T



Métodos e Processos Industriais

CENTRO PAULA SOUZA







Mecânica Volume 5







Mecânica

Métodos e processos industriais

Daniel Benítez Barrios Luís Antonio Pivetta Nélson Kodi Yoshikawa (autores)

Edvaldo Angelo

(coautor)





Presidência

João Sayad

Vice-presidência

Ronaldo Bianchi, Fernando Vieira de Mello

DIRETORIA DE PROJETOS EDUCACIONAIS

Direção: Fernando José de Almeida

Gerência: Monica Gardelli Franco, Júlio Moreno Coordenação Técnica: Maria Luiza Guedes Equipe de autoria Centro Paula Souza Coordenação geral: Ivone Marchi Lainetti Ramos Coordenação da série Mecânica: Meire Satiko

Fukusawa Yokota

Autores: Daniel Benítez Barrios, Luís Antonio Pivetta,

Nélson Kodi Yoshikawa Coautor: Edvaldo Angelo

Revisão técnica: Antonio Carlos Baffi

Equipe de Edição

Coordenação geral: Carlos Tabosa Seabra, Rogério Eduardo Alves Coordenação editorial: Luiz Marin

Edição de texto: Miguel Angelo Facchini Secretário editorial: Antonio Mello Revisora: Maria Carolina de Araujo Direção de arte: Bbox Design

Diagramação: LCT Tecnologia
Ilustrações: Luiz Fernando Martini, Nilson Cardoso

Pesquisa iconográfica: Completo Iconografia

Capa

Fotografia: Eduardo Pozella, Carlos Piratininga

Tratamento de imagens: Sidnei Testa

Abertura capítulos: © James King-Holmes/Science Photo

Library/SPL DC/Latinstock

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa oferece aos alunos da instituição conteúdo relevante à formação técnica, à educação e à cultura nacional, sendo também sua finalidade a preservação e a divulgação desse conteúdo, respeitados os direitos de terceiros.

O material apresentado é de autoria de professores do Centro Paula Souza e resulta de experiência na docência e da pesquisa em fontes como livros, artigos, jornais, internet, bancos de dados, entre outras, com a devida autorização dos detentores dos direitos desses materiais ou contando com a permissibilidade legal, apresentando, sempre que possível, a indicação da autoria/crédito e/ou reserva de direitos de cada um deles.

Todas as obras e imagens expostas nesse trabalho são protegidas pela legislação brasileira e não podem ser reproduzidas ou utilizadas por terceiros, por qualquer meio ou processo, sem expressa autorização de seus titulares.

Agradecemos as pessoas retratadas ou que tiveram trechos de obras reproduzidas neste trabalho, bem como a seus herdeiros e representantes legais, pela colaboração e compreensão da finalidade desse projeto, contribuindo para que essa iniciativa se tornasse realidade. Adicionalmente, colocamo-nos à disposição e solicitamos a comunicação, para a devida correção, de quaisquer equívocos nessa área porventura cometidos em livros desse projeto.

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa, uma iniciativa do Governo do Estado de São Paulo, resulta de um esforço colaborativo que envolve diversas frentes de trabalho coordenadas pelo Centro Paula Souza e é editado pela Fundação Padre Anchieta. A responsabilidade pelos conteúdos de cada um dos trabalhos/textos inseridos nesse projeto é exclusiva do autor. Respeitam-se assim os diferentes enfoques, pontos de vista e ideologias, bem como o conhecimento técnico de cada colaborador, de forma que o conteúdo exposto pode não refletir as posições do Centro Paula Souza e da Fundação Padre Anchieta.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Bibliotecária Silvia Marques CRB 8/7377)

B276

Barrios, Daniel Benítez

Mecânica: métodos e processos industriais / Daniel Benítez Barrios, Luís Antonio Pivetta, Nélson Kodi Yoshikawa (autores); Edvaldo Angelo (coautor); Antonio Carlos Baffi (revisor); Meire Satiko Fukusawa Yokota (coordenadora). -- São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Mecânica, v. 5)

Manual técnico Centro Paula Souza

ISBN 978-85-8028-043-2

I. Mecânica - processos industriais 2. Indústria - fundição 3. Indústria - usinagem I. Pivetta, Luís Antonio II. Yoshikawa, Nélson Kodi III. Angelo, Edvaldo IV. Baffi, Antonio Carlos V. Yokota, Meire Satiko Fukusawa VI. Título

CDD 607



GOVERNADOR

Geraldo Alckmin

VICE-GOVERNADOR

Guilherme Afif Domingos

SECRETÁRIO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Paulo Alexandre Barbosa





Presidente do Conselho Deliberativo

Yolanda Silvestre

Diretora Superintendente

Laura Laganá

Vice-Diretor Superintendente

César Silva

Chefe de Gabinete da Superintendência

Elenice Belmonte R. de Castro

Coordenadora da Pós-Graduação,

Extensão e Pesquisa

Helena Gemignani Peterossi

Coordenador do Ensino Superior

de Graduação

Angelo Luiz Cortelazzo

Coordenador de Ensino Médio e Técnico

Almério Melquíades de Araújo

Coordenadora de Formação Inicial e

Educação Continuada

Clara Maria de Souza Magalhães

Coordenador de Desenvolvimento

e Planejamento

João Carlos Paschoal Freitas

Coordenador de Infraestrutura

Rubens Goldman

Coordenador de Gestão Administrativa

e Financeira

Armando Natal Maurício

Coordenador de Recursos Humanos

Elio Lourenço Bolzani

Assessora de Comunicação

Gleise Santa Clara

Procurador Jurídico Chefe

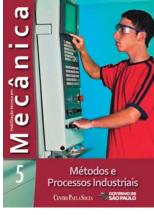
Benedito Libério Bergamo



19	Capítulo I
	Processos de fundição

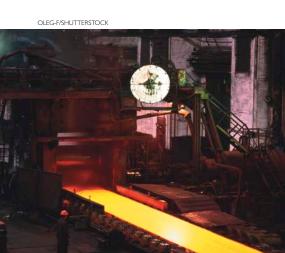
I.I Introdução20
I.2 Definição
I.3 Processos de fundição
I.4 Importância da fundição
I.5 Fundição em areia
1.5.1 Sequência do processo para fundição
em areia 21
1.5.2 Modelos de caixas de macho
1.5.3 Diferentes tipos de machos e sua
colocação nos moldes
I.5.4 Material para construção dos modelos 28
I.5.5 Contração de solidificação 28
1.5.6 Ângulos de saída
1.3.6 Aliguios de Salda
I.5.7 Areias para confecção de moldes
_
1.5.7 Areias para confecção de moldes
I.5.7 Areias para confecção de moldes e machos
1.5.7 Areias para confecção de moldese machos
1.5.7 Areias para confecção de moldese machos
1.5.7 Areias para confecção de moldes e machos 30 1.5.8 Misturadores de areia 33 1.5.9 Métodos de moldagem 35 1.5.10 Sistema de alimentação 36
1.5.7 Areias para confecção de moldes e machos
1.5.7 Areias para confecção de moldes e machos 30 1.5.8 Misturadores de areia 33 1.5.9 Métodos de moldagem 35 1.5.10 Sistema de alimentação 36 1.6 Fundição em casca – shell molding 41 1.6.1 Preparação do molde 41
1.5.7 Areias para confecção de moldes e machos
1.5.7 Areias para confecção de moldese machos301.5.8 Misturadores de areia331.5.9 Métodos de moldagem351.5.10 Sistema de alimentação361.6 Fundição em casca – shell molding411.6.1 Preparação do molde411.7 Fundição em moldes permanentes421.7.1 Fundição em moldes permanentes por
1.5.7 Areias para confecção de moldese machos301.5.8 Misturadores de areia331.5.9 Métodos de moldagem351.5.10 Sistema de alimentação361.6 Fundição em casca – shell molding411.6.1 Preparação do molde411.7 Fundição em moldes permanentes421.7.1 Fundição em moldes permanentes por gravidade (fundição em coquilha)43

	1.9 Fundição centrifuga49
	I.9.1 O processo
	1.9.2 Aplicação e vantagens do processo 52
	1.10 Fundição de precisão – processo da
	cera perdida
	I.10.1 Investment casting
	I.10.2 O processo
	1.10.3 Aplicações e vantagens do processo 52
55	Capítulo 2
	Processos de conformação mecânica
	-
	2.1 Processos primários
	2.1.1 Características do trabalho a quente 56
	2.1.2 Características do trabalho a frio 57
	2.2 Laminação
	2.2.1 Condições de agarramento e
	arrastamento do produto 59
	2.2.2 Equipamento e funcionamento do
	laminador
	2.2.3 Classificação dos laminadores 61
	2.2.4 Posicionamento das gaiolas 65
	2.3 Trefilação
	2.3.1 O processo de trefilação 66
	2.3.2 Trefilação de tubos
	2.3.3 A matriz 67
	2 3 4 O material estirado 68



Capa: Guilherme Augusto Oliva, aluno do Centro Paula Souza Foto: Eduardo Pozella e Carlos Piratininga





2.4	Forjai	mento
	2.4.1	O forjamento em matriz aberta 69
	2.4.2	Máquinas para o forjamento em matrizes
		abertas
	2.4.3	O forjamento em matrizes fechadas 77
	2.4.4	Máquinas para o forjamento em matrizes
		fechadas
2.5	Extru	ısão
	2.5.1	Processos de extrusão
	2.5.2	Extrusão a quente 84
	2.5.3	Extrusão a frio
	2.5.4	Alguns processos usados para fabricação
		de tubos
2.6	Estan	npagem
	2.6.1	Vantagens e desvantagem no processo de
		estampagem
	2.6.2	Operações de estampagem 90
	2.6.3	Prensas utilizadas nas operações de
		estampagem
	2.6.4	Porcentagem de penetração do macho 92
	2.6.5	Folga de corte 94
	2.6.6	Estudo da tira
	2.6.7	Cálculo da força necessária ao corte 101
	2.6.8	Operações de estampagem 106
	2.6.9	Operações de corte 106
	2.6.10	DobramentoII0
	2.6.11	Repuxo



123 Capítulo 3

Processos de soldagem

. •	cosses as solumber.
3.1	Classificação dos processos de soldagem 12
3.2	Soldagem manual com eletrodo revestido,
	por meio do arco elétrico
	3.2.1 Propriedades da soldagem a arco 12
	3.2.2 O revestimento do eletrodo e suas
	funções
	3.2.3 Classificação dos eletrodos 12
	3.2.4 Seleção do eletrodo
	3.2.5 Máquinas de solda ao arco elétrico 13
	3.2.6 Escolha da máquina de solda 13
3.3	Juntas
	3.3.1 Posições de soldagem
	3.3.2 Preparação para juntas de topo 14
	3.3.3 Juntas em ângulo
	3.3.4 Junta sobreposta
3.4	Processos de solda automáticos e semiautomáticos
	com proteção gasosa do arame de solda e arco
	elétrico como fonte de calor 14
	3.4.1 Processo MIG/MAG
	3.4.2 Variáveis de soldagem
	3.4.3 Soldagem MAG – avanço manual, passe
	simples
	3.4.4 Processo TIG 15
3.5	Processo de solda automático ou semiautomático
	com proteção de fluxo granular do arame de solda

e arco elétrico como fonte de calor 152



3.5.1 Soldagem com arco submerso...... 152

	<u> </u>	
	3.5.2 Processo de soldagem elétrica em banho	4.6 Roscamento
	de escória – processo electroslag 154	4.6.1 Ferramentas e tipos de roscamento
	3.6 Processo de soldagem por resistência elétrica . 155	em ajustagem 179
	3.6.1 Variáveis do processo 156	
	3.6.2 Ciclos de operação 157	181 Capítulo 5
	3.6.3 Tipos de solda por resistência 159	Usinagem – máquinas e operações
		5.1 Processos de transformação por usinagem $ ightarrow$
163	Capítulo 4	manufatura
	Ajustagem	5.2 Tipos de processos de fabricação 183
	4.1 Instrumentos de medição utilizados na	5.3 Conceito e importância da usinagem 184
	ajustagem	5.4 Processos e qualidade na usinagem 186
	4.1.1 Escala	5.4.1 Tendências no desenvolvimento
	4.1.2 Paquímetro universal quadrimensional 165	de máquinas-ferramenta
	4.1.3 Micrômetro	
1	4.1.4 Relógios comparadores, relógios	189 Capítulo 6
	apalpadores e base magnética 166	Usinagem: parâmetros, fluidos de
	4.1.5 Calibrador traçador de altura 167	corte, cavacos e ferramentas
	4.1.6 Transferidor	6.1 A importância e a formação do cavaco 193
	4.2 Limagem	6.2 Influências que definem o tipo e a forma
	4.2.1 Escolha da lima	do cavaco
40	4.2.2 Acabamento com baixa rugosidade 172	6.3 Fluidos de corte
HUTTERSTOCK	4.3 Serramento	6.3.1 Classificação dos fluidos de corte 199
	4.3.1 Serramento manual	6.3.2 Formas de aplicação dos fluidos
	4.4 Traçagem	de corte
	4.4.1 Outros acessórios e ferramentas para	6.3.3 Problemas comuns no uso de fluidos
	traçagem	de corte
	4.5 Atividades da tecnologia de furação	6.3.4 Purificação de fluidos de corte 202
	em ajustagem	6.4 Ferramenta de corte





INDÚSTRIA ADDN-SERTÃOZINHO-SP/WWW.ADDN.C

	6.4.1 Requisitos desejados em ferramenta de	
	corte	04
	6.4.2 Evolução dos principais materiais para	
3	ferramenta de corte	04
	6.4.3 Desgaste e avarias das ferramentas 2	30
Jine	6.5 Parâmetros e grandezas de corte 2	09
	6.5.1 Velocidade de corte $(V_C) \dots 2$	09
N.COM.BR	6.5.2 Avanço (f_n) e velocidade de avanço (V_A) . 2	:12
	6.5.3 Profundidade de corte (ap) 2	:12
	6.6 Cálculo do tempo de usinagem 2	13
215	Capítulo 7	
	Usinagem – folhas de processo	
	7.1 A folha de processo	17
	7.2 Planejamento do processo 2	23
225		
225	Capítulo 8	
	Torneamento	
	8.1 Definições em torneamento 2	27
	8.1.1 Tipos de torneamento 2	28
	8.2 Características e tipos de máquinas em	
	torneamento2	31
	8.2.1 Torno mecânico universal paralelo	
	horizontal 2	31
	8.2.2 Tornos verticais 2	33
	8.2.3 Torno revólver	34
	8.2.4 Tornos multifusos	35

	8.2.5 Tornos automáticos – numericamente
	comandados (CNC) 235
	8.2.6 Tornos especiais
8.3	Fixação da peça e acessórios em
	torneamento
8.4	Furar, roscar e recartilhar no torno 239
	8.4.1 Furar
	8.4.2 Roscar no torno
	8.4.3 Recartilhar no torno 242
8.5	Seleção da ferramenta e máquina no
	torneamento
8.6	Ferramentas para tornear 243
8.7	Cinemática do torneamento 247
8.8	Requisitos de potência para o torneamento 248
8.9	Considerações importantes 248
_	
	oítulo 9
	samento
9.1	Definições em fresamento 254
9.2	Ferramenta para fresar
	9.2.1 A estrutura das fresas 258
	9.2.2 Tipos de fresas
	9.2.3 A forma das fresas 260
	9.2.4 A fixação
9.3	Tipos e característica de fresadoras 262
	9.3.1 Fresadora ferramenteira e fresadora

9.4 Parâmetros de corte no fresamento – cálculos 265

253





_			
SL	.AVIKBIG	/SHUT	TERST

281

9.5	Tipos de fresamento e influências da operação 268	
	9.5.1 Ferramentas de acabamento 270	,
9.6	Usinagem de carcaças	
9.7	Principais acessórios	
	9.7.1 Acessórios para a fixação da peça 275	
	9.7.2 Acessórios para a fixação das ferramentas 276	
9.8	Fresamentos com aparelho divisor 277	
	9.8.1 Fresamento de engrenagens cilíndricas	
	de dentes retos	
	9.8.2 Fresamento de engrenagens cilíndricas	
	de dentes helicoidais	,
	oítulo 10	
Fur	ação	
10.1	Definições em furação 282	
10.2	2 Broca helicoidal	
	10.2.1 Forma construtiva das brocas helicoidais 285	
	10.2.2 Materiais para brocas 286	
10.3	3 Furação profunda	
	10.3.1 Requisitos, fatores limitantes e ferramentas	
	utilizadas nos processos de furação	
	profunda287	
10.4	1 Variações no processo de furação 290	
	10.4.1 Furos combinados e rebaixamento 290	
	10.4.2 Alargamento 291	
	10.4.3 Roscamento com machos 291	
10.5	5 Critério de fim de vida na furação 292	

10.6	Erros comuns na geometria do furo	293
10.7	Escolha da furadeira	293
	10.7.1 Partes de uma furadeira	294
	10.7.2 Tipos de furadeiras	294
10.8	Dispositivos e acessórios	295
10.9	Segurança no processo de furação	295



297 Capítulo I I Retificação

IXCCI	ncação
11.1	Definições em retificação 298
11.2	Tipos de retificação
	II.2.1 Retificação tangencial
	II.2.2 Retificação frontal 300
11.3	Retificadora302
	II.3.1 Retificadora plana
	11.3.2 Retificadora cilíndrica universal 303
	11.3.3 Retificadora sem centros (centerless) 304
11.4	Especificação, seleção e tipos de rebolos 304
	II.4.1 Tamanho de grão 306
	II.4.2 Materiais abrasivos 306
11.5	Operações nos rebolos
11.6	Cuidados na utilização e montagem dos rebolos 308
11.7	Fluidos de corte
	11.7.1 Forma de aplicação dos fluidos de corte 309
11.8	Retificação versus torneamento duro em peças
	cilíndricas 310

11.9 Cuidados recomendados na hora de retificar. . 311

313 Capítulo 12 Tecnologia CNC – tornos e centros de usinagem

12.1	l Benefícios pelo uso de máquinas CNC e		
	influêr	ncias	315
12.2	Comp	oonentes de uma máquina CNC, dados	
	de má	quina e funcionamento	316
12.3	Progra	amação CNC	320
	12.3.1	Sistema de coordenadas na máquina	
		CNC	321
	12.3.2	Ponto zero e pontos de referência	322
	12.3.3	Sistema de coordenadas absolutas	326
	12.3.4	Sistema de coordenadas incrementais	327
12.4	Progra	amação verbal – códigos, funções e	
	caract	eres para a programação	329
	12.4.1	Exemplos de programação – geometrias	5
		com descrição	330
	12.4.2	Estrutura de programação CNC e lista	
		de códigos	333
	12.4.3	Exemplos de programas CNC	336

- 341 Apêndice Identificação ISO das pastilhas ou insertos
- 351 Referências bibliográficas





I.I Introdução

Neste capítulo são apresentados os diversos tipos de fundição utilizados na indústria, com exemplos práticos de aplicação, e as várias etapas do processo, desde a construção de modelos, a fundição propriamente dita até o acabamento.

Os conhecimentos contidos neste livro são suficientes para que o técnico de nível médio desenvolva com êxito suas atividades na indústria.

I.2 Definição

A fundição é realizada com metal fundido, isto é, com metal em estado líquido. Nesse processo, as peças são conformadas pela solidificação por resfriamento. As fotos da figura 1.1 mostram um forno de fundição.

Figura 1.1 Forno de fundição.





1.3 Processos de fundição

Os processos utilizados atualmente são os seguintes:

- fundição em areia;
- fundição em cascas (shell molding);
- fundição em moldes metálicos (por gravidade ou sob pressão);
- fundição centrífuga;
- fundição de precisão (cera perdida, moldes cerâmicos).

1.4 Importância da fundição

O produto obtido pelo processo de fundição sai do molde praticamente com todas as exigências de serviço satisfeitas e não precisa, em geral, de usinagem posterior.

Pode-se afirmar, portanto, que peças fundidas são mais baratas e, por isso, mais utilizadas no ramo da metalurgia.

1.5 Fundição em areia

Quando se trabalha com ferro e aço, o processo mais adequado é o de fundição em areia.

1.5.1 Sequência do processo para fundição em areia

O fluxograma da figura 1.2 ilustra as etapas seguidas no processo de fundição em areia.

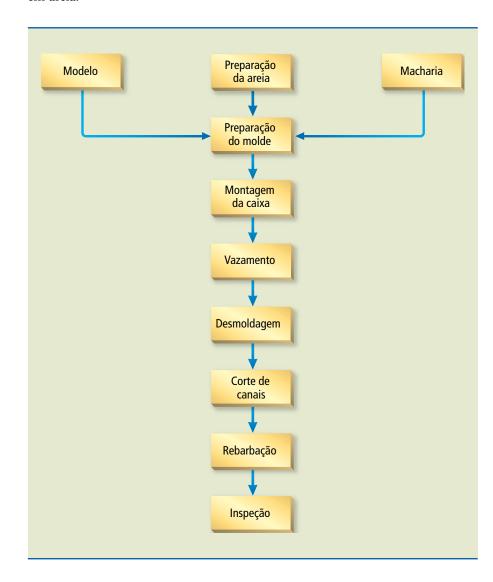


Figura 1.2 Etapas no processo de fundição em areia.

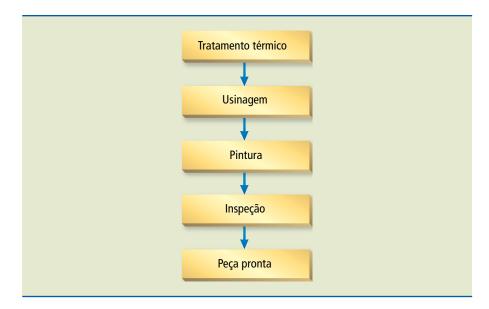




Processos complementares

A figura 1.3 mostra os procedimentos complementares para dar o acabamento final nas peças fundidas.

Figura 1.3
Processos complementares
para o acabamento
final das peças.



1.5.2 Modelos de caixas de macho

Modelo é uma peça de madeira, metal ou outro material adequado (plásticos, resinas epóxi, cera, gesso etc.), ao redor do qual é compactado o material de moldagem, dando forma à cavidade do molde que receberá o material fundido.

