenvolvimento dos sistemas produtivos ao longo do século XX, auxiliando, assim, o desenvolvimento de métodos e técnicas e visando a

melhoria e aperfeiçoamento dos meios produtivos demandados pela evolução tecnológica e mercadológica caracterizada acima.

Essa evolução tecnológica proporciona aos sistemas produtivos métodos de fabricação com tamanha flexibilidade que são capazes de produzir peças unitárias a custos praticamente iguais aos obtidos com a produção em série. As empresas que se utilizam dessa flexibilidade são consideradas empresas de manufatura ágil.