O modelo é feito com base no desenho da peça a ser fundida, acrescentando:

- o material necessário para compensar a contração do metal durante seu resfriamento no estado sólido;
- o sobremetal necessário nas superfícies que serão usinadas posteriormente;
- uma inclinação nas paredes verticais, chamada ângulo de saída, para propiciar a fácil retirada do modelo de dentro do molde de areia;
- em alguns casos, saliências no modelo, chamadas marcações de machos, para fixação dos machos usados no molde;
- às vezes, um sistema de alimentação (canais e massalote) incorporado ao modelo (figura 1.4).

Figura 1.4Sistema de alimentação em uma peça fundida.





Classificação dos modelos

Os modelos podem ser classificados nos tipos descritos a seguir.

Modelo solto monobloco

Mostrado na figura 1.5, é o tipo mais simples.

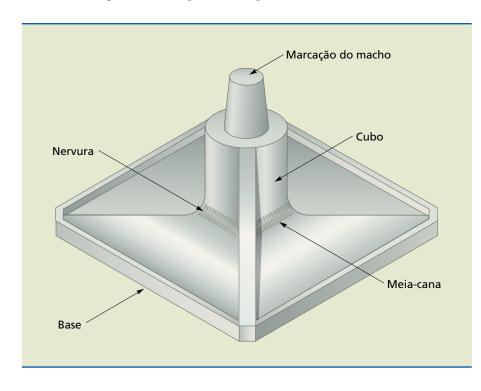


Figura 1.5Modelo solto monobloco.

Esse modelo em geral apresenta superfície plana, que serve de apoio na moldagem.

Os canais e massalotes podem ser acrescentados como apêndices ou cortados à mão no molde.

Esse tipo de modelo é usado apenas para peças simples ou pequenas séries de produção, por causa do baixo rendimento na moldagem.

Modelo solto bipartido

Como apresentadas na figura 1.6, as duas partes do modelo podem ser ou não iguais. A superfície que as separa é a linha de divisão entre as duas partes do molde (tampa e fundo da caixa).

O alinhamento entre as duas partes do modelo é obtido por meio de encaixe por cavilhas.

Sempre que possível a superfície de separação entre as duas partes do modelo deve ser plana para permitir a colocação sobre uma placa a fim de facilitar a moldagem.





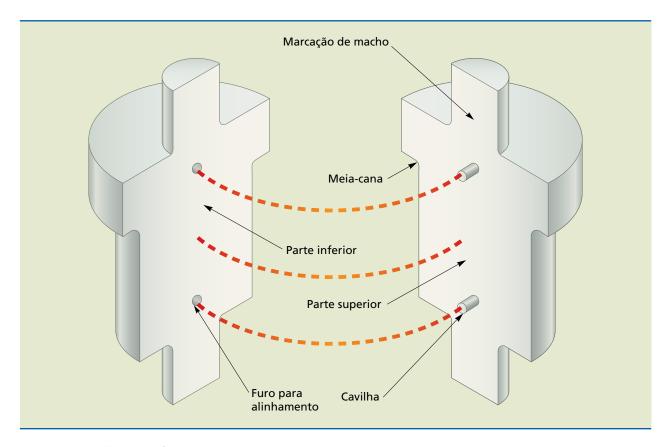
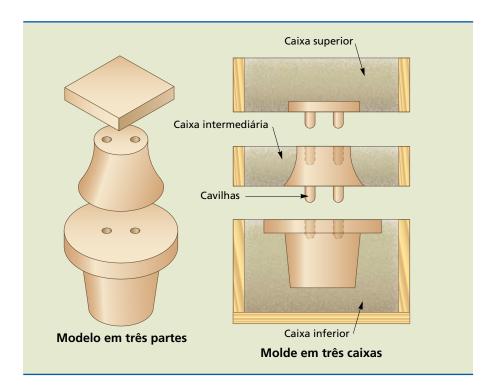


Figura 1.6 Modelo solto bipartido.

Modelo solto múltiplo

Esse tipo de modelo, ilustrado na figura 1.7, é usado para peças mais complicadas, que exigem caixas de moldagem com mais de duas partes.

Figura 1.7 Modelo solto múltiplo.



Chapelona

A chapelona (figura 1.8) consiste em um gabarito feito com uma prancha de madeira, reforçada nas beiradas e fixada a uma haste metálica. Ela permite a obtenção de moldes circulares ao se girar a prancha em volta da haste. Geralmente existe um macho que é encaixado no molde para a obtenção da forma definitiva da peça. As chapelonas são usadas para suportar o macho e garantir a regularidade da espessura da parede da peça. Na fusão, elas são incorporadas à peça.

A chapelona é utilizada para peças grandes, circulares, que não exigem muita precisão dimensional.

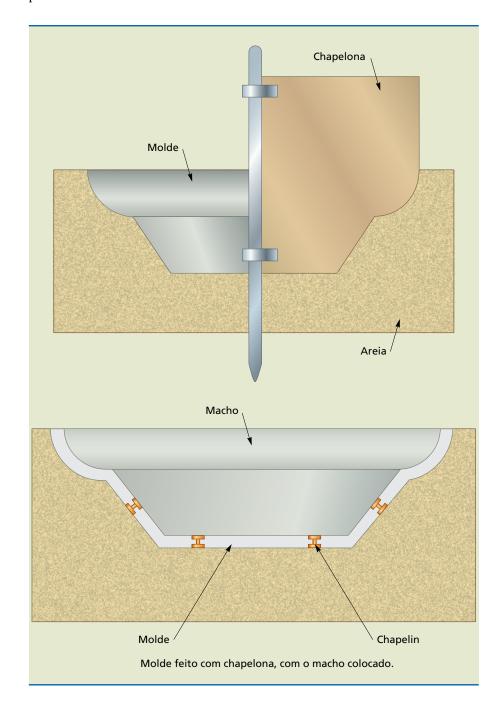


Figura 1.8 Chapelona.





Modelo em placa

O modelo em placa (figuras 1.9 e 1.10) consiste na colocação do modelo em uma placa, visando maior produtividade mediante a utilização de máquinas de moldar e maior precisão na moldagem, já que as placas apresentam em geral pinos ou buchas como guias para fixação nas respectivas caixas de moldagem.

Figura 1.9 Modelo em placa.

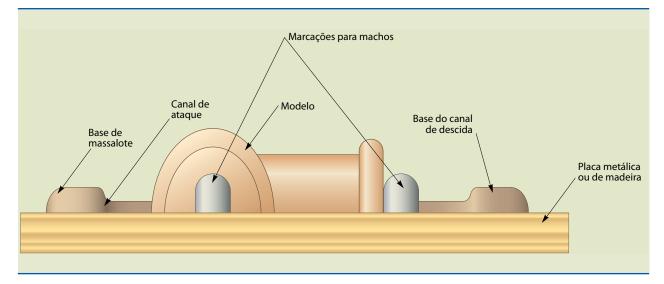
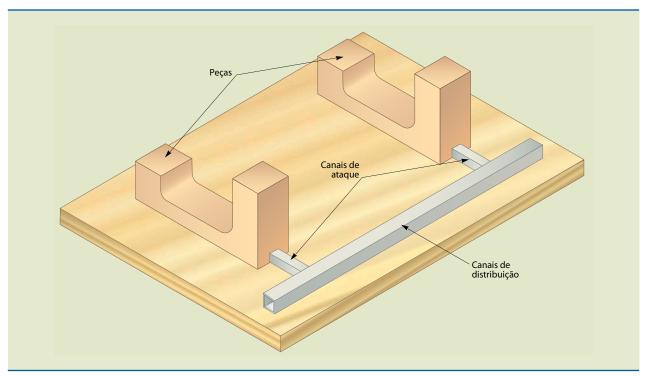


Figura 1.10Modelos múltiplos
em placa com sistema
de alimentação.



1.5.3 Diferentes tipos de machos e sua colocação nos moldes

A função dos machos (figura 1.11) é ocupar espaços no molde onde o metal fundido não penetra, formando, assim, o oco das peças. Os machos normalmente são feitos de areia endurecida e podem ser reforçados por estrutura de arame.

Os machos devem permitir a contração das peças no resfriamento do metal, bem como sua fácil remoção da peça pronta.

Figura 1.11Diferentes tipos de machos.

Peça Fundida	Modelo	Macho	Caixa de macho	Molde acabado





MECÂNICA 5

1.5.4 Material para construção dos modelos

A decisão sobre o material que se deve utilizar na construção dos modelos depende de vários fatores, como:

- quantidade de peças a serem fundidas;
- precisão dimensional necessária e acabamento superficial;
- tamanho e formato do fundido.

A tabela 1.1 mostra uma comparação entre as características mais importantes dos materiais utilizados em modelos.

Tabela I.I Comparação das características de materiais para modelos.

Comononíaire	Material para modelo				
Característica	Madeira	Alumínio	Aço	Plástico	
Usinabilidade	E	В	R	В	
Resistência ao desgaste	Р	В	E	R	
Resistência mecânica	R	В	E	В	
Peso ¹	E	В	Р	В	
Possibilidade de reparos	E	Р	В	R	
Resistência a: corrosão² inchamento²	E P	E E	P E	E E	

¹ Como fator de fadiga do operador.

Legenda: E = Excelente; B = Bom; R = Regular; P = Pobre.

Muitos modelos são feitos de dois ou mais materiais diferentes. Por exemplo, em locais de muito desgaste, podemos inserir aço em um modelo de madeira.

1.5.5 Contração de solidificação

Todo metal ou liga fundido, ao passar de estado líquido a estado sólido, sofre contração. A contração pode ser classificada de duas maneiras: aquela observada quando o material se resfria ainda no estado líquido (definida como contração líquida), e aquela observada durante o resfriamento do material já no estado sólido (definida como contração sólida).

Para compensar a contração líquida, devem ser previstos massalotes e, para compensar a contração sólida, o modelo precisa ter suas dimensões um pouco maiores que as da peça que se quer obter.

Seguem alguns exemplos (tabela 1.2) da porcentagem de contração de alguns metais que deve ser compensada com aumento dimensional do modelo.

Material	Contração
Aços	1,5% a 2,0%
Ferro fundido cinzento	0,8%
Ferro fundido dúctil	0,8% a 1,0%
Alumínio 355 e 356	1,5%
Alumínio 13	1,0%
Cobre – cromo	2,0%
Bronze ao estanho	1,0%
Bronze ao silício	1,0%
Bronze ao manganês	1,5%
Bronze ao alumínio	1,5%

Tabela 1.2Porcentagem de contração de alguns metais.

1.5.6 Ângulos de saída

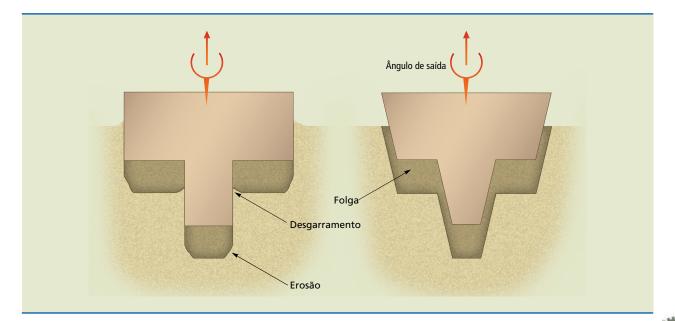
O ângulo de saída é o ângulo que se dá às paredes laterais do modelo para poder extraí-lo do molde de areia.

A figura 1.12 esquematiza os problemas provocados no molde quando não há ângulo de saída no modelo.

Numericamente, o ângulo pode variar entre 0,5° a 2° e, em alguns casos, como em marcações de machos, chegar a 5°.

Figura 1.12

Molde sem e com
ângulo de saída.





² Pelo ataque de água.

1.5.7 Areias para confecção de moldes e machos

As areias para a elaboração de moldes e machos devem reunir uma série de propriedades, a fim de que os moldes sejam construídos com facilidade e as peças obtidas de acordo com eles tenham a qualidade requerida, ou seja, não apresentem defeitos. A seguir, a descrição dessas propriedades.

Moldabilidade

Capacidade que deve ter a areia de moldagem de adotar fielmente a forma do modelo e de mantê-la durante o processo de fundição.

Refratariedade

É a capacidade do material de moldagem de resistir à temperatura de vazamento do metal sem que haja fusão dos grãos de areia.

Estabilidade térmica dimensional

O material de moldagem não pode sofrer grandes variações dimensionais, quando submetido às mudanças de temperatura que ocorrem nos moldes por ocasião do vazamento do metal fundido.

Inércia química em relação ao metal líquido

Em princípio, o material de moldagem não deve reagir com o metal líquido ou com os gases presentes na cavidade do molde.

Colapsibilidade versus resistência a quente

A colapsibilidade é a qualidade que deve ter a areia de moldagem de ceder, quando submetida aos esforços resultantes da contração da peça ao se solidificar. Se o molde (ou o macho) não for colapsível, poderá ocorrer o rompimento de todas as peças ou a formação de "trincas a quente". As paredes do molde e os machos devem ter resistência suficiente a quente para suportar os esforços em consequência do impacto e empuxo exercidos pela massa de metal que enche o molde.

Permeabilidade aos gases

É a propriedade que devem ter os moldes de deixar passar através de si o ar, os gases e os vapores existentes ou gerados em seu interior, por ocasião do vazamento do metal. Os gases presos no interior dos moldes podem dar origem a defeitos, como cavidades originadas por bolhas na superfície externa da peça.

Desmoldabilidade

É a facilidade com que se pode retirar uma peça do interior do molde, de modo a obter um fundido isento de resíduos e material de moldagem.

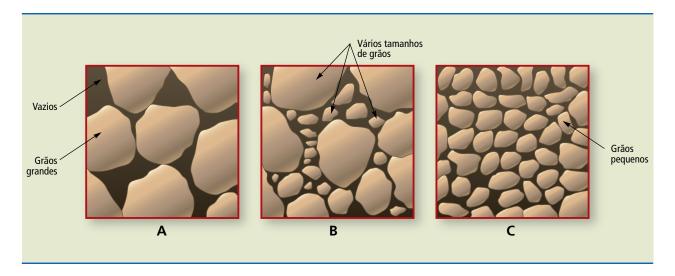
Composição das areias de moldagem

Tipos de areia

As areias de sílica são as mais utilizadas nas operações de moldagem. São em geral de dois tipos: as ligadas naturalmente e as sintéticas.

As naturais são compostas em geral de sílica, argila e água. A sílica (SiO_2) tem forma de grãos arredondados de vários tamanhos. Como é compressível, sua permeabilidade diminui quanto mais fino for o grão e quanto mais variados forem os tamanhos de grão. A figura 1.13 mostra três situações diferentes quanto ao tamanho de grão.

Figura 1.13Diferentes tamanhos de grão.



Para boa porosidade, a sílica deve ser como a mostrada na situação A da figura 1.13, isto é, ter grãos uniformes e não muito finos. A proporção de sílica varia de 80% a 95% nas areias de moldagem, e seu ponto de fusão é de 1 650 °C.

As argilas são silicatos de alumínio que funcionam como aglutinantes e formam, ao se umedecerem, uma massa plástica que liga os grãos de sílica.

A resistência da areia aumenta com a proporção da argila, mas, à medida que esta aumenta, diminui a porosidade, pois a massa formada pela argila é impermeável. Seu ponto de fusão é de $1\,250\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Por motivos de permeabilidade e temperatura de fusão, as areias muito argilosas são utilizadas apenas para fundição de metais de baixo ponto de fusão, como o alumínio (700 °C).

Segundo o conteúdo de argila, as areias classificam-se em:

- magras: 4% a 8%;
- semigordas: 10% a 15%;
- gordas: mais de 15%.





MECÂNICA 5

A proporção de umidade varia entre 5% e 10%. Esse conteúdo de água influencia na plasticidade, permeabilidade e resistência dos moldes, portanto, deve ser constantemente verificado e mantido dentro do nível ideal.

As areias sintéticas são preparadas à base de areia sílica e um aglomerante mineral, a bentonita, mineral que se encontra sob forma de um pó finíssimo. Quando umedecida, ela se torna uma massa muito compacta.

A quantidade de bentonita para preparação da areia é muito menor que a de argila (1% a 5%), o que torna a permeabilidade da areia muito maior.

Para a fabricação de machos, além da areia sílica e da bentonita, são juntados outros aglutinantes para favorecer o endurecimento da areia. Esses aglutinantes podem ser:

- a) **óleos** (principalmente óleo de linhaça) e materiais cereais (farinha de trigo, de milho etc.). Os machos preparados com esses aglutinantes são endurecidos em estufa e apresentam boa resistência e fácil desmoldagem.
- b) **resinas sintéticas** (ureia, fenólicas ou furânicas). A aplicação de resina sintética como aglutinante permite maior rapidez de preparação do macho (menos tempo de estufa), facilidade de retirada dos machos, eliminação de gases e melhor acabamento.
- c) **silicato sódico + anidrido carbônico** (CO₂). Consiste em misturar sílica seca com um aglutinante à base de silicato sódico, preencher as caixas de machos com esse preparado e secá-lo em seguida, de forma contínua, fazendo passar CO₂ pela massa. O CO₂ provoca uma reação química que endurece a areia pela formação de um gel coloidal de silício.

Esse processo elimina o uso de estufa, possui grande rapidez de preparação e evita, também, por sua grande resistência, a necessidade de suportes e armaduras interiores.

Preparação das areias de moldagem

As areias, por estarem em contato com o metal fundido, perdem suas propriedades, sendo necessário misturá-las com areia nova.

A tabela 1.3 mostra a preparação de areias de moldagem, aglomeradas naturalmente, para a fundição de ferro.

Espessura da peça Pó de carvão Até 6 mm 20 partes 6 partes 1,5 parte De 6 a 12 mm 8 partes 20 partes 1,75 parte De 12 a 20 mm 10 partes 20 partes 2,5 partes De 20 a 35 mm 15 partes 20 partes 3 partes De 35 a 60 mm 4 partes 20 partes 20 partes

Tabela 1.3Preparação de areias
de moldagem para a
fundição de ferro.

As areias devem ser preparadas em máquinas misturadoras. São utilizadas como areia de moldagem, propriamente ditas, para cobrir o modelo, distinguindo-se das areias de enchimento, usadas apenas para encher as caixas e, como não estão em contato com o modelo, não influenciam no acabamento das peças fundidas. As areias de enchimento podem ter qualidade inferior, ou ser areia velha.

1.5.8 Misturadores de areia

São equipamentos utilizados para o preparo das areias de moldagem, pela mistura de todos os seus componentes, a fim de se obterem areias com as características desejadas para cada aplicação.

Os misturadores mais comumente encontrados nas fundições são:

a) Misturador contínuo (figura 1.14).

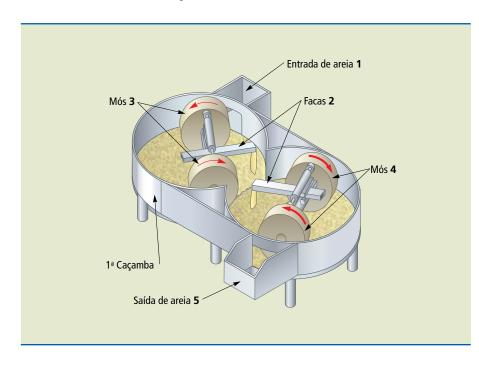


Figura 1.14Misturador contínuo.

Como mostra a figura, a areia é introduzida através de 1 e levada para dentro do misturador pelas facas 2, sendo misturada uma vez pelos mós 3 da primeira caçamba e transferida a seguir para uma segunda caçamba, onde é novamente misturada em 4, saindo a mistura pronta em 5. Esses misturadores são projetados para produção contínua em altas quantidades.

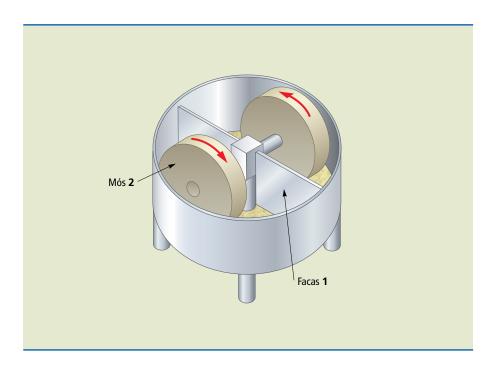
b) Misturador intermitente com mós verticais (figura 1.15).

Esse misturador é equipado com facas 1, como mostra a figura, para levar a massa de areia para baixo dos mós verticais 2. É um processo lento, porém muito utilizado, pois se pode controlar melhor a areia de moldagem. Isso é possível pela repetição do processo; pelo processo contínuo, os mós passam sobre a areia apenas duas vezes.



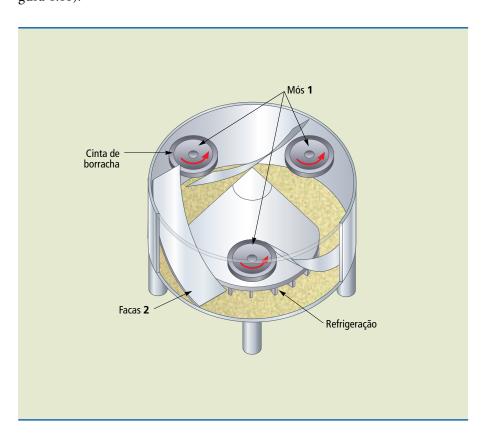


Figura 1.15Misturador intermitente com mós verticais.

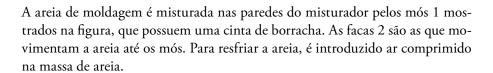


c) Misturador intermitente, de alta velocidade, com mós horizontais (figura 1.16).

Figura 1.16Misturador intermitente com mós horizontais.



Esse tipo de misturador alia os requisitos de alta produção com bom controle da areia de moldagem.



1.5.9 Métodos de moldagem

A **moldagem manual** é o método mais lento e mais antigo para produção de um molde. É também usado para moldagem em bancada ou no chão, quando se têm modelos soltos, ou ainda quando se está produzindo peças experimentais ou muito grandes.

Para a produção seriada em larga escala, são utilizadas as **máquinas de moldar**. A seguir serão descritos os principais tipos de máquinas de moldar.

Máquina de moldar por impacto

Nessa máquina, como pode ser observado na figura 1.17, todo o conjunto é elevado por um pistão pneumático e largado no fim do curso, em queda livre. A compactação da areia dá-se pelo impacto.

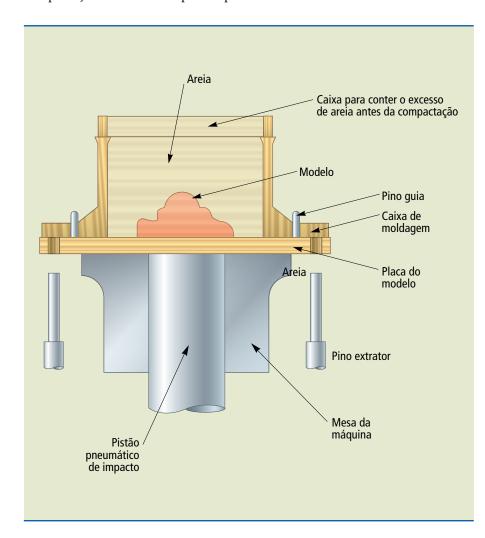


Figura 1.17Máquina de moldar por impacto.



O modelo em placa é preso à mesa por pinos guias. Depois de repetidas operações do pistão, a areia fica compactada, e a caixa com o molde é retirada da máquina por meio de pinos extratores.

Máquina de moldar por impacto e compressão

Nesse tipo de máquina combina-se a ação das máquinas de impacto com prensas de moldagem, o que resulta em moldes de muito boa qualidade. É a mais utilizada porque permite uma compactação maior da areia em volta do modelo, produzindo moldes mais resistentes e de melhor acabamento.

1.5.10 Sistema de alimentação

A função de um sistema de alimentação (figura 1.18) é permitir o enchimento completo da cavidade do molde para prevenir a ocorrência de defeitos, como inclusão de areia ou escória, e evitar que a contração líquida provoque falhas internas na peça.

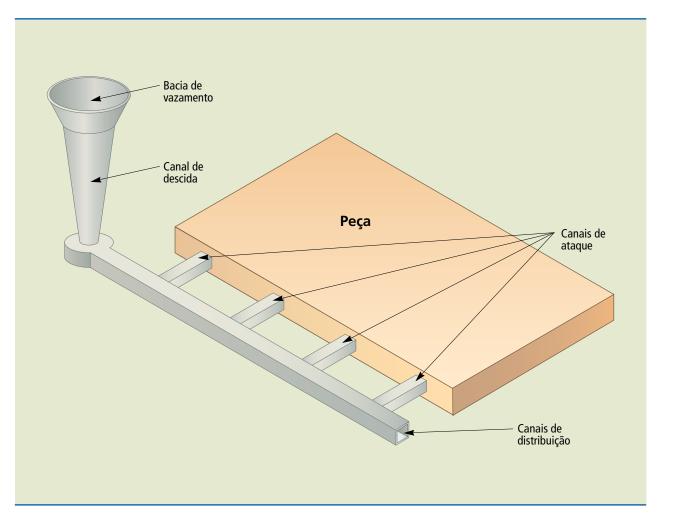
Figura 1.18Sistema de alimentação.



O sistema de alimentação deve ser projetado de maneira que a solidificação do metal seja direcionada do ponto mais distante da alimentação para o ponto mais próximo.

Elementos básicos

A figura 1.19 mostra um esquema com os elementos básicos de um sistema de alimentação.



Bacia de vazamento

Tem a função de permitir o vazamento do metal líquido da panela, sem que haja derramamento. Por esse motivo, deve-se prevenir uma seção maior. Além disso, ela fica sempre cheia para fazer com que ocorra a separação da escória do metal, por diferença de densidade.

Canal de descida

Além de permitir a passagem do metal líquido, o canal de descida procura diminuir a turbulência do metal durante a descida, daí seu formato cônico. Deve ter altura suficiente para que todo o molde seja preenchido com o metal fundido.

Canal de distribuição

Tem a função de distribuir o metal pelos vários canais de ataque. Após o último canal de ataque, possui um prolongamento que serve para conter o primeiro metal líquido que entra no molde carregando consigo sujeira e areia. Dessa maneira, esse metal não atinge nenhum canal de ataque e não estraga a peça com inclusões de areia.

Figura 1.19

Elementos básicos de um sistema de alimentação.





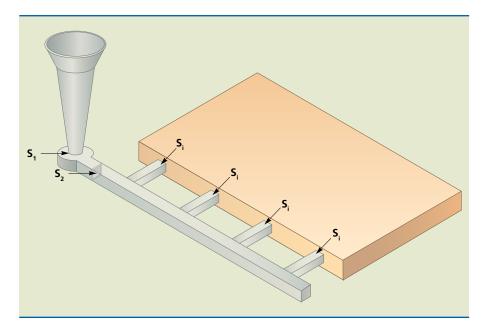
Canais de ataque

Sua correta distribuição por vários pontos da peça é que vai garantir um gradiente favorável de temperatura, evitando distorções por diferenças de temperatura nos diversos pontos.

Critérios para o dimensionamento do sistema de canais de alimentação

Considerando a figura 1.20, são adotadas as áreas S_1 , S_2 e S_i como sendo:

Figura 1.20Sistema de canais de alimentação.



S₁ – área da seção mínima do canal de descida;

 S_2 – área da seção máxima do canal de distribuição. Se há mais de um canal de distribuição, essa área é a soma das seções máximas dos canais de distribuição que convergem para um mesmo canal de descida;

S_i – área da seção mínima de cada canal de ataque.

Existem dois sistemas de canais de alimentação:

- sistema pressurizado $S_1 \ge S_2 > \sum_{i=1}^{N} S_i$
- sistema despressurizado $S_1 \le S_2 < \sum_{i=1}^{N} S_i$

Uma análise generalizada mostra que, para ligas ferrosas (aços e ferros fundidos), os sistemas geralmente são pressurizados, e que, para ligas não ferrosas, os sistemas são quase todos despressurizados.



O massalote é um reservatório de metal fundido que fornece o metal necessário para evitar vazios na peça durante a contração do metal no resfriamento, na fase líquida.

O metal vazado na cavidade do molde deve começar a se solidificar a uma distância extrema dos massalotes. Dessa maneira, os vazios causados pela contração de resfriamento movem-se progressivamente pela peça, até atingirem os massalotes, que devem ser a última região a se solidificar e a conter o vazio devido à contração do metal líquido (figura 1.21).

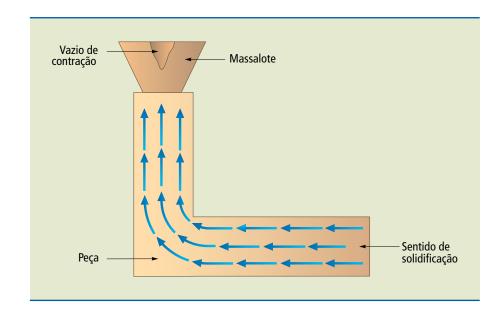


Figura 1.21
Direcionamento
da solidificação do
metal fundido.

A área de conexão peça-massalote deve ser grande o suficiente para não se solidificar antes do restante, mas não muito volumosa para não dificultar sua posterior remoção.

Resfriadores

Quando a solidificação não pode ser dirigida adequadamente para o massalote, por causa da complexidade da peça, podemos utilizar resfriadores. São pedaços de metal inseridos no molde que, em contato com o metal fundido, diminuem sua temperatura e aceleram a solidificação naquele ponto da peça.

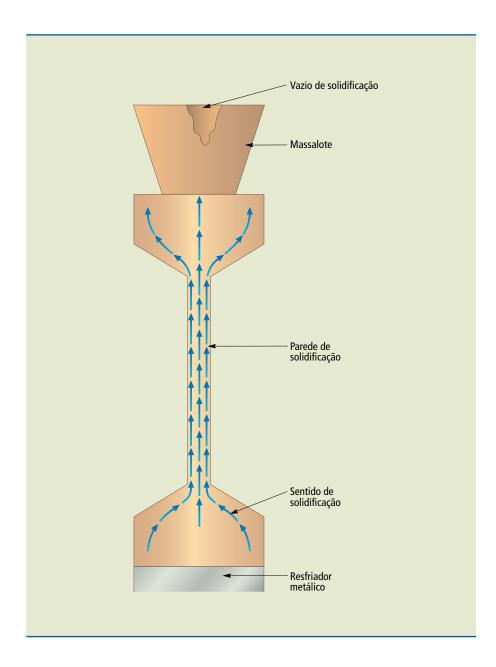
Os resfriadores podem ser externos, quando não fazem parte da peça, ou internos, quando são do mesmo metal da peça e são incorporados a ela. Não devem provocar um abaixamento muito brusco de temperatura, pois isso pode causar trincas.

No exemplo da figura 1.22, podemos observar duas grandes massas de metal separadas por uma parede fina, que vai se solidificar primeiro. Por causa disso, além dos massalotes para a massa superior, deve ser usado um resfriador para a massa inferior, de maneira que o resfriamento ocorra no sentido desejado.





Figura 1.22 Exemplo de utilização de resfriador.



Ventilações

São pequenos furos feitos na areia do molde, com arame ou estilete, para facilitar a saída de gases e vapores, sempre que a permeabilidade da areia não for suficientemente adequada para tais fins.

Rebarbação

Na remoção de canais e massalotes, os métodos mais utilizados são:

- impacto;
- disco abrasivo;
- serras;
- corte a chama.

Já na etapa de limpeza da superfície das peças, os métodos mais usados são:

- jato de areia;
- jateamento com granalha (shot peening);
- tamboreamento;
- rebolos e pontas montadas.

1.6 Fundição em casca – shell molding

Esse método de moldagem utiliza um molde de paredes delgadas. É uma espécie de envoltório (casca), feito de uma mistura de areia de quartzo de granulometria fina com aglomerante de resina fenólica. A mistura tem a propriedade de sinterizar-se formando uma casca, ao entrar em contato com a superfície do modelo metálico aquecido a cerca de 200 °C. Por ser bem permeável, esse tipo de molde permite boa passagem de gases.

I.6.1 Preparação do molde

A confecção do molde por esse método consiste em preparar a casca para as duas metades do modelo e, em seguida, uni-las com cola ou grampos, formando o molde.

A figura 1.23 fornece a sequência esquemática da elaboração de um molde tipo casca.

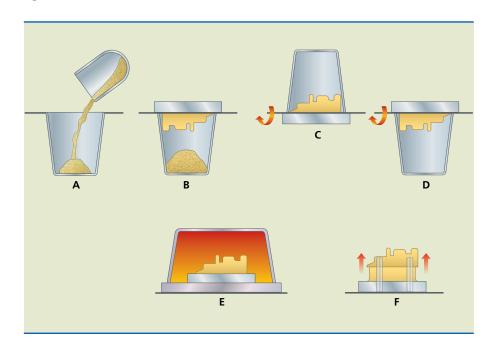


Figura 1.23
Etapas na elaboração de um molde tipo casca.

Sequência de operação

De acordo com o que está mostrado na figura 1.23, os passos são os seguintes:

• no recipiente da máquina, carrega-se a mistura de moldagem (A);





MECÂNICA 5

- a placa de modelar metálica, devidamente aquecida até a temperatura de 150 °C a 230 °C, é presa sobre o recipiente da máquina (B);
- o recipiente é girado 180° (C), de modo que a mistura de moldagem fique sobre o modelo metálico aquecido, permanecendo nessa posição por 15 a 20 segundos. Durante esse período, forma-se na superfície do modelo uma casca de 6 a 10 mm de espessura;
- o recipiente é girado novamente, voltando à posição anterior. A casca permanece aderida ao modelo e o excesso de mistura de moldagem volta para o fundo do recipiente (D);
- a placa de modelar com a casca formada é retirada do recipiente e colocada no forno de cocção, onde é mantida durante 30 a 40 segundos a uma temperatura entre 250 °C e 300 °C (E);
- a casca sinteriza e solidifica e é retirada da placa com a ajuda de pinos extratores (F);
- os moldes obtidos com esse procedimento, depois de coladas ou grampeadas suas duas partes, podem ser mergulhados em areia ou granalhas de ferro, ou ainda mantidos entre guarnições metálicas, a fim de anular a pressão hidrostática exercida pelo metal fundido.

Vantagens e aplicação de processo

Pelo processo de fundição por casca *(shell molding)* podemos obter peças de ferro fundido, aço e metais não ferrosos com peso desde dezenas de gramas até cerca de 200 kgf (aproximadamente 2 000 N).

A precisão do processo, que varia de 0,2 a 0,5 mm, aliada a um excelente acabamento superficial, permite que, em muitos casos, a usinagem posterior seja dispensada. Além disso, a superfície da peça moldada fica tão limpa que não necessita de posterior tratamento mecânico de limpeza.

Peças fundidas de paredes delgadas e com muitos detalhes também são facilmente obtidas por esse processo.

Os moldes podem ser preparados com antecedência e estocados por longo tempo. Trata-se de uma tecnologia simples e fácil de mecanizar e automatizar, daí sua crescente aplicação.

1.7 Fundição em moldes permanentes

Denomina-se fundição em molde permanente qualquer processo de fundição em que o metal líquido é vertido em um molde que pode ser utilizado várias vezes, sendo por isso denominado permanente, ao contrário dos processos vistos anteriormente (areia e *shell*), em que o molde é usado uma única vez.

Existem dois processos básicos para a fundição em moldes permanentes:

- por gravidade;
- sob pressão.

1.7.1 Fundição em moldes permanentes por gravidade (fundição em coquilha)

Nesse processo, o molde metálico também é enchido apenas pela ação da gravidade. Em geral, a matriz (molde) é aberta e fechada manualmente, entretanto é possível ser mecanizada. Os machos usados podem ser metálicos ou de areia caso em que, por sua complexidade, seria difícil retirá-los da peça pronta. A figura 1.24 ilustra um exemplo de fundição por gravidade.



Figura 1.24
Fundição em molde
permanente por gravidade.

O processo

Os moldes são em geral feitos de ferro fundido ou aço ou, ainda, de bronze, quando se quer fundir chumbo, estanho ou zinco. O tempo de serviço de um molde varia entre 3 mil a 10 mil peças para fundição de ferro, e pode chegar até a 100 mil peças para fundição de metais "moles".

Para a fundição em coquilha, o molde deve ser aquecido previamente até cerca de 150 °C, quando então é aplicado um revestimento interno. Esse revestimento, além de facilitar a posterior desmoldagem e melhorar o acabamento, poderá controlar o resfriamento da peça. Assim, existem revestimentos isolantes (à base de argila) que impedem o rápido resfriamento da peça. Consegue-se com isso fundir produtos de paredes muito finas, além de diminuir os riscos de contração no interior do molde metálico, que, por ser indeformável, aumenta o risco de trincas na peça.

Existem também os revestimentos condutores à base de grafite, utilizados para o recobrimento das partes da coquilha que correspondem às paredes mais grossas da peça que convém resfriar com rapidez. Após essa aplicação, eleva-se a temperatura da matriz até cerca de 350 °C, quando então está preparada para receber o metal líquido.





MECÂNICA 5

Aplicações e vantagens

Hoje, a fundição em coquilha é amplamente usada para metais não ferrosos (chumbo, zinco, alumínio, magnésio, estanho e suas ligas) e, em menor intensidade, para ferro fundido.

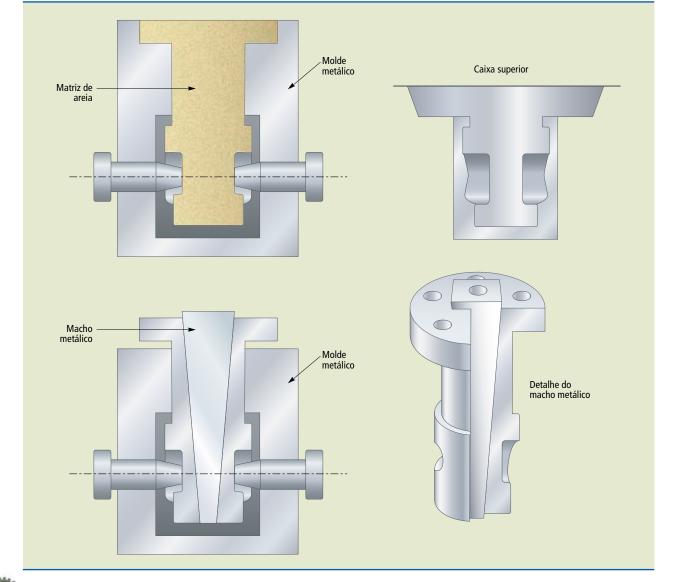
O tamanho das peças em geral não ultrapassa 25 kgf, podendo atingir até cerca de 200 kgf.

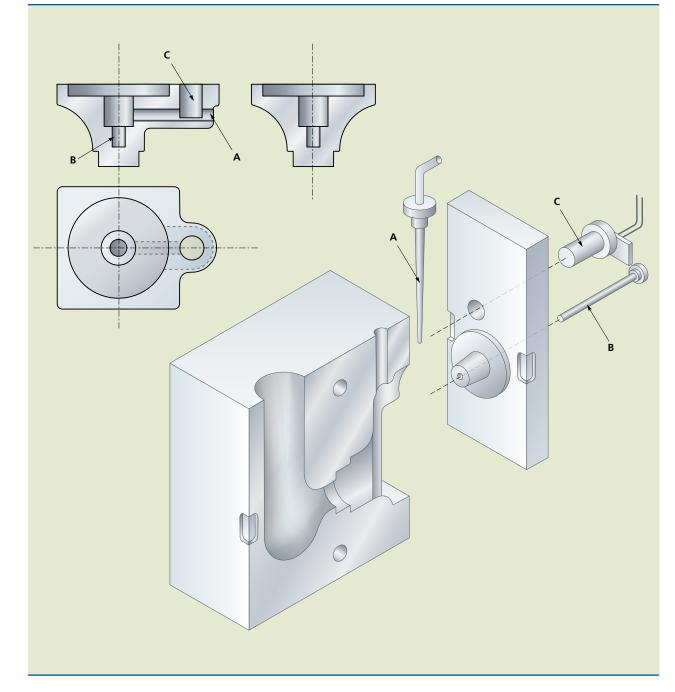
As peças obtidas nos moldes metálicos têm uma estrutura de grão fino e propriedades mecânicas elevadas, mas, por causa do resfriamento rápido, surgem tensões em suas camadas superficiais. Torna-se necessário, na maioria das vezes, submetê-las a um tratamento térmico de recozimento.

O acabamento obtido é perfeito, com precisão da ordem de 0,1 mm. As figuras 1.25 e 1.26 mostram outros exemplos de fundição que empregam moldes permanentes.

Figura 1.25
Exemplos de coquilhas para fundição por gravidade: indicação para fundição de um êmbolo de alumínio

em uma coquilha mista.





I.8 Fundição sob pressão

Essa técnica, como no processo de fundição em moldes permanentes por gravidade, utiliza moldes metálicos preaquecidos, também chamados matrizes. Neste caso, porém, a alimentação do metal fundido é feita sob pressão.

A pressão sobre o metal líquido assegura bom preenchimento do molde com o metal, que perde com rapidez sua fluidez na cavidade do molde de aço. Reproduz, assim, seções bastante finas e assegura a diminuição da porosidade nas seções maciças da peça.

Figura 1.26

Exemplos de coquilhas para fundição por gravidade: na parte superior, a peça pronta (base de um medidor de lubrificante). Na parte inferior, uma das laterais da coquilha. Com os machos a, b, c, obtêmse os orifícios A, B, C.





I.8.1 O processo

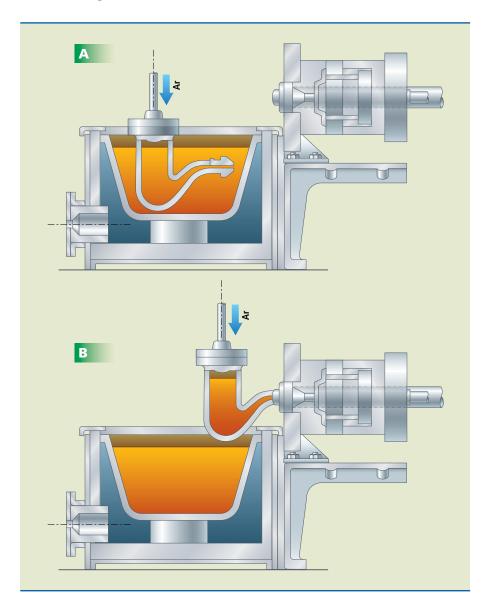
A fundição sob pressão é sempre feita por máquinas apropriadas, que fecham e travam as matrizes, injetam o metal sob pressão para dentro dos moldes, enquanto o ar que estava em seu interior é expulso por meio de ventilações especialmente projetadas para esse fim. Com a pressão ainda aplicada, espera-se o metal solidificar. Depois disso a pressão cessa, as matrizes se abrem e o fundido é ejetado através de pinos extratores. As matrizes, enquanto estão abertas, são limpas e lubrificadas para a próxima operação.

Máquinas para obtenção de peças por fundição sob pressão

Máquina de ação por êmbolo com câmara de compressão quente

Esse tipo de máquina (figura 1.27) é empregado para obter peças de ligas metálicas com temperatura de fusão de até cerca de 450 °C (chumbo, estanho, zinco).

Figura 1.27Máquina para fundição sob pressão.



No recipiente de ferro fundido despeja-se o metal líquido, cuja temperatura é mantida constante por meio de aquecimento do banho. Através do orifício existente no cilindro, o metal líquido enche a cavidade do cilindro e do canal de alimentação.

Ligando a máquina, as duas metades da matriz fecham-se, e a boquilha 1 deve ser apertada contra a embocadura do canal de passagem do molde.

Com a descida do êmbolo do cilindro pneumático, o metal é pressionado para dentro do molde. Quando a peça se solidifica, o êmbolo levanta-se e o metal líquido desce novamente para seu nível original. A última operação da máquina é a abertura das matrizes e a ejeção da peça.

O rendimento dessas máquinas é de até 1 000 peças por hora, quando inteiramente automáticas. A pressão sobre o metal varia de 6 a 100 atm.

A desvantagem desse tipo de máquina é que suas peças estão em parte mergulhadas no metal fundido, o que limita os metais que podem ser fundidos, uma vez que temperaturas acima de 500 °C favorecem a formação de películas de óxido nas paredes do cilindro, impedindo o livre movimento e causando grande desgaste do cilindro e do êmbolo.

Máquina de compressão com câmara móvel, a quente

São usadas para peças de ligas metálicas com temperatura de fusão inferior a 650 °C. No recipiente de ferro fundido existe a câmara móvel de compressão, de forma encurvada, semelhante a um "pescoço de cisne". O rendimento dessa máquina varia de 50 a 500 peças por hora. A pressão de trabalho está entre 10 e 80 atm.

Máquinas de ação por êmbolo com câmara fria

Utilizadas para ligas de alta temperatura de fusão, tais como as de cobre, ou ligas que desgastam o ferro, como as de alumínio (figuras 1.28 e 1.29).

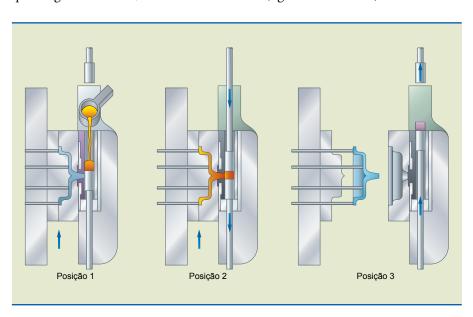


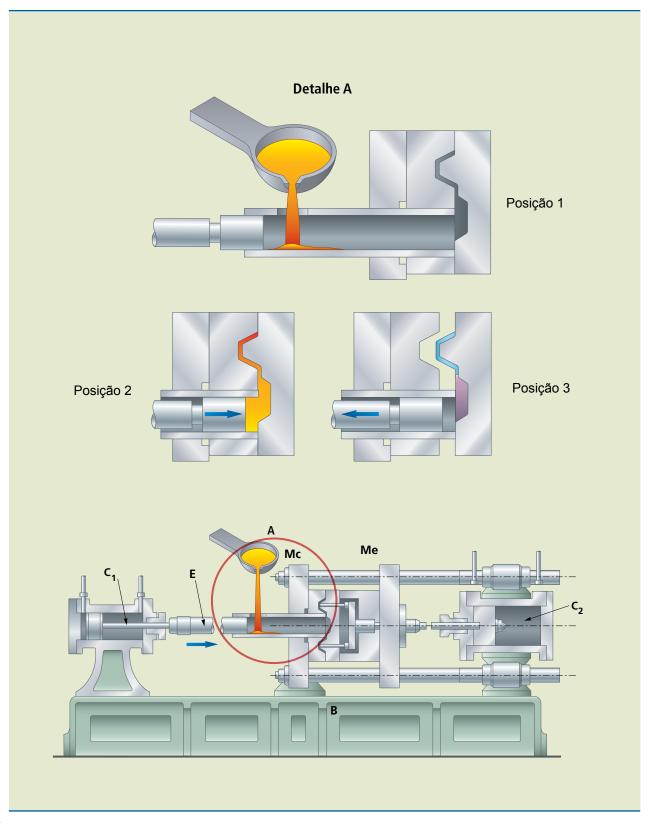
Figura 1.28Máquina de fundição sob pressão de câmara fria.





MECÂNICA 5

Figura 1.29Máquina de fundição sob pressão de câmara fria.



O metal fundido é introduzido na máquina por meio de uma colher dosadora. Na câmara de pressão, com a ajuda do êmbolo da prensa hidráulica, o metal em estado pastoso é injetado no molde. Após a solidificação, o êmbolo inferior move-se para cima cortando o excesso de metal, que é extraído da câmara. Depois, o molde abre-se, e a peça moldada é ejetada. A pressão nesse tipo de máquina varia de 200 a 2000 atm, e seu rendimento é de até 500 peças por hora.

1.8.2 Aplicações e vantagens do processo

Com esse processo são produzidas pequenas peças destinadas à indústria de eletrodomésticos, de automóveis, eletrônica, de aviões etc., a partir de ligas de chumbo, alumínio, estanho, magnésio, cobre e, principalmente, zinco (zamak), por seu baixo custo, baixo ponto de fusão e boas propriedades mecânicas.

A peça extraída do molde não exige elaboração mecânica adicional, e podem ser obtidos orifícios finos e roscas de precisão, por causa do excelente acabamento conseguido e da precisão do processo, que varia de 0,1 a 0,01 mm.

A estrutura do metal das peças moldadas, como consequência do rápido resfriamento no molde metálico, é de grão fino com elevadas propriedades mecânicas. É possível também obter paredes bastante finas, de até 1 mm de espessura.

O peso do fundido é limitado, em geral não passa de 5 kgf.

Esse processo é adequado para a produção de grande quantidade de peças; de outra maneira, torna-se antieconômico por causa do preço do ferramental e da maquinaria necessários.

1.9 Fundição centrífuga

Nesse processo, o metal líquido é introduzido no molde, que gira com rapidez, e é lançado, sob a ação da força centrífuga, contra as paredes do molde. Assim, há formação de uma cavidade interior, de forma cilíndrica, sem a necessidade do emprego de machos.

I.9.1 O processo

Na fundição centrífuga, o eixo de rotação pode estar na posição vertical ou horizontal.

Posição vertical

Com o eixo de rotação na posição vertical (figura 1.30), a superfície interior da peça não se torna cilíndrica, mas sim cônica. Dessa forma, a parte inferior tornase mais espessa que a superior, aumentando a desigualdade com o aumento da altura. Por isso, esse processo só pode ser usado para peças de pequena altura, ou para a produção de um conjunto de pequenas peças, quando, então, o problema aparece apenas no sistema de alimentação.





MECÂNICA 5

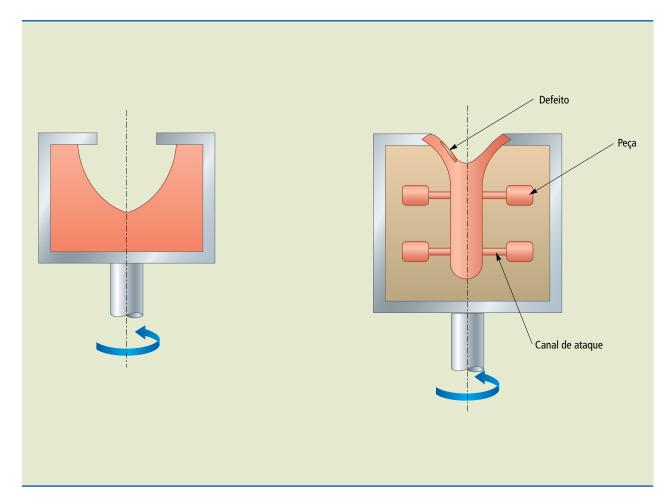


Figura 1.30Fundição centrífuga com eixo vertical.

Posição horizontal

Com o eixo de rotação na posição horizontal, as paredes da peça cilíndrica terão a mesma espessura em todo o seu comprimento, mas, para que isso aconteça, é necessário determinado número de revoluções por minuto (rpm) na velocidade de rotação.

A velocidade de rotação, em rpm, não deve ser inferior àquela obtida segundo a equação:

$$n \ge \frac{5520}{\sqrt{yR}}$$

em que:

n = rotação em rpm;

R = raio em cm;

 $y = peso específico em g/cm^3$.

Esse processo é usado principalmente na fundição de tubos de ferro fundido, conforme mostra a figura 1.31:

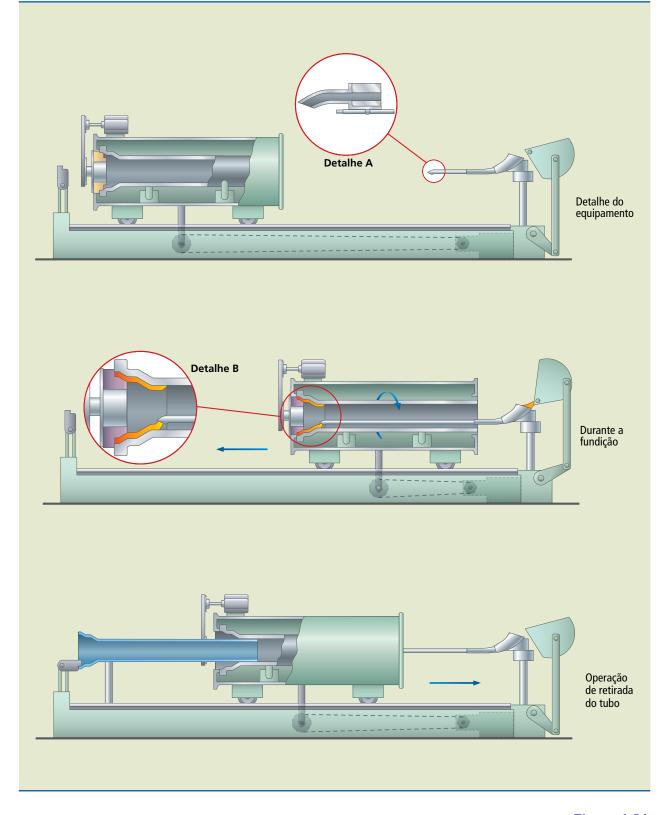


Figura 1.31
Fundição centrífuga com eixo horizontal
para a produção de tubos de ferro.



1.9.2 Aplicação e vantagens do processo

A aplicação mais racional da fundição centrífuga é na elaboração de peças metálicas ocas, que têm forma simples de corpos de revolução (tubos, cilindros, *blancks* para engrenagens etc.).

Nesse tipo de fundição, podem ser usados moldes metálicos ou de areia. É conveniente destacar que as peças obtidas por moldes metálicos devem ser submetidas a recozimento para alívio de tensões residuais que aparecem após a etapa de solidificação.

1.10 Fundição de precisão – processo da cera perdida

1.10.1 Investment casting

É um processo de moldagem que utiliza um molde introduzido por um modelo de cera, que é queimado antes do vazamento, produzindo a cavidade do molde.

1.10.2 O processo

Conforme mostra a figura 1.32, o primeiro passo consiste em fazer um modelo em cera do sistema de alimentação a. Posteriormente, com os modelos das peças também em cera já prontos, é feita a montagem do conjunto b.

Leva-se esse conjunto a um tanque contendo lama cerâmica, que vai formar uma camada de superfície muito lisa em volta do modelo de cera *c*.

Depois disso, o modelo é conduzido a um leito fluidizado (areia em suspensão). A areia impregna a cerâmica, formando uma casca *d*.

Esse conjunto é transferido para uma autoclave, onde o molde cerâmico endurece e o modelo de cera derrete-se, liberando a cavidade do molde *e*.

As operações c e d às vezes são repetidas até se conseguir a espessura de parede desejada para o molde.

1.10.3 Aplicações e vantagens do processo

Esse processo permite obter peças complexas, em altas produções, difíceis de serem conseguidas por fundição convencional ou por usinagem. A precisão e o acabamento alcançados dispensam processamento mecânico posterior. É utilizado para peças de até 5 kgf.

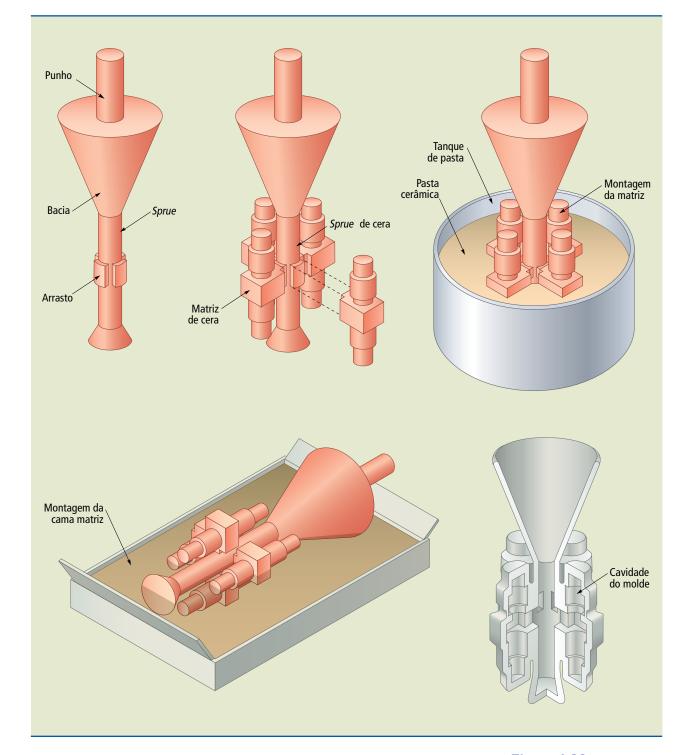


Figura 1.32Fundição de precisão com cera perdida.



Capítulo 2 Processos de conformação mecânica

as aplicações que exigem altas resistências à tração e ductilidade, a estrutura de um metal obtido por fundição pode não ser a mais adequada. É o caso de perfis estruturais, eixos, chapas que serão conformadas, fios, cabos etc. Para conseguir características mais compatíveis com esses tipos de aplicação, aplicam-se outros processamentos aos metais, caracterizados pela utilização de pressão.

Esse tipo de técnica tem duas finalidades: obter o metal na forma desejada e melhorar suas propriedades mecânicas. Embora classificados como primários, esses processos podem dar origem a produtos acabados, como trilhos, arames, tubos e outros. Na maioria dos casos, porém, é necessária a utilização de processos secundários para a obtenção da peça pronta.

2.1 Processos primários

Entre os processos chamados primários, os mais comuns são:

- laminação;
- trefilação;
- forjamento;
- extrusão;
- estampagem.

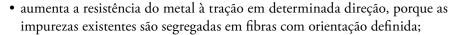
O metal pode ser trabalhado a quente ou a frio.

O trabalho a quente é feito acima da temperatura de recristalização do metal, e o trabalho a frio é realizado abaixo dessa temperatura, na maioria dos casos à temperatura ambiente. A figura 2.1 mostra o processo de laminação.

2.1.1 Características do trabalho a quente

O trabalho a quente apresenta as seguintes características:

não altera a dureza e melhora a ductilidade do metal. Grãos deformados durante o processo logo se transformam em não deformados. Nessa mudança, os grãos podem ser afinados, o que aumenta a ductilidade do metal;



- é mais fácil e rápido, pois exige máquinas de potência menor para sua realização;
- o metal pode ser forçado em formas extremas quando quente, já que a reestruturação contínua dos cristais elimina rupturas e trincas;
- a temperatura de trabalho deve estar acima da recristalização, mas não muito elevada, a fim de que não se forme granulometria grosseira;
- as temperaturas altas oxidam e formam carepa na superfície do metal, de tal forma que tolerâncias rigorosas não podem ser mantidas.



Figura 2.1
Processo de laminação

2.1.2 Características do trabalho a frio

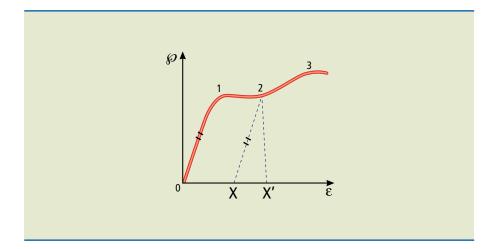
No trabalho a frio, encontram-se as seguintes características:

- costuma ser precedido pelo trabalho a quente, remoção de carepa, limpeza da superfície e possivelmente decapagem;
- obtêm-se com ele tolerâncias rigorosas, bom acabamento superficial e boas propriedades mecânicas;
- deve ser efetuado acima do limite de escoamento do material para que a deformação seja permanente. Todavia, a deformação sempre diminui um pouco com a retirada da carga, por causa do componente elástico, como podemos ver no diagrama tensão-deformação mostrado na figura 2.2. Esse fenômeno é chamado de histerese.





Figura 2.2 Diagrama tensão--deformação de um material dúctil.



Na figura 2.2, podemos observar:

1 = limite de escoamento;

2 = deformação plástica causada pelo trabalho a frio;

3 = limite de ruptura;

OX = deformação sob tensão;

OX' = deformação final.

- os cristais de um metal trabalhado a frio são internamente deformados, o que provoca aumento de dureza, perda de ductilidade e tensões residuais;
- as máquinas para execução de trabalhos a frio devem exercer forças muito maiores que as projetadas para trabalho a quente, portanto devem ser mais robustas. A figura 2.3 ilustra um tipo de máquina para trabalho a frio.

Figura 2.3Máquina para trabalho a frio.



2.2 Laminação

A laminação (figura 2.4) consiste em modificar a seção de uma barra de metal pela passagem entre dois cilindros, de modo que entre eles haja uma distância menor que a espessura inicial da barra. Os produtos são arrastados pelo cilindro sob o efeito de forças de atrito (figura 2.5), que se originam na superfície de contato dos cilindros e do metal laminado.

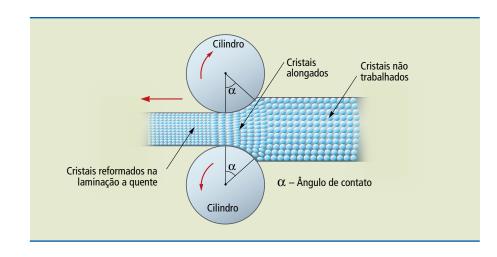


Figura 2.4Processo de laminação.

2.2.1 Condições de agarramento e arrastamento do produto

A figura 2.5 mostra esquema de forças que aparecem no processo de laminação.

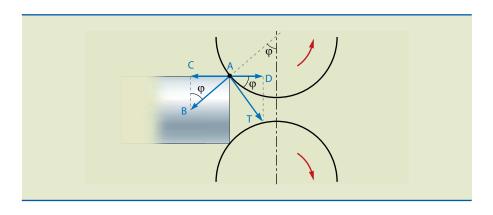


Figura 2.5Forças que aparecem no processo de laminação.

Observamos na figura 2.5:

 $AC = AB \operatorname{sen} \varphi$

 $AD = AT \cos \varphi$

AT = força de atrito = μ AB \therefore AD = μ AB $\cos \varphi$

Condição para o agarramento:

$$\begin{split} AD \geq AC \ :: \ AB \ sen \ \phi \leq \mu AB \ cos \ \phi \\ \mu \geq tg \ \phi \\ \phi \leq arc \ tg \ \mu \end{split}$$





Quando o produto é empurrado contra os cilindros, a força normal AB, exercida pelo cilindro sobre o produto, provoca uma componente horizontal AC, que se opõe ao arrastamento. A troca de atrito AT origina uma componente horizontal AD, dirigida no sentido do arrastamento. O produto será agarrado pelos cilindros quando AD for maior que AC, o que implica $\phi \leq arc$ tg μ , em que μ é o coeficiente de atrito.

Em resumo, o arrastamento da barra depende principalmente do coeficiente de atrito, do diâmetro dos cilindros e do tamanho da redução pretendida. A velocidade também exerce influência significativa por sua ação sobre o coeficiente de atrito. Se a velocidade de rotação dos cilindros for baixa, o agarramento será facilitado.

Na prática, o ângulo de contato ϕ para roletes lisos é inferior a 20°, e para roletes entalhados, inferior a 35°.

A relação entre o comprimento final da peça e o comprimento inicial é denominada coeficiente de alongamento.

$$K = \frac{I}{L} = \frac{F}{f}$$

em que:

K = coeficiente de alongamento;

I = comprimento final;

L = comprimento inicial;

F = área da seção transversal da peça antes da laminação;

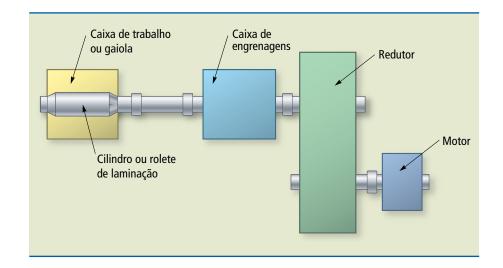
f = área da seção transversal da peça após a laminação.

Na prática, o valor de K varia de 1,1 a 1,6, e pode alcançar valores de até 2,5.

2.2.2 Equipamento e funcionamento do laminador

O esquema mostrado na figura 2.6 ilustra as partes fundamentais de um laminador.

Figura 2.6 Esquema de funcionamento de um laminador:



A parte fundamental do laminador é a caixa de trabalho ou gaiola, onde estão localizados os cilindros de laminação (figura 2.7).

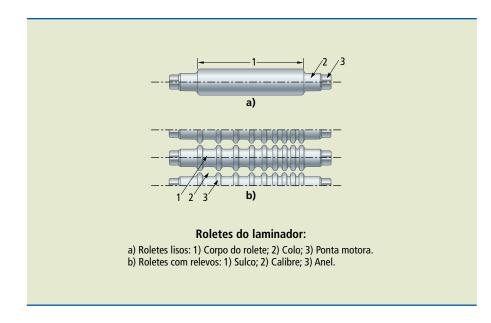


Figura 2.7Cilindros de laminação.

Os cilindros de laminação são fabricados de ferro fundido branco ou aços de boa resistência ao desgaste.

O perfil dos roletes de laminação varia de acordo com o produto que se quer obter. Assim, roletes lisos são usados para a fabricação de chapas, fitas, placas etc.; roletes com relevo são empregados para a construção de perfis, barras redondas etc.

Os cilindros constam da parte de trabalho, denominada corpo do rolete, dos colos, que são as partes onde atuarão os mancais de fixação dos cilindros na caixa e, finalmente, das pontas motoras, que é por onde os cilindros recebem a potência proveniente da caixa de engrenagens.

Os roletes com relevos trazem em sua superfície de trabalho chanfros especiais formando sulcos. O espaço livre entre os sulcos contíguos de dois roletes denomina-se calibre. Cada par de roletes possui vários calibres, que podem ser recalcadores preliminares, de desbastar e de acabamento.

2.2.3 Classificação dos laminadores

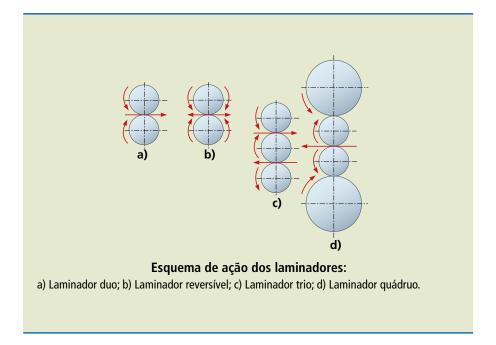
Quanto ao número de cilindros

Os laminadores podem ser classificados quanto ao número e arranjo de cilindros (figura 2.8) em:

- duo:
- duo reversível;
- trio;
- quádruo.



Figura 2.8
Classificação segundo o número de cilindros.



Quanto à **quantidade de roletes**, os laminadores dividem-se em:

- de dois roletes (duo);
- de três roletes (trio);
- de vários roletes (multilaminador).

Quanto ao **sentido de rotação**, os laminadores podem ser: de único sentido ou reversíveis (figura 2.8 *a* e *b*).

Nos laminadores do tipo trio, o produto é alimentado em um sentido, entre os dois cilindros inferiores, elevado, e volta em sentido oposto entre os dois cilindros superiores, no item c, da figura 2.8.

Nos laminadores quádruos usam-se cilindros menores para entrar em contato com o produto, diminuindo os custos da manutenção, e cilindros maiores para servir de apoio e evitar deformação dos menores.

Quanto ao tipo de peça a produzir

Conforme o tipo de peça a produzir (figura 2.9), os laminadores se dividem em desbastadores, de perfis, de chapas e especiais.

Laminadores desbastadores

Após ser fundido, o aço é vazado e adquire a forma de lingote.

Os lingotes de aço são mantidos e aquecidos em um forno poço a fim de adquirirem a temperatura adequada para laminação. Daí os lingotes são transportados até os laminadores desbastadores, onde são transformados em grandes peças brutas.

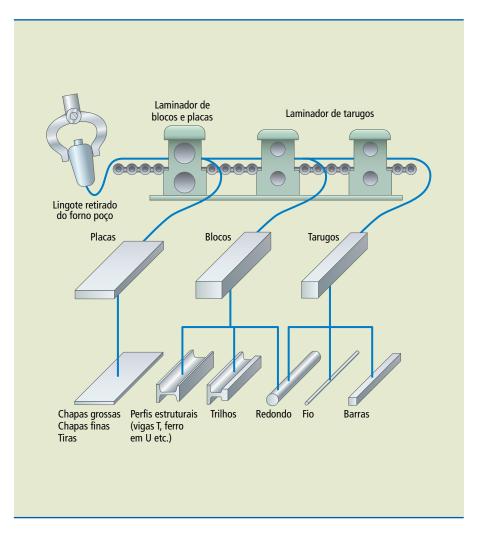


Figura 2.9Classificação segundo o tipo de peças.

Esses laminadores dividem-se em *bloomings* e *slabbings*.

Os *bloomings* são máquinas potentes, geralmente duo reversível, com diâmetro de cilindros na faixa de 800 a 1 400 mm e comprimento de trabalho de até 3 m. O peso dos lingotes laminados varia de 2 a 10 t e pode chegar até a 20 t. Os *bloomings* são totalmente automáticos e, a cada passagem do produto pelos cilindros, a distância entre eles diminui, e o sentido de rotação é invertido. Depois que o lingote passa entre os roletes duas vezes, deve ser girado 90°. Em geral, o número de passadas no *blooming* varia de 13 a 19 vezes. O produto obtido é denominado bloco ou tarugo. Esses tarugos têm suas pontas cortadas para retirada de defeitos e podem ser usados como matéria-prima para posteriores laminações ou para forjamento.

O laminador *slabbing*, ou laminador de chapas, é empregado na obtenção de chapas planas, em forma de placas de 75 a 300 mm de espessura e de 400 a 1 600 mm de largura. É um potente laminador duo reversível de duas caixas de trabalho. Os cilindros da primeira gaiola têm até 1 100 mm de diâmetro e estão situados horizontalmente. Os cilindros da segunda caixa, de até 700 mm de diâmetro, acham-se na posição vertical.



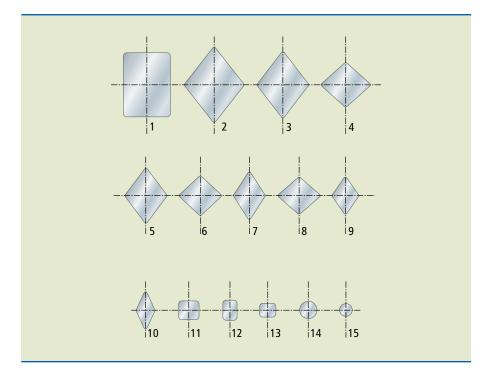
Laminadores de perfis

Esses laminadores podem ser duos reversíveis ou irreversíveis ou trios. Dividem--se, de acordo com sua finalidade, em laminadores para:

- grandes perfis comerciais, com cilindros de 500 a 750 mm de diâmetro;
- perfis médios comerciais, com cilindros de 350 a 500 mm de diâmetro;
- perfis pequenos comerciais, com cilindros de 250 a 350 mm de diâmetro.

A figura 2.10 apresenta as etapas de redução de um tarugo de 4×4 polegadas a uma barra de 3/4 de polegadas de diâmetro.

Figura 2.10Redução de um tarugo a uma barra.



Laminadores de chapas

Os laminadores de chapas são empregados na fabricação de chapas a quente e a frio. As chapas laminadas dividem-se em grossas ou finas. As chapas finas têm espessura que varia entre 0,36 e 6,0 mm.

Para essa laminação, usam-se laminadores duos reversíveis, trios e quádruos de alto rendimento. As chapas laminadas são endireitadas em máquinas endireitadoras, logo após o corte ou o enrolamento em bobinas para chapas finas.

Laminadores especiais

São usados para laminar discos, rodas etc. (figura 2.11). A matéria-prima para esse processo são lingotes achatados a quente em prensas ou marteletes que são perfurados no centro e colocados nesses laminadores. Com a ajuda de roletes de formato especial, a peça adquire o perfil desejado.

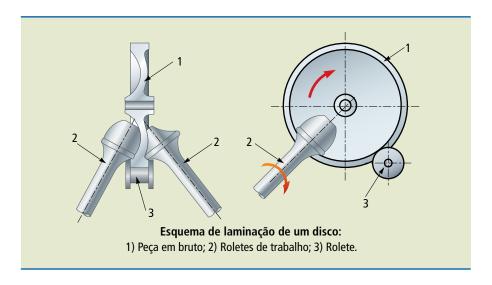


Figura 2.11Processo de laminação de um disco.

2.2.4 Posicionamento das gaiolas

A figura 2.12 mostra diferentes maneiras de posicionamento das gaiolas de trabalho.

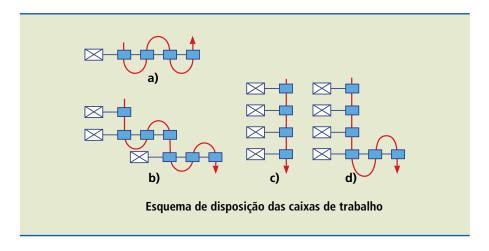


Figura 2.12

Esquemas de posicionamento das gaiolas de trabalho:

- a) linear;
- b) escalonado;
- c) contínuo;
- d) semicontínuo.

Segundo o esquema de disposição das gaiolas, os laminadores podem ser lineares, escalonados, contínuos, semicontínuos etc.

Laminador linear

Linear é a disposição mostrada no item *a* da figura 2.12. Nesse caso, todas as gaiolas funcionam com a mesma velocidade, e o produto precisa ser flexível o suficiente para permitir seu "serpenteamento" entre as diversas gaiolas. Apenas uma unidade motriz é suficiente para operar todo o conjunto.

Laminador escalonado

Neste caso (item b da figura 2.12), as gaiolas formam várias linhas, que funcionam com diferentes velocidades, o que permite aumentar a velocidade da gaiola acabadora e, portanto, o rendimento do laminador.





Laminador contínuo

Nos laminadores contínuos (item c da figura 2.12), o metal que está sendo laminado passa sucessivamente por todas as caixas de trabalho, situadas uma após a outra. A velocidade de laminação em cada gaiola seguinte é maior que na anterior, regulada de tal forma que o material não fique nem frouxo nem sob tensão de tração.

Laminador semicontínuo

Nesse caso (item *d* da figura 2.12), parte da laminação é feita de maneira contínua até uma bitola intermediária, e a laminação de acabamento é feita de modo escalonado.

2.3 Trefilação

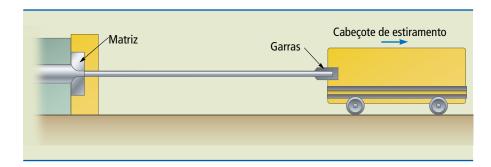
A trefilação (figura 2.13) ou estiramento é um processo de deformação do metal a frio pela passagem através de um orifício calibrado de seção menor que a da peça bruta. Depois de esticado, o metal adquire dimensões exatas, superfície limpa e elevada resistência mecânica, por causa do endurecimento por deformação.

Perfis redondos, retangulares, hexagonais e outros com diâmetro de até 100 mm, fios e tubos são comumente obtidos por esticamento a frio. Os principais metais trefilados são o aço, o alumínio e o cobre, e estes dois últimos têm aplicação principal na transmissão de energia elétrica, como fios e cabos.

2.3.1 O processo de trefilação

A matéria-prima para o processo de trefilação é um material laminado a quente, cujo óxido é removido por decapagem. Esse material é, então, lavado e protegido com cal e, por último, secado.

Figura 2.13 Processo de trefilação.



A extremidade do material é afinada, a fim de passar pela matriz e ser presa ao cabeçote de estiramento (figura 2.13), que exerce a força de tração para passagem do material pela matriz. O cabeçote puxa a peça em linha reta no caso de barras, tubos e perfis. Na trefilação de fios, estes vão sendo enrolados em um tambor. No caso de tubos, é inserido um mandril (figura 2.14) para o controle do diâmetro interno.

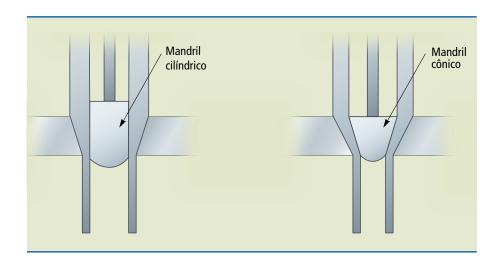


Figura 2.14Tipos de mandril

2.3.2 Trefilação de tubos

A pressão de estiramento contra uma matriz deve exceder o limite de escoamento do metal. Para que o material possa deslizar pela matriz, e para que esta não sofra um desgaste muito grande por causa do atrito provocado pelas elevadas pressões, é necessário que a peça esteja revestida com alguma espécie de lubrificante. Para o aço, o lubrificante mais usado é o sabão grafitado, que adere à superfície do aço por meio da cal, que, por sua vez, é fixada por um revestimento de óxido mole deixado pelo processo de decapagem.

2.3.3 A matriz

As matrizes ou fieiras devem ser duras, resistentes ao desgaste e às altas pressões exercidas pelo material. A figura 2.15 ilustra um tipo de matriz ou fieira.

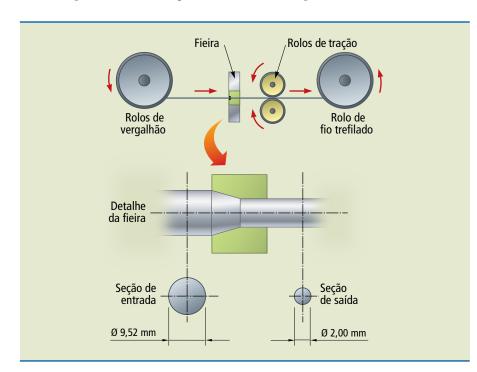


Figura 2.15Exemplo de trefilação de fio com detalhe da matriz ou fieira.





A figura 2.15 mostra a seção transversal de uma matriz, em que podemos notar o ângulo de entrada, confeccionado de maneira a permitir espaço para o lubrificante que adere às paredes da matriz. O ângulo de aproximação corresponde à seção da ferramenta em que ocorre a verdadeira redução do material. A superfície de apoio serve de guia para o fio ou barra na saída da matriz.

Os materiais não empregados para a confecção da fieira são ferro fundido coquilhado, aço-liga temperado, carboneto de tungstênio e diamante.

2.3.4 O material estirado

O estiramento é feito com valores de forças de tração de até 100 t ou mais, e as velocidades variam de 9 a 1 500 m/min. Normalmente, a redução de área obtida em um único passe é inferior a 40%. Após determinado número de passes, o material fica altamente encruado, o que o torna duro e quebradiço. Assim, para que possa ser de novo trefilado, é necessário que passe por um tratamento térmico de recozimento intermediário.

2.4 Forjamento

O forjamento (figura 2.16) antecedeu todos os processos de transformação por deformação plástica, certamente conhecido desde 1500 a.C. Trata-se de um processo de deformação plástica de um metal, geralmente a quente, com o auxílio de ferramentas agindo por impacto ou por pressão, de maneira a obter uma peça de formato determinado.

Figura 2.16 Exemplo de forjamento.



O forjamento, assim como qualquer outro processo de trabalho mecânico, está associado a uma variação na macroestrutura do metal, o que conduz a um rearranjo das fibras e alteração no tamanho dos grãos.

A figura 2.17 mostra o fibramento de um metal de um flange produzido por usinagem (a) e forjamento (b).

O fibramento, no caso b, é muito mais favorável, pois promove maior resistência à flexão no caso de o flange ter de suportar alta pressão.

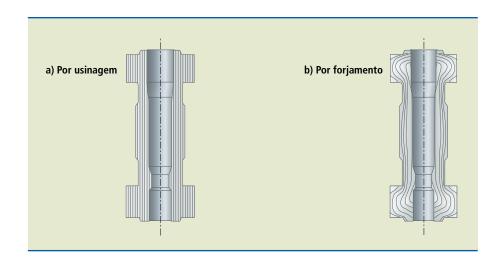


Figura 2.17
Fibramento aplicando usinagem e forjamento

O forjamento divide-se basicamente em dois tipos:

- em matriz aberta ou plana: o metal deforma-se entre as matrizes e pode fluir para os lados sobre a superfície da matriz.
- em matriz fechada ou estampos: o metal é obrigado a deformar-se de maneira a ocupar o contorno do molde formado por um par de matrizes.

Os metais normalmente usados para o forjamento são o aço, as ligas de cobre, o alumínio e o magnésio.

2.4.1 O forjamento em matriz aberta

Aplica-se esse procedimento quando:

- o forjado é muito grande para ser feito em matrizes fechadas;
- a quantidade é muito pequena para compensar a usinagem de matrizes fechadas.

O tamanho dos forjados que podem ser produzidos em matrizes abertas só é limitado pela capacidade dos equipamentos de aquecimento, forjamento e manuseio durante o forjamento. Contudo, cerca de 80% dos forjados em matriz aberta pesam entre 15 e 500 kgf.

Com operadores habilidosos e com a ajuda de várias ferramentas auxiliares, podem-se produzir formatos relativamente complexos em matrizes abertas. Entretanto, como levariam muito tempo, essas operações se tornariam muito caras. Portanto, forjados complexos só são obtidos em matriz aberta em circunstâncias especiais.



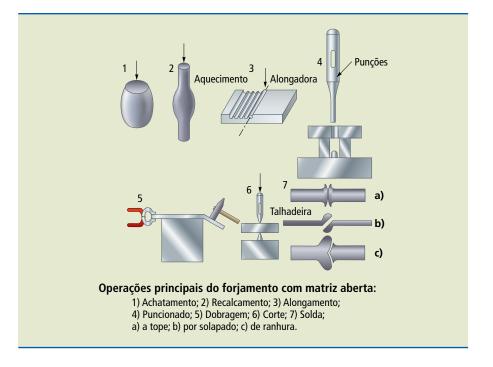


A maioria dos forjados em matriz aberta tem os seguintes formatos: seções redondas, quadradas, retangulares, hexagonais e octogonais, forjadas a partir de um tarugo.

Principais operações de forjamento em matriz aberta

A figura 2.18 mostra as principais operações de forjamento em matriz aberta.

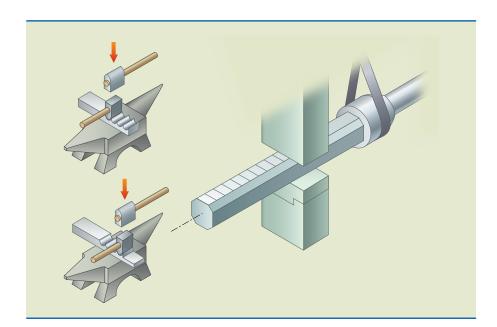
Figura 2.18
Principais operações
de forjamento em
matriz aberta.



Estiramento ou alongamento

A figura 2.19 mostra esquema da operação de estiramento.

Figura 2.19 Estiramento ou alongamento.



Operação para obtenção de ressaltos

A figura 2.20 mostra a operação para obtenção de ressaltos.

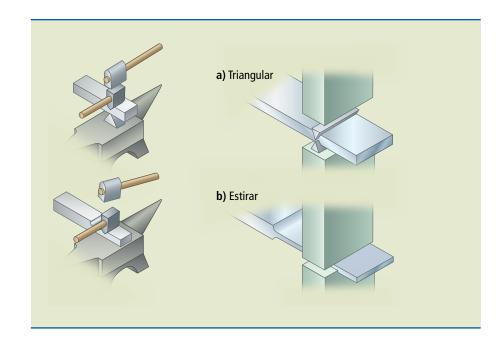
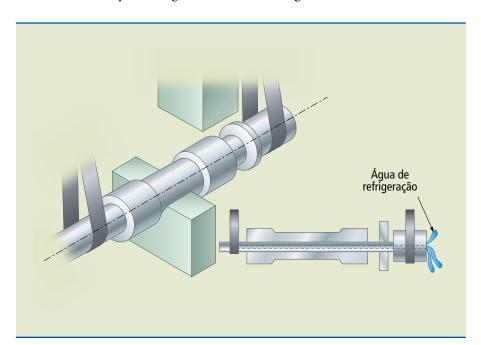


Figura 2.20
Exemplo de operação para obtenção de ressaltos:
a) triangular;
b) estirar.

Estirar sobre mandril é um procedimento corrente na fabricação de tubos longos que devem apresentar boas características mecânicas. Parte-se de um lingote recozido e furado por usinagem, como ilustra a figura 2.21.



Após seu reaquecimento, o lingote é enfiado em um longo mandril cônico, às vezes refrigerado por água, e estirado sobre o mandril com o número de operações que se queira.

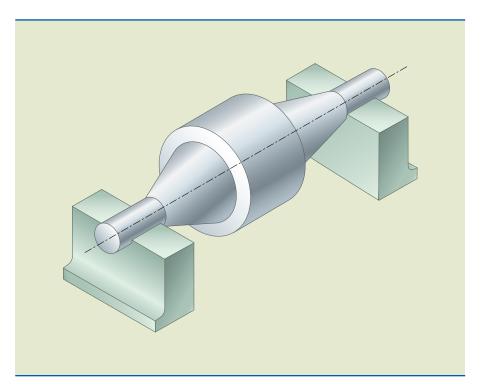
Figura 2.2 IEstiramento sobre mandril.





Bigornear é o procedimento para fabricação de anéis na forja pesada. Parte-se de um bloco furado que, apoiado em um mandril, vai sendo trabalhado até a obtenção do anel. A figura 2.22 mostra um exemplo dessa operação.

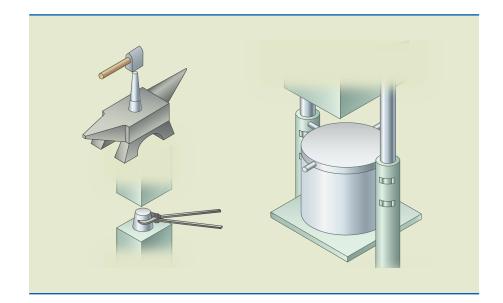
Figura 2.22 Operação de bigornear.



Achatamento ou recalcamento

O recalcamento é uma das operações mais delicadas do processo de forjamento. É preciso evitar que a peça a recalcar, se for um pouco alta, se entorte, mesmo que ligeiramente, pois resultaria em um bloco recalcado disforme e difícil de retificar pelas operações de forjamento posteriores. Na figura 2.23 pode-se observar um esquema ilustrando essa operação.

Figura 2.23Operação de achatamento ou recalcamento.



Corte ou seccionamento

Inicia-se o corte em toda a periferia com um pequeno cutelo afiado e, depois, procede-se ao seccionamento propriamente dito com um cutelo de dimensões apropriadas. Secciona-se, segundo o caso, por dois ou por quatro lados (figura 2.24).

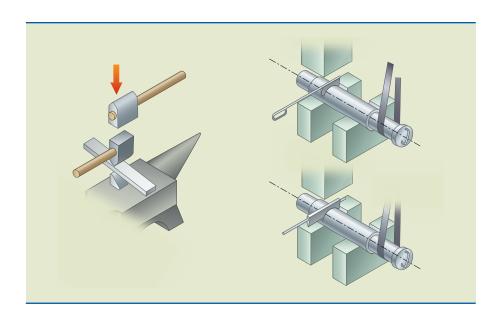


Figura 2.24
Operação de corte ou seccionamento.

Preaquecimento

Cada metal ou liga possui determinada faixa ou intervalo de temperatura dentro da qual o forjamento pode ser feito da melhor maneira. Deve ser uma temperatura que associe boa plasticidade e mínima resistência à deformação.

Antes de proceder à deformação, o tarugo deve ser uniformemente aquecido, sem que haja um superaquecimento ou queima do metal.

Na tabela 2.1 são fornecidos os intervalos de temperatura de forjamento dos aços e das ligas não ferrosas.

Material	Temperatura máxima	Temperatura mínima
Aço-carbono	I 200 — I 000	800 – 850
Aço-liga	1150 – 1100	825 – 900
Bronze (Cu + Sn)	850	700
Latão (Cu + Zn)	750	600
Ligas de Al	490 – 470	300 – 350
Ligas de Mg	430 – 370	350 – 400

Tabela 2.1Intervalos de temperatura de forjamento de aços e ligas não ferrosas.





2.4.2 Máquinas para o forjamento em matrizes abertas

Forjamento em marteletes

São usados para peças de tamanho pequeno e caracterizam-se pelo peso das massas que dão o golpe sobre a peça que está sendo forjada.

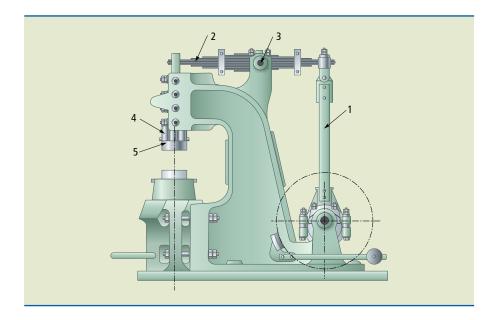
Os marteletes são postos em movimento por um comando elétrico.

Martelete a molas

Na figura 2.25, podemos observar um esquema simplificado de um martelete a molas. Quando acionado, é posto em movimento um virabrequim. Este movimenta a biela (1), que está articulada à mola (2), capaz de girar no ponto de apoio (3). A outra extremidade da mola está ligada à massa (4), que pode deslizar através de guias. Ao girar o virabrequim, ocorre a elevação e descida da massa, e o estampo (5) dá impactos sobre a peça que se encontra sobre a bigorna.

O número de marteladas por minuto varia de 120 a 300, sendo o peso da massa que impacta de 30 a 250 kgf.

Figura 2.25Esquema de um martelete a molas.



Esse tipo de máquina, por sua velocidade, é utilizado para forjamento de peças delgadas que se esfriam com rapidez.

Martelete pneumático de dupla ação

A figura 2.26 mostra um martelete pneumático de dupla ação. É constituído de dois cilindros: o de trabalho (1), e o de compressão (2). No cilindro de trabalho, a massa é um êmbolo (3) com o estampo 4 preso a ele. O êmbolo do cilindro de compressão (5), posto em movimento pelo mecanismo de virabrequim e biela (6), comprime o ar que é bombeado alternadamente para os orifícios superior e inferior

do cilindro de trabalho, provocando, assim, o movimento do êmbolo e a consequente martelagem. A admissão e o escapamento de ar no cilindro de trabalho efetuam-se por meio das válvulas (8), que são comandadas por alavancas ou pedais.

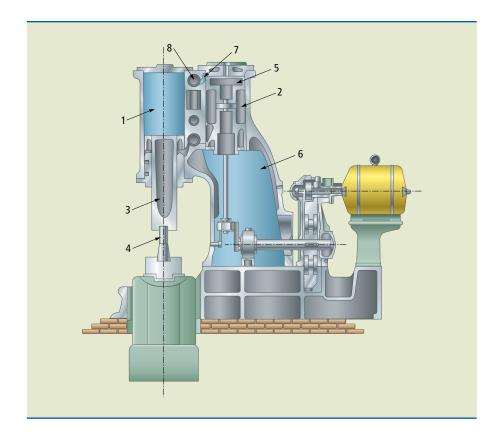


Figura 2.26
Esquema de um martelete
pneumático de dupla ação.

As válvulas permitem realizar golpes individuais, ou trabalhar automaticamente, e colocar a massa na posição superior.

O peso das peças de impacto varia de 50 a 1 000 kgf e gera até 190 impactos por minuto. Esse martelete é usado para forjamento de peças de até 20 kgf.

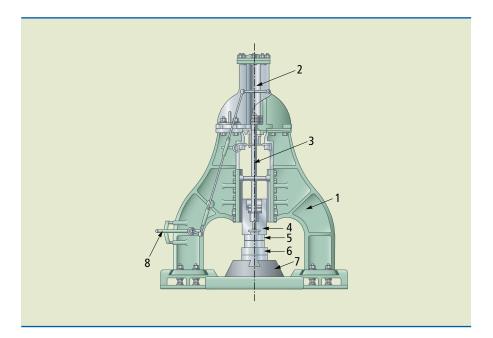
Forjamento em martelo-pilão

Os forjados de peso médio são obtidos em martelo-pilão a vapor, de ação simples ou dupla. Na figura 2.27 está esquematizado um martelo-pilão a vapor de dupla ação, com dois apoios. Na parte superior da armação (1) está preso o cilindro de trabalho (2), pelo qual corre o êmbolo com o braço (3). O extremo inferior do braço está ligado à massa (4), com a matriz intercambiável (5), que martela o metal que se acha sobre a matriz inferior (6). Ela está colocada sobre a bigorna (7), que é uma peça moldada maciça. Por meio da alavanca (8), é manejado o mecanismo de distribuição, que pode também ser manobrado automaticamente.

Nos martelos-pilão a vapor com um único apoio, o peso das peças de impacto (êmbolo, braço, massa e matriz) tem de ser inferior a 2 t. Os martelos de peso maior (até 5 t) possuem uma armação de dois apoios e guias para a massa, o que exclui a possibilidade de desvio do braço durante o trabalho.



Figura 2.27Esquema de um martelo-pilão.



Os martelos-pilão são de fácil manejo, podem dar golpes com forças diferentes, manter suspensa a massa e dar impactos de maneira contínua.

Esses martelos são utilizados para os mais diversos trabalhos de forja com matriz aberta para elaboração de peças, partindo de tarugos de até 1 t.

Forjamento em prensas hidráulicas

Prensas hidráulicas são empregadas para forjamentos pesados em lingotes com peso entre 1 e 250 t. Diferentemente dos martelos-pilão, as prensas deformam o metal sem dar golpes, pois aplicam uma carga quase estática. As prensas hidráulicas usadas para forjamento em matriz aberta podem produzir uma pressão entre 500 e 15 mil t, e as usadas para matriz fechada, até 20 mil t.

A figura 2.28 apresenta o esquema de uma prensa hidráulica. A armadura da prensa é constituída por quatro colunas (1), que estão presas na base metálica (2) e no travessão superior (3). Nesse travessão estão montados o cilindro de trabalho (4) e o cilindro de elevação (5).

As colunas da prensa servem de guias para o travessão móvel (6), no qual é presa a matriz superior (7). A matriz inferior (8) é fixada na base metálica. O travessão móvel está unido com o pistão (9) do cilindro de trabalho e preso, por meio das varetas (10), ao balancim (11) do cilindro de elevação.

Para o funcionamento da prensa, a pressão da água não deve ser menor que 200 atm. Essa alta pressão é fornecida pelo sistema bomba-acumulador. A água utilizada chega ao depósito de admissão (13) e é enviada, através da bomba (14), ao acumulador (15), de onde segue, através do distribuidor (16), para o cilindro de trabalho ou para o de elevação. O acumulador serve para estocar a água em alta pressão durante os intervalos de trabalho, para manter a pressão constante no sistema.

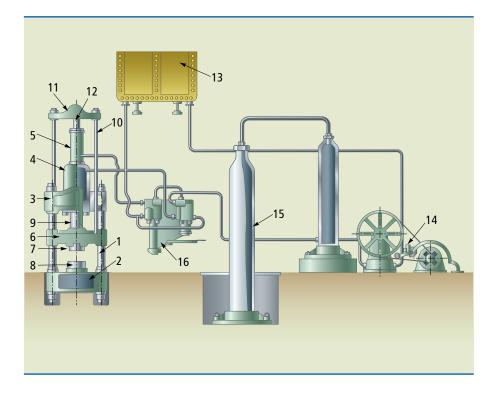


Figura 2.28
Esquema de uma prensa hidráulica.

2.4.3 O forjamento em matrizes fechadas

No forjamento em matrizes fechadas, o fluxo do metal que está sendo deformado é restringido pela matriz. As matrizes, tanto a superior como a inferior, possuem cavidades que, quando unidas, têm o formato da peça. Esse tipo de forjamento é economicamente empregado para produção de peças em grande quantidade, com peso de até 350 kgf.

As matrizes são feitas em geral em aços-liga e têm um custo relativamente elevado, sobretudo por causa do trabalho de usinagem das cavidades.

A peça obtida com essa técnica exige pouco trabalho de usinagem para obtenção do produto acabado.

Como o fluxo do metal que está sendo deformado é restringido pelas cavidades das matrizes, a pressão distribui-se em toda massa do metal e não somente na superfície. Esse detalhe faz com que o alinhamento das fibras seja mais propício, pois aumenta as propriedades mecânicas do forjado. Durante o forjamento de uma peça em matriz fechada, há em geral duas operações: o forjamento e a rebarbação.

Peças simples podem ser forjadas de uma só vez em matrizes com uma única cavidade e, depois, rebarbadas.

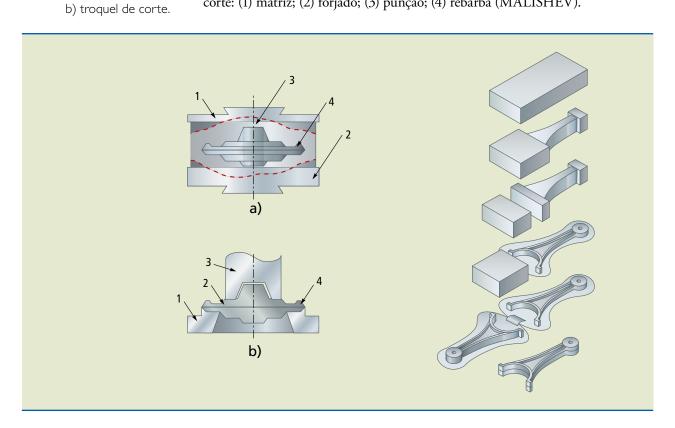
Na cavidade da matriz inferior coloca-se o produto inicial previamente aquecido e, pela pressão exercida pela matriz superior, o metal preenche toda a cavidade do estampo. O excesso de metal (rebarba) é comprimido em uma cavidade especial. As rebarbas constituem 15% a 20% do peso do forjado.





Figura 2.29
Peça obtida
em várias etapas:
a) estampo do martelo-pilão;

As cavidades do estampo devem ter paredes inclinadas, formando ângulos de 3° a 15°, de maneira a facilitar a extração da peça forjada. A peça forjada é levada a uma prensa para o corte da rebarba em uma matriz especial, após o que pode ser usinada para obtenção das dimensões finais. Peças mais complicadas são forjadas em várias matrizes ou em uma matriz com várias cavidades, na qual a peça é obtida em várias etapas, como mostra a figura 2.29. No item *a*, observamos o estampo de martelo-pilão: (1) estampo superior; (2) estampo inferior; (3) peça em bruto antes do forjamento, indicada com linha tracejada; (4) forjado. No item *b*, o troquel de corte: (1) matriz; (2) forjado; (3) punção; (4) rebarba (MALISHEV).



Cálculo de dimensões

No forjamento em matriz fechada é necessário o cálculo das dimensões do produto inicial que dá origem à peça forjada. Esse cálculo é feito da seguinte maneira:

$$P_{i} = P_{f} + P_{p} + P_{c} + P_{r}$$

em que:

 P_i = peso do produto inicial;

 P_f = peso do forjado bruto;

 P_p = peso perdido por causa do corte das extremidades do produto inicial;

 P_c = peso perdido pela formação de carepa durante o preaquecimento do produto inicial;

 P_r = peso perdido pela formação de rebarba ao redor da peça na operação de forjamento.



Qual deve ser o peso do produto inicial para forjar a peça mostrada na figura 2.30?

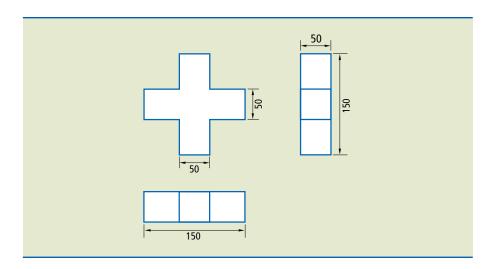


Figura 2.30
Peça a ser obtida por forjamento.

Dados:

- a) A peça é de aço com ρ = 7,8 g/cm³;
- b) $P_p = 30\%$ do peso do produto inicial;
- c) $P_c = 2\%$ do peso do produto inicial;
- d) $P_a = 10\%$ do peso do produto inicial.

Solução

• Cálculo do peso do forjado (P_i)

Volume do forjado em cm³:

$$V = (5 \cdot 15 \cdot 5)2 - (5 \cdot 5 \cdot 5) = 625 \text{ cm}^3$$

Massa do forjado em kgf:

$$M = \rho \cdot V = 7.8 \cdot 625 = 4875 g \approx 4.9 \text{ kgf} \therefore P_f = 4.9 \text{ kgf}$$

• Cálculo do peso do produto inicial (P_i):

$$P_i = 4.9 + 0.3P_i + 0.02P_i + 0.1P_i$$

$$P_i - 0.3P_i - 0.02P_i - 0.1P_i = 4.9$$

$$P_i - 0.42P_i = 4.9$$

$$0.58P_i = 4.9 \therefore P_i = 4.9/0.58 P_i = 8.4 \text{ kgf}$$

Podemos concluir, então, que, para obter a peça mostrada na figura 2.30, é necessário um peso inicial $P_i = 8,4$ kgf.



2.4.4 Máquinas para o forjamento em matrizes fechadas

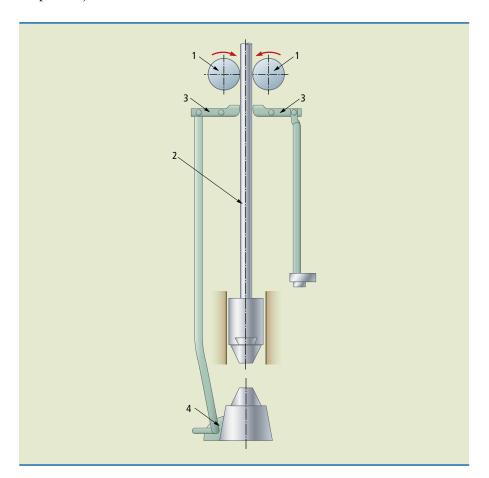
A estampagem a quente em matrizes fechadas pode ser realizada em martelos e marteletes, porém é feita, preferencialmente, em prensas.

As vibrações que se produzem no funcionamento dos martelos mecânicos e a violência dos impactos não permitem adaptar neles matrizes progressivas para efetuar diversas operações em uma única vez.

A outra vantagem das prensas é o fato de permitirem regulagem mais fácil e, por conseguinte, produzirem um trabalho mais preciso. Além disso, um único impacto de uma prensa produz tanto trabalho quanto vários impactos de martelos-pilão, eliminando a necessidade de reaquecimento da peça.

A figura 2.31 mostra o esquema de um martelete de fricção com prancha, usado até para forjamento com matrizes fechadas.

Figura 2.3 IMartelete de fricção com prancha.



Essa máquina de alto rendimento funciona da seguinte maneira: os roletes de aço (1) são postos em movimento no sentido indicado pelo comando elétrico para elevar a prancha de madeira (2) e a massa a eles presa até uma posição superior, onde é travada pelo freio (3), ao mesmo tempo que os roletes deixam livre a prancha. Ao apertar o pedal (4), o freio solta a prancha e propicia o impacto. O peso da peça que impacta alcança 3 t, e a altura de elevação é geralmente de até 2 m.

A principal desvantagem desse martelete é a manutenção constante, em consequência do desgaste da prancha de madeira.

Para o forjamento de peças pequenas (até 20 kgf), preferem-se as prensas mecânicas comuns, que são simples e rápidas. Para peças maiores, usam-se prensas hidráulicas, como a vista anteriormente.

Uma das prensas mecânicas mais utilizadas para o forjamento em matriz fechada é a do tipo biela-manivela, cujo esquema é mostrado na figura 2.32.

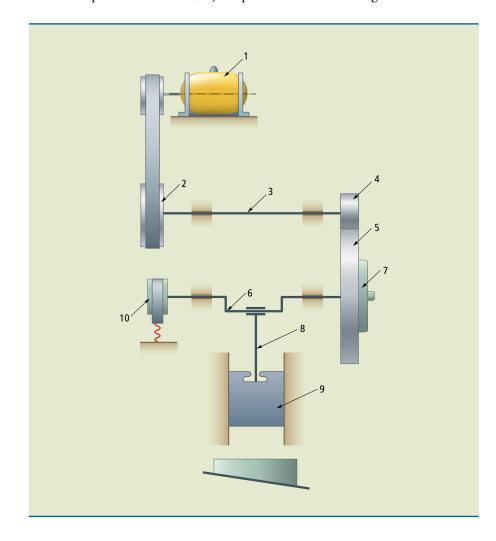


Figura 2.32
Esquema da prensa do tipo biela-manivela.

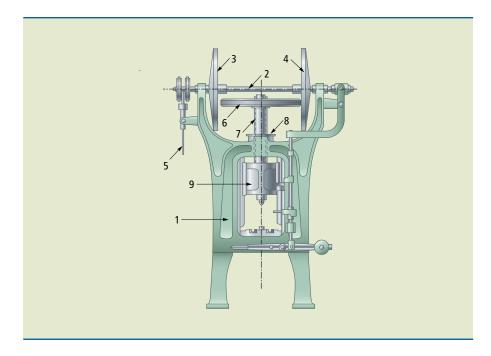
Como observamos na figura, o motor elétrico (1) transmite o movimento à polia (2), montada no eixo (3), a cuja extremidade está presa a engrenagem (4), que faz girar a engrenagem maior (5). Essa engrenagem pode girar livremente na árvore de manivelas (6), sempre que a embreagem de comando pneumático (7) estiver desacoplada. Quando está atuando, a engrenagem transmite movimento à árvore de manivelas que, através da biela (8), faz com que a massa (9) se movimente para cima e para baixo. Para parar a prensa, desacopla-se a embreagem e aciona-se o freio (10).

Essas prensas têm capacidade de 200 a 10 mil t.



Para fabricação em grande escala de pequenas peças, é muito usada a prensa de fricção, como ilustra o esquema da figura 2.33. Esse tipo de prensa é constituído pela bancada (1), onde, na parte superior, é montado o eixo (2), com as rodas de fricção (3 e 4) feitas de ferro fundido. Com a alavanca (5), pode-se deslocar o eixo, de modo que as rodas possam tocar alternadamente o volante (6) coberto com couro. Quando a roda giratória é acoplada, o volante gira em um sentido e faz com que o parafuso (7) desça ou suba através da porca (8), levando consigo a matriz acoplada (9). Essas prensas têm capacidade entre 80 e 400 t.

Figura 2.33Esquema de uma prensa de fricção.



2.5 Extrusão

No processo de extrusão, o metal é comprimido acima de seu limite elástico em uma câmara e forçado a escoar por uma matriz, que determina a seção do produto resultante.

A extrusão pode ser a frio ou a quente. Para a maioria dos metais, é utilizada a extrusão a quente, de modo a reduzir as forças necessárias envolvidas no processo, eliminar os defeitos do trabalho a frio e reduzir as propriedades direcionais. O metal é normalmente comprimido por um êmbolo para frente ou para trás e forçado a passar pela matriz, dando origem a um produto que pode ser sólido ou oco. A figura 2.34 mostra a foto de uma máquina extrusora.

Os metais mais usados para a extrusão são o chumbo, o alumínio, o magnésio e o cobre e suas ligas, por suas resistências ao escoamento e temperaturas de extensão serem relativamente baixas.

O aço é mais difícil de ser extrudado, por sua alta resistência ao escoamento e tendência de soldar-se às paredes da câmara da matriz nas condições necessárias de alta temperatura e pressão.

O metal é extrudado em certo número de processos básicos, como mostram os esquemas a seguir.

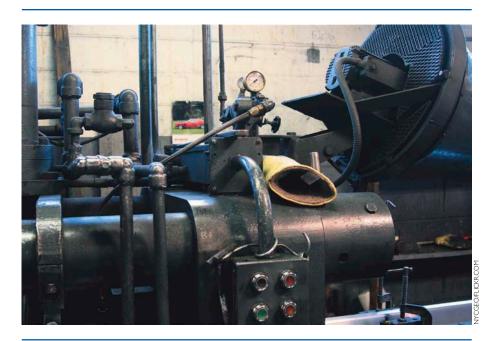


Figura 2.34Máquina para extrusão de alumínio.

2.5.1 Processos de extrusão

A figura 2.35 mostra vários processos de extrusão.

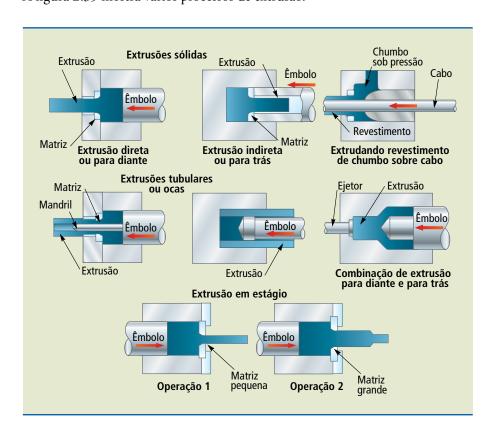


Figura 2.35Processos de extrusão.





Exemplos de formas obtidas por extrusão

A figura 2.36 ilustra vários tipos de peças obtidas pelo processo de extrusão.

Figura 2.36 Peças obtidas por extrusão.



2.5.2 Extrusão a quente

A tabela 2.2 mostra os intervalos de temperatura necessários para extrusão, segundo o tipo de material.

Tabela 2.2Faixas de temperatura em cada tipo de material.

Metal	Temperatura de extrusão
Aço	l 200 a l 320 °C
Magnésio	350 a 430 °C
Alumínio	420 a 480 °C
Ligas de cobre	650 a 900 °C

As altas temperaturas e pressões que podem atingir até 7 mil atmosferas são os maiores problemas da extrusão a quente. São necessárias lubrificação e proteção da câmara, do êmbolo e da matriz para evitar desgaste prematuro ou obstrução da extrusora.

Para temperaturas mais baixas, é usual a aplicação de óleo grafitado como lubrificante; para altas temperaturas, como as alcançadas na extrusão do aço, utiliza-

-se vidro líquido. Além disso, os êmbolos podem possuir sistema de refrigeração por água, quando não estão em operação.

Mas a melhor garantia de preservação do equipamento é deixar o metal o mínimo tempo possível na câmara e empregar extrusão com alta velocidade. A maioria das extrusões a quente é efetuada em prensas hidráulicas horizontais com capacidade entre 250 e 6 mil t.

Aplicações da extrusão a quente

A extrusão é mais cara que a laminação e, portanto, não torna economicamente competitivas peças com formatos que possam ser obtidos por laminação. Entretanto, é bastante útil para a obtenção de formas com saliências e reentrâncias, que não poderiam ser obtidas pelo processo de laminação, tais como perfis de formato especial.

A extrusão também é bastante usada para obtenção de tubos, geratrizes de engrenagens, cápsulas de projéteis, peças para aviação etc.

2.5.3 Extrusão a frio

Mesmo à temperatura ambiente, determinados metais, como o chumbo, o estanho e o zinco, situam-se na faixa de recristalização ou perto dela. Além disso, a rápida aplicação de pressão na extrusão a frio libera uma quantidade de calor que eleva a temperatura do metal, o que facilita a operação.

Os tubos usados para embalar pasta de dente são obtidos por esse processo. No fundo de uma câmara fechada é colocado chumbo, o qual é atingido por um punção em alta velocidade. O metal é obrigado a conformar-se em torno do punção, formando o tubo, que é descarregado quando o punção recua. Consegue-se assim uma produção de até 80 tubos por minuto.

As pressões exercidas nesse processo variam de uma a três vezes o limite de escoamento do metal. A lubrificação é feita por óleos, graxas ou sabões. Para aderência do lubrificante ao aço, recomenda-se que este seja fosfatizado, pois a camada de fosfatos é porosa e retém o lubrificante.

Para a extrusão a frio são normalmente utilizadas prensas mecânicas verticais, por sua rapidez de operação. Prensas hidráulicas são empregadas apenas para fabricação de peças grandes.

Aplicações da extrusão a frio

A extrusão a frio visa tanto melhorar as propriedades mecânicas de um metal, como produzir formas específicas. A rapidez é uma das características que torna esse processo recomendado para a obtenção de latas, carcaças de extintores de incêndio, pistões de alumínio para motores, cilindros, tubos, geratrizes de engrenagens etc.



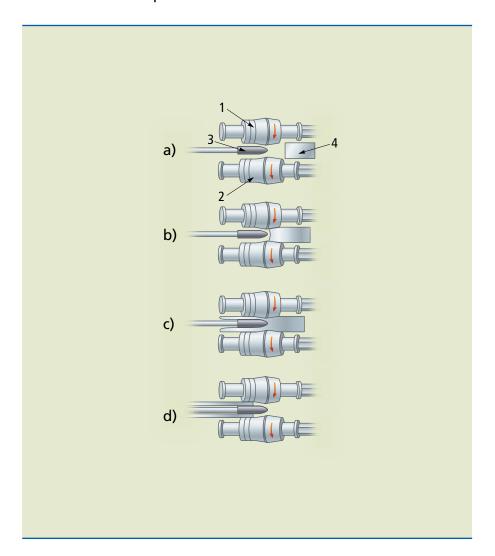


A extrusão a frio torna-se bastante vantajosa para metais moles e formas simples. É competitiva com a estampagem profunda de chapas, por exigir menor número de operações para a obtenção da chapa estampada e pelo menor custo das ferramentas.

2.5.4 Alguns processos usados para fabricação de tubos

Tubos sem costura: processo Mannesmann

Figura 2.37Processo Mannesmann.



Na figura 2.37, podemos observar a sequência de elaboração de tubos sem costura pelo processo Mannesmann, em sua primeira fase, quando um bloco de aço cilíndrico aquecido (4) é laminado por um par de cilindros oblíquos (1 e 2), que giram em um mesmo sentido fazendo com que o bloco adquira um movimento helicoidal. Por causa da alta rotação e da temperatura do bloco, começa a formar-se um oco no interior do bloco, que é calibrado e mantido constante através do mandril (3). O tubo obtido por esses laminadores de perfuração é curto e com paredes grossas e necessita passar pela etapa de laminação (mostrada adiante) para obtenção do produto final.

A segunda operação realiza-se no laminador, denominado **passo de peregrino** (figura 2.38), onde o tubo é colocado em um mandril e estirado por dois roletes excêntricos em um movimento de vaivém, até que fique com paredes delgadas. Consegue-se obter tubos de 40 a 600 mm de diâmetro com espessura de parede de 1,9 a 8 mm. O comprimento do tubo pode atingir até 30 m.

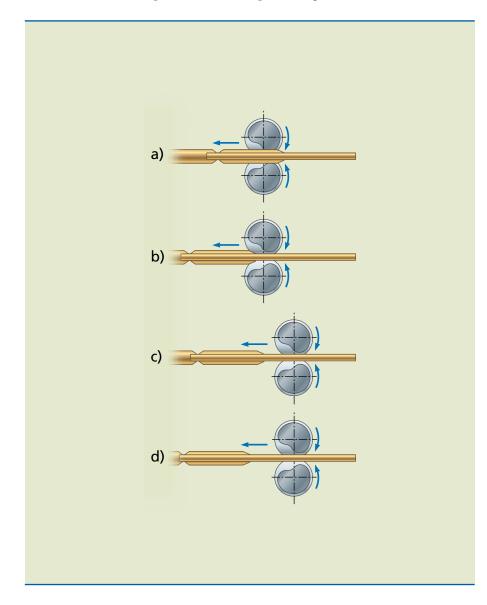


Figura 2.38
Laminador para a
produção de tubos.

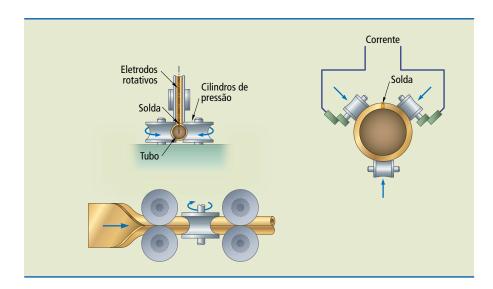
Tubos com costura

Os tubos com costura são em geral obtidos por meio de solda por resistência elétrica, cujos princípios básicos são vistos com mais detalhes no capítulo 3. Esses tubos são feitos de tiras de aço, que por sua vez foram obtidas de bobinas de chapas cortadas em máquinas especiais para esse fim. Como as tiras de aço são conformadas por pares de cilindros, tomam a forma circular. O tubo passa, então, pelos cilindros eletrodos que fornecem a corrente, a fim de criar o calor de solda na junta, onde existe uma resistência de contato entre as bordas do tubo. Um esquema desse processo é mostrado na figura 2.39.





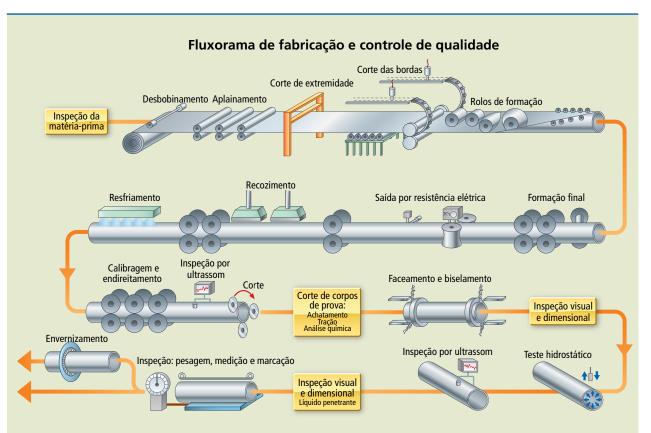
Figura 2.39Produção de tubos com costura.

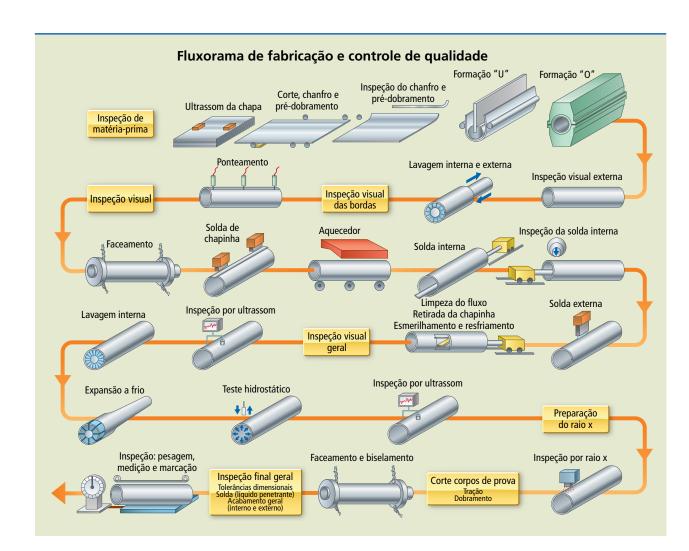


Essa resistência libera calor (efeito Joule), que faz com que o material atinja a temperatura de fusão e, por causa da pressão, solde-se. Após a soldagem, existe ainda um par de cilindros para manter a pressão até o resfriamento da junta, para evitar falha na costura. Esse processo de solda por resistência é conhecido como **solda por costura**.

Figura 2.40Controle de qualidade na produção de tubos.

Nas figuras 2.40 e 2.41, podemos observar o processo de controle de qualidade na produção de tubos por costura.





2.6 Estampagem

Por estampagem, entende-se o processo da fabricação pelo corte ou deformação de chapas, com a finalidade de obter peças com características geométricas próprias. A figura 2.42 ilustra um processo de estampagem.



Figura 2.41

Controle de qualidade na produção de tubos.

Figura 2.42Processo de estampagem.





A estampagem é um processo de deformação plástica do metal para conformar uma peça. Emprega-se a estampagem para fabricar peças com paredes finas, feitas de chapas de diversos metais e ligas.

A estampagem pode ser simples, quando executada em uma única operação, ou combinada. Com a ajuda da estampagem, fabricam-se peças de aço baixo carbono, aços inoxidáveis e de diferentes ligas não ferrosas. Esse processo de fabricação é empregado, preferencialmente, para grandes séries de peças.

2.6.1 Vantagens e desvantagem no processo de estampagem

Vantagens

As vantagens do processo de estampagem são:

- alta produção (400 a 50 mil peças/hora);
- reduzido custo por peça, em comparação com o processo de usinagem;
- acabamento bom, pois não necessita processamento posterior;
- maior resistência das peças em comparação com outras obtidas por usinagem, em que são cortadas as fibras de laminação do metal.

Desvantagem

A desvantagem no processo de estampagem é o alto custo do ferramental, que só pode ser amortizado se a quantidade de peças a produzir for elevada.

2.6.2 Operações de estampagem

São três as operações básicas de estampagem:

- corte;
- dobra;
- repuxo.

As operações são efetuadas a quente ou a frio.

Estado de trabalho

- corte executado a frio;
- dobra executado a frio;
- repuxo a frio ou a quente.

2.6.3 Prensas utilizadas nas operações de estampagem

Para obter um processo de estampagem que produza os resultados desejados, é preciso utilizar ferramentas adequadas e escolher criteriosamente as máquinas operatrizes.

As máquinas operatrizes utilizadas no processo de estampagem são denominadas prensas. Estas podem ser classificadas como mecânicas (figura 2.43) ou hidráulicas (figura 2.44). Em cada uma dessas classificações gerais, existem vários tipos, como mostrado a seguir.

Prensas mecânicas

As prensas mecânicas podem ser:

- excêntricas;
- de fricção;
- de martelo;
- de ação de joelho.



Figura 2.43
Exemplo de prensa mecânica.

As prensas mecânicas são usadas nas operações de:

- corte;
- dobra;
- repuxo.

Prensas hidráulicas

As prensas hidráulicas podem ser:

- de simples efeito;
- de duplo efeito;
- de triplo efeito.





Figura 2.44 Exemplo de prensa hidráulica.



São utilizadas nas operações de:

- dobra;
- repuxo.

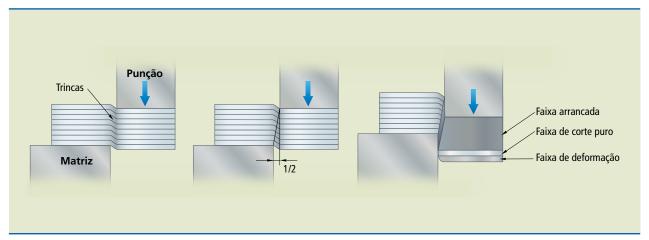
As prensas hidráulicas são empregadas principalmente nas operações de repuxo, pelo fato de essa operação necessitar de movimentos com velocidade lenta e controlada.

Figura 2.45

Porcentagem de penetração do macho em relação ao comportamento mecânico do material processado.

2.6.4 Porcentagem de penetração do macho

A figura 2.45 ilustra a porcentagem de penetração do macho em relação ao comportamento mecânico do material processado, e a tabela 2.3 oferece essa informação em dependência do tipo de material.



Chumbo 50 40 Estanho Alumínio 60 50 Zinco Cobre 55 Latão 50 Bronze 25 Aço ABNT 1010 50 Aço ABNT 1020 40 Aço ABNT 1030 33 30 Aço silício Níquel 55

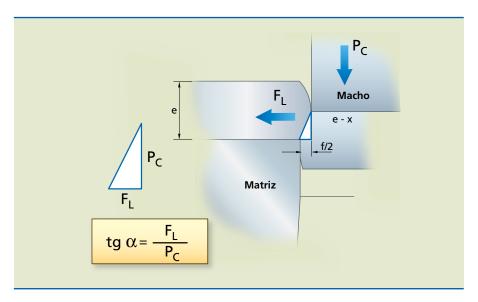


Figura 2.46 Forças exercidas na penetração.

Tabela 2.3

tipo de material.

Porcentagem de penetração

do macho em função do

P_C = força de corte máximo;

 $P_C = p \cdot e \cdot K_0$;

 F_L = força lateral;

 $F = P_C \cdot tg\alpha;$

x = penetração do macho;

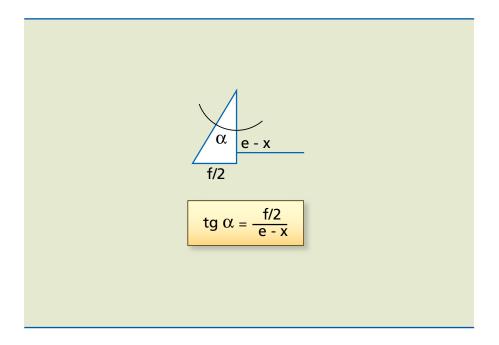
e = espessura da chapa;

f = folga entre macho e matriz.





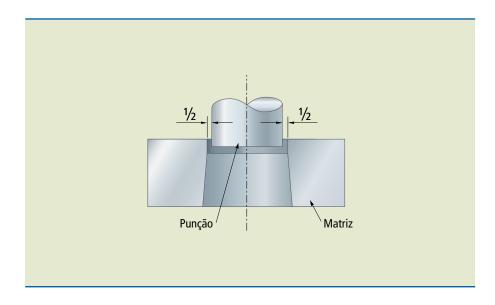
Figura 2.47 Relação entre os parâmetros na penetração.



2.6.5 Folga de corte

A exatidão das peças obtidas mediante o estampado de corte depende em primeiro lugar da precisão com que foram construídos os elementos cortantes do estampo (punção e matriz). A folga entre o punção e a matriz (figura 2.48) depende da espessura da chapa e da natureza do material, que poderá ser duro, macio etc.

Figura 2.48Folga entre o punção e a matriz.



Considera-se folga de corte a folga existente entre o punção e a matriz. A tolerância de corte, por sua vez, é a folga de corte total existente entre o punção e a matriz, ou seja, duas vezes a folga de corte. Quando há folga excessiva com aplicação errada, temos como consequência a peça com rebarba e abaulada, ocasionando ainda a quebra dos punções ou machos delgados.

Sem folga, a estampagem de chapas de ferro traz as seguintes desvantagens:

- encarecimento da ferramenta por sua difícil execução;
- maior desgaste do punção e da matriz, resultando pouca durabilidade da ferramenta.

Folgas aconselháveis

- a) Para fenolite e papel fibroso até a espessura de 2,0 mm, a folga total ou tolerância de corte é 3% da espessura da chapa (**e**); acima de 2,0 mm, a folga passa para 5% da espessura.
- b) Para zinco e alumínio mole, a folga total é 3% da espessura.
- c) Para materiais mais duros, **Fe**, alumínio duro, latão e bronze fosforoso, a folga total varia entre 5% a 9% de **e**.

Considerações sobre as ações de furar e recortar

1. Operação de furar

Nesse caso, as dimensões da peça são as do macho ou punção. Consequentemente, a matriz ficará com a folga de corte.

Em produtos com precisão, considera-se o fechamento, isto é, a passagem com pressão do punção pelo produto até o instante da ruptura. Daí resulta o fato de a medida do furo da peça ser menor que o diâmetro do punção.

2. Operação de recortar (macho final)

Nesse caso, as dimensões da peça serão as da matriz, portanto, o macho ficará com a folga de corte. Em produtos com precisão considera-se o **crescimento**. Daí resulta o fato de a medida da matriz ser menor que a da peça.

Determinação de medidas para o punção e a matriz, considerando a tolerância da peça

Quanto aos furos da peça mostrados no exemplo da figura 2.49, a medida máxima passa a ser também a medida do punção. É válida, portanto, a tolerância máxima indicada para o furo ou a tolerância geral do desenho.

Para tolerância acima de 0,5 mm, considera-se medida máxima permitida + 0,5 mm.

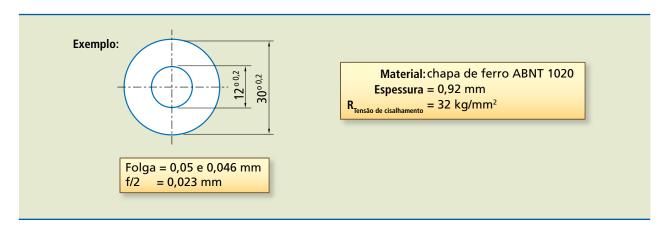
Para as medidas externas de produtos recortados, indicados no desenho, tais como arruelas e produtos semelhantes, a medida mínima passa a ser, ao mesmo tempo, a medida da matriz.

Crescimento: a
passagem, com
pressão, do produto
pela matriz. É
adotado um valor
de fechamento e
crescimento igual a
0,03 mm por face de
corte. Esse valor foi
conseguido por meio
de experiências.



Figura 2.49
Tolerâncias.

É válida, portanto, a medida mínima das tolerâncias indicadas no desenho da figura 2.49.



As fórmulas a seguir estabelecem as tolerâncias necessárias para furar (2.1 e 2.2) e recortar (2.3 e 2.4).

Medidas adotadas na operação de furar

medida teórica + tolerância máxima = **diâmetro do punção** -12 + 20 = 12,20 (2.1)

punção + folga = **diâmetro da matriz** – 10,20 + 0,046 = **10,246** (2.2)

Medidas adotadas na operação de recortar

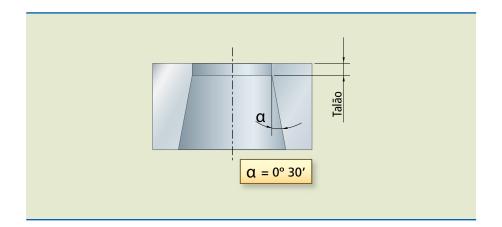
medida teórica – tolerância mínima = **diâmetro da matriz** – 30 - 0.20 = 29.80

matriz – folga = **diâmetro do punção** – 29,80 - 0,046 = 29,754 (2.4)

Ângulo de saída lpha no furo da matriz

O furo da matriz deve ser cilíndrico, em uma altura mínima de 2,0 mm (talão), ou duas vezes a espessura da chapa, porém nunca superior a 6,0 mm. A figura 2.50 mostra o ângulo de saída (α) no furo da matriz.

Figura 2.50 Ângulo de saída no furo da matriz.



Ângulo na retificação (afiar)

Nesse tipo de matriz, o ângulo varia em função da espessura da chapa (tabela 2.4). A figura 2.51 mostra um exemplo de ângulo na retificação.

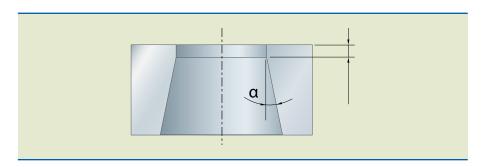


Figura 2.5 I Ângulo na retificação.

Espessura da chapa	Ângulo (α)
0,1 a 1,5	0° 30'
1,75 a 2,5	0° 45'
2,75 a 8,0	I°

Tabela 2.4 Ângulo em função da espessura da chapa.

Quando afiamos a matriz, a folga de corte sofre um aumento que varia em função da profundidade de retificação e do ângulo.

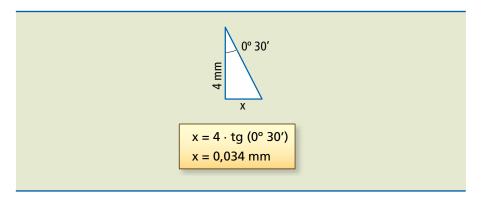


Figura 2.52Retificação (exemplo).

No exemplo mostrado na figura 2.52, temos:

 α da matriz = 0° 30' retificação = 4 mm aumento de f/2 = 0,03 f/2 atual = f/2 + 0,03

É importante salientar que a parte cônica deve ser feita em todas as arestas (contorno da peça) por onde a peça ou o retalho vão passar.



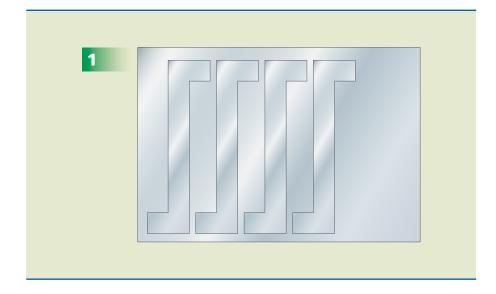


2.6.6 Estudo da tira

Antes de iniciar o projeto de uma ferramenta, é necessário fazer um estudo preliminar para o aproveitamento racional da chapa. Um desperdício injustificado do material eleva o custo do produto. É preciso, portanto, cortar convenientemente a chapa em tiras de modo a evitar sobras, ou aparas.

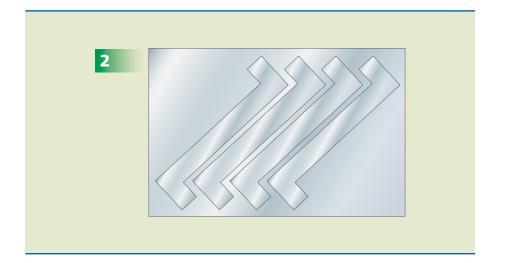
Em certos casos deve-se considerar também o sentido de laminação da chapa, que pode influenciar na qualidade do produto. Para isso deve-se dispor a peça na tira de maneira racional. Um método simples e prático para esse estudo consiste em recortar em cartolina certo número de peças e distribuí-las de vários modos, até acertar a melhor posição e a mais econômica.

Figura 2.53Distribuição das peças na chapa (caso 1).



Uma boa disposição, além de reduzir ao mínimo os retalhos, proporciona peças de melhor acabamento, melhor qualidade e até simplifica e facilita as operações de estampagem. As figuras 2.53 e 2.54 ilustram duas situações de distribuição das peças na chapa.

Figura 2.54Distribuição de peças
na chapa (caso 2).



A disposição mostrada na figura 2.54 (caso 2) é certamente mais econômica do que a da figura 2.53 (caso 1).

Separação do produto e sobra lateral

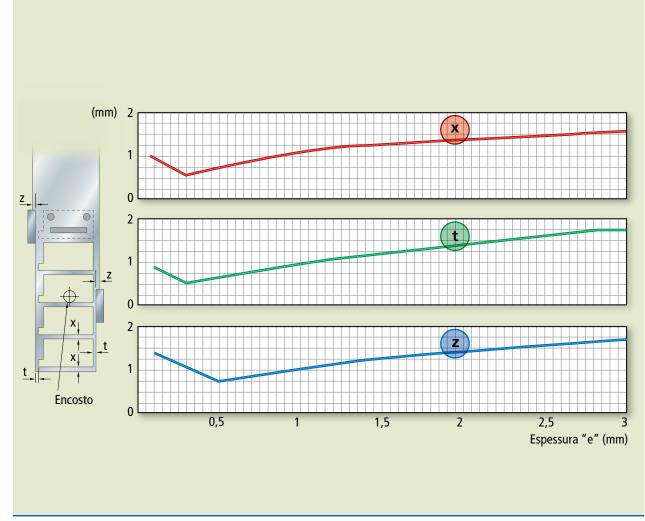
Seja qual for a disposição, para ter bom produto e bom funcionamento, é preciso que a separação entre uma peça e outra, assim como a largura da sobra lateral, obedeçam à condição

x = t = e

Essas condições são necessárias para que a tira de sobra seja mais rígida. Se não forem observadas, a sobra pode ceder ao arrasto do punção provocando interferência e as inevitáveis consequências: produto incompleto ou mal-acabado, engripamento ou ruptura da própria ferramenta.

O diagrama da figura 2.55 fornece a largura mínima de retalho para chapas de aço.

Figura 2.55
Largura mínima de retalho
para chapas de aço.



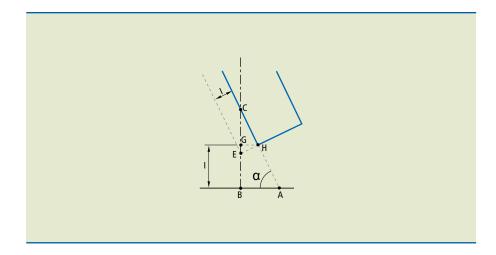




Disposição inclinada

A figura 2.56 mostra um exemplo de disposição inclinada.

Figura 2.56 Disposição inclinada.

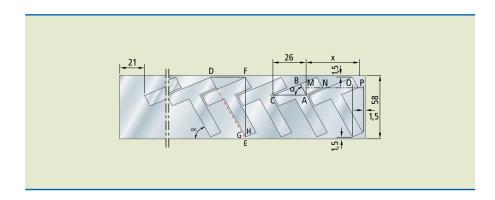


AB = 10 + 1 = 11 mm BC = 12.5 + 10 + 1 = 23.5 mm tg α = BC/AB = 23.5/11 = 2.13333 α = 65° sen α = 0.90631cos α = 0.42262

Disposição imbricada oblíqua

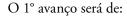
As figuras 2.57 e 2.58 mostram esquema de disposição imbricada oblíqua.

Figura 2.57 Exemplo de disposição imbricada oblíqua.



Passo: 26 mm FG = 54,86 mm BD = 1 + 10 + 1 + 10 = 22 mm BC = 22 sen α = 22 * 0,90631 = 19,93 mm

Largura da tira: 1,5 + 54,86 + 19,93 + 1,5 = 77,79 Número de tiras por chapa: 2000/78 = 25



$$X = 47,50 + 1,5 = 49 \text{ mm}$$

Número de peças por fita: =
$$\left(\frac{1000 - 49}{26} + 1\right)^* 2 = 74$$

Número de peças por chapa: 74 · 25 = 1850 peças.

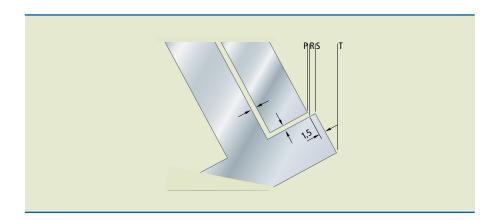


Figura 2.58
Diagrama de uma
disposição imbricada
oblíqua.

Esses exemplos dão ideia de como se aproveita a chapa. A escolha de uma ou outra disposição depende da quantidade de peças a produzir. O custo da ferramenta varia conforme se trate de um corte reto ou inclinado, de corte simples com retorno ou de corte duplo.

2.6.7 Cálculo da força necessária ao corte

A força de corte pode ser calculada empregando a seguinte equação:

$$F_c = p \cdot e \cdot T_C \cdot 1,2 \text{ [kg]}$$

em que:

F_c = força necessária ao corte (kgf);

p = perímetro a ser cortado (mm);

e = espessura da chapa (mm);

T_C = tensão de cisalhamento (kg/mm²);

1,2 = fator de segurança.





A tabela 2.5 mostra os valores de T_C para diferentes materiais.

 $\begin{tabular}{ll} \textbf{Tabela 2.5} \\ \textbf{Valores de T_C em} \\ \textbf{kg/mm}^2$ para cada material. \end{tabular}$

		Recozido	Cru		
	0,1%C	25	32		
	0,2% C	32	40		
	0,3% C	36	48		
	0,4% C	45	56		
Aço laminado	0,6% C	56	72		
	0,8% C	72	90		
	1,0% C	80	105		
	inoxidável	52	60		
	silício	45	56		
Alumínio		7 – 9	13 – 16		
Alpaca (Cu – Ni – Zn)		28 – 36	45 – 46		
Amianto em folha		3,	15		
Prata		23,5			
Bronze fosforoso		32 – 40	40 – 60		
	I folha de 0,25 mm de espessura	16			
Papel	5 folhas de 0,25 mm de espessura	4,5			
Тарел	10 folhas de 0,25 mm de espessura	2,3			
	20 folhas de 0,25 mm de espessura	1,4			
Papelão de espessura variável		2,0 – 3,5			
Cartão duro		7			
Cartão baquelitizado (resinoso)		10 – 13			
Celuloide		4 -	- 6		
Couro		0,6 – 0,8			
Duralumínio		22 38			
Fibra dura		19			
Borracha		0,5 – 0,8			
Compensado de madeira		I – 2			
Mica de 0,5 mm de espessura		8			
Mica de 2 mm de espessura		5			
Latão		22 – 30 35 – 40			
Chumbo		2 – 3			

	Recozido	Cru	
Cobre	18 – 22 25 – 30		
Resina artificial pura	2,5 – 3		
Estanho	3 – 4		
Zinco	12 20		
Baquelite	2,5 – 3		
Tecido baquelitizado	90 – 12		
Baeilite com entretela	9		

O corte da chapa por meio de punção e matriz até espessuras de $^{2}/_{3}$ mm não apresenta inconvenientes; o corte é perfeito, limpo e sem rebarbas. Com chapas grossas não acontece o mesmo; o punção pratica o cisalhamento até $1/2 \div 1/_{3}$ da espessura e depois arranca o restante do material deixando paredes ásperas e com rebarbas.

Exemplo I

Determinar a força de cisalhamento para obter uma peça de aço inoxidável cru de chapa de 2 mm de espessura, conforme a figura 2.59.

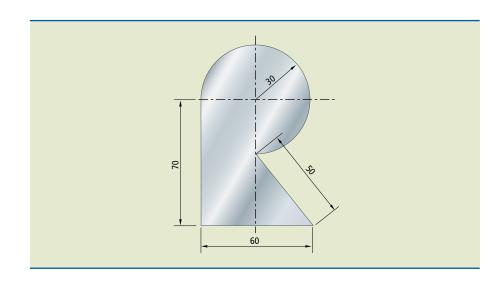


Figura 2.59

Solução

$$p = 50 + 60 + 70 + \frac{3}{4}\pi \cdot 60 \cong 320 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

$$T_c = 60 \text{ kg/mm}^2$$

$$F_c = peT_c(1 + 20\%) = 1, 2 \cdot peT_c$$

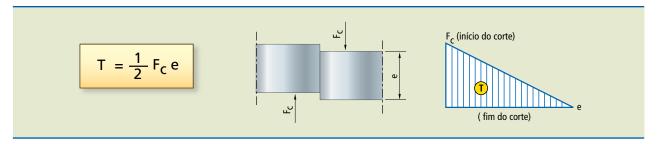
$$= 1, 2 \cdot 320 \cdot 2 \cdot 60 \cong 46000 \text{ kg}$$





O esforço de corte pode ser diminuído fazendo o punção ou a matriz com corte inclinado (biselado ou côncavo).

Figura 2.60 Com punção reto, a energia de corte é dada por:



A mesma energia é gasta também com corte biselado ou côncavo. A única diferença é o fato de que, enquanto a força de corte do punção reto age durante o percurso, no caso do punção inclinado ou côncavo atua durante o percurso **e** + i.

Figura 2.61

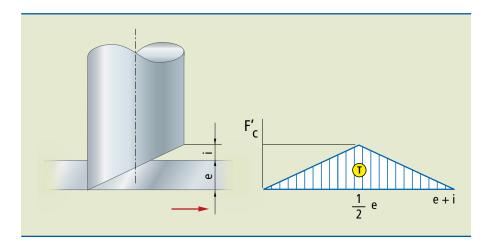
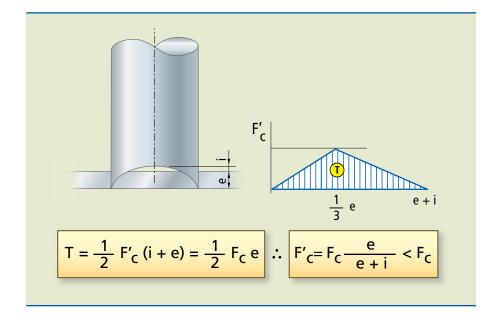


Figura 2.62



Quanto maior a inclinação do fio de corte, menor a força. O fio inclinado facilita o corte, alivia os punções, silencia a operação, mas curva as peças.

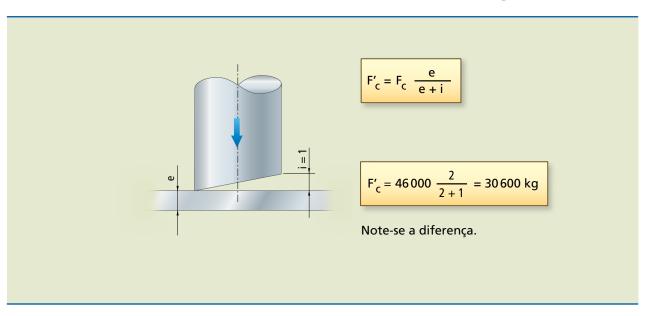
Para evitar uma excessiva deformação das peças cortadas, é aconselhável:

- $i \le 2e$ para chapas finas
- i ≤ e para chapas médias

Exemplo 2

Calcular a força do exemplo 1 supondo que o punção tenha o fio de corte inclinado a 1 mm.

Solução Figura 2.63



Outro artifício que também diminui o esforço de corte consiste em escalonar os punções de forma que entrem em ação por etapa, como mostra a figura 2.64.

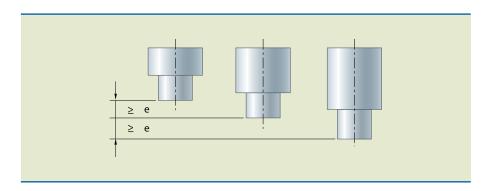


Figura 2.64Escalonamento dos punções por etapas.

Deverão atuar primeiro os esforços menores, pois prensas excêntricas fornecem esforços maiores nas proximidades do término do curso.





É importantíssimo que o escalonamento seja feito de forma a não desequilibrar a ferramenta. Para isso é necessário que os centros de pressão (baricentros) das várias etapas coincidam ou pelo menos quase coincidam.

2.6.8 Operações de estampagem

As operações básicas de estampagem são o corte, a dobra e o embutimento ou repuxo.

1. Corte

Consiste em separar de uma chapa uma porção de material com contorno determinado, mediante golpe de prensa e utilizando ferramental apropriado.

2. Dobra

Como seu nome indica, consiste em obter uma peça formada por uma ou mais dobras de uma chapa plana. Para isso é utilizada uma ferramenta denominada estampo de dobra.

3. Embutimento ou repuxo

Essa operação tem como finalidade produzir peças em forma de recipiente, como canecas, caixas e tubos obtidos pela deformação da chapa, a golpes de prensa e empregando ferramental especial denominado estampo de repuxo.

2.6.9 Operações de corte

O corte de chapas de metal é realizado por meio de forças de cisalhamento aplicadas na chapa pelos dois cantos de corte da ferramenta. Essas forças criam tensões internas que, ao ultrapassarem o limite de resistência ao cisalhamento do material, provocam a ruptura e por fim a separação.

O corte é realizado fundamentalmente em três etapas:

- deformação plástica;
- redução de área;
- fratura.

Antes de prosseguirmos, vamos definir alguns termos que serão empregados adiante:

- Punção elemento da ferramenta que provoca a perfuração por meio de movimento e forças transmitidas pela prensa.
- Matriz elemento da ferramenta que fica fixo na base da prensa e sob o qual se apoia a chapa.
- Folga espaço existente entre o punção e a matriz na parte paralela de corte.
- Alívio de ferramenta ângulo dado à matriz após a parte paralela de corte.

Esses elementos são ilustrados na figura 2.65.

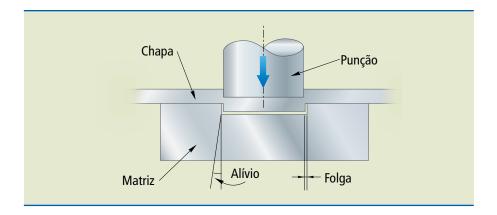


Figura 2.65Operação de estampagem.

Quando o punção desce sobre a chapa, o material começa a deformar-se até que o limite de escoamento seja ultrapassado. O material, então, é forçado a penetrar na matriz, formando uma calota na parte inferior por causa da deformação plástica (figura 2.66).

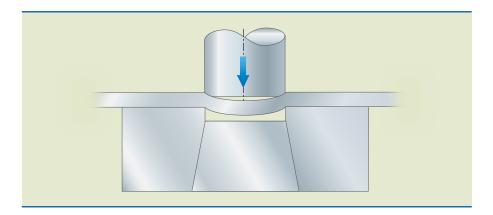


Figura 2.66
Deformação plástica
do material.

Com a continuação da aplicação de força pelo punção, o metal continua a penetrar na matriz reduzindo a área na região do corte (figura 2.67).

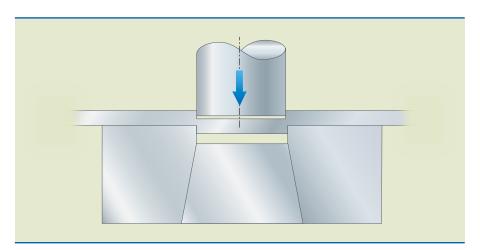


Figura 2.67
Redução de área na região de corte.





Logo se inicia a fratura, que começa no canto do corte do punção, para em seguida prosseguir no canto de corte da matriz. Com o aumento da penetração do punção, a fratura se prolonga e as duas fraturas eventualmente se encontram. Caso isso não aconteça, a parte compreendida entre as duas fraturas é "rasgada".

As partes fraturadas possuem acabamento liso e brilhante, enquanto a parte rasgada tem acabamento áspero.

Força de corte

O esforço de corte é calculado multiplicando-se a seção a ser cortada pela resistência do cisalhamento do material.

Como a área da seção a ser cortada é igual à espessura da chapa pelo perímetro a ser cortado, temos a seguinte equação:

 $F_c = e \cdot L \cdot \sigma_r$

em que:

e = espessura da chapa (em mm);

L = perímetro de corte (em mm);

 σ_r = tensão de ruptura ao cisalhamento (kgf/mm²);

 F_c = força de corte (em kgf).

Na prática, pode-se substituir a resistência ao cisalhamento pela resistência de ruptura à tração τ_p que fornece uma margem de segurança. Temos, então:

$$F_c = e \cdot L \cdot \tau_r$$

Força de extração

Como foi descrito, o punção penetra na peça a ser trabalhada, enquanto o retalho, ou a peça, fica preso à matriz. Portanto, deve-se extrair a peça trabalhada do punção ou a peça da matriz, o que é feito por extratores acionados por molas. Pode-se considerar que, para condições médias de folga e afiação das ferramentas, o esforço de extração varia de 5% a 12% de esforço de corte, e na prática utiliza-se o valor de 10%. Assim, a força de extração é igual a 0,10 F_c , e a força total necessária à operação de corte é dada por:

força total de corte = 1,1 Fc

Redução do esforço de corte

Muitas vezes é interessante procurar diminuir o esforço de corte para minimizar a necessidade de grandes prensas destinadas a uma única operação de corte. Isso pode ser feito por meio de um ângulo no punção ou na matriz, de maneira a reduzir a área de resistência ao corte (figura 2.68).

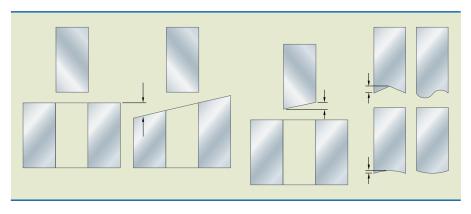


Figura 2.68
Redução do esforço de corte.

O trabalho requerido para cortar uma chapa de metal pode ser calculado pela fórmula básica:

trabalho = força × distância em que a força atua.

No caso do punção de face reta:

$$T_C = F_C \cdot e$$

em que:

 T_C = trabalho de corte;

 F_C = força de corte;

e = espessura da chapa.

No caso do punção de face angular, ver esquema na figura 2.69.

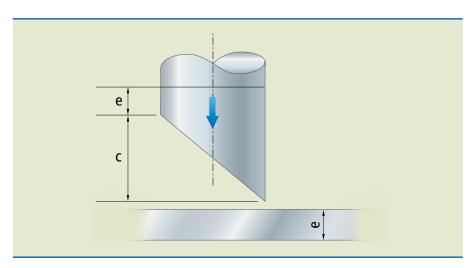


Figura 2.69Punção de face angular.

 $T_C = F_C \cdot (e + c)$

O trabalho para executar o corte não varia quer exista ângulo ou não, mas, como a distância percorrida pelo punção é maior com ângulo, a força de corte necessária é menor nesse caso.





Na prática, esse ângulo varia de 5° a 18°:

 $\mathsf{T}_{\texttt{C1}} = \mathsf{F}_{\texttt{C1}} \cdot \mathsf{e} \to \mathsf{T}_{\texttt{C1}} = \mathsf{T}_{\texttt{C2}} = \mathsf{F}_{\texttt{C2}} < \mathsf{F}_{\texttt{C1}}$

Figura 2.70 a) Esquema da prensa;

b) Processo de corte.

da prensa; $T_{C2} = F_{C2} \cdot (e + c)$

Cabeçote da prensa Placa porto Cabeçote Chapa Matriz de Placa porta matriz Base da prensa Extrator guia Extrator elástico

2.6.10 Dobramento

No dobramento (figura 2.71), a chapa recortada é submetida a forças que causam uma modificação de contorno. Essas forças aplicadas que deformam o metal criam tensões na peça, ultrapassam o limite elástico e situam-se na zona das deformações plásticas.

A chapa a ser dobrada é deformada por tração na parte externa e por compressão na parte interna do raio, ou seja, por flexão. Portanto, fraturas, se houver, estarão localizadas no lado da tração, ou seja, no lado externo, e se houver rugas, estarão no lado da compressão, isto é, no lado interno.

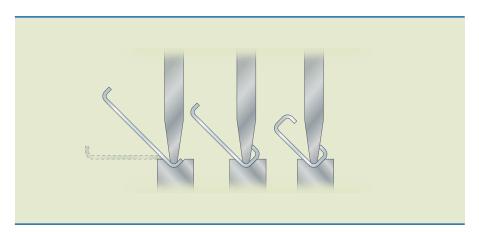


Figura 2.7 I
Processo de dobramento.

Eixo neutro

Como a chapa é solicitada de um lado por tração e de outro por compressão, deve existir um ponto entre as duas superfícies em que a tensão normal é zero, portanto, não há deformação. A linha formada por esses pontos é chamada linha neutra ou eixo neutro.

Como essa linha não sofre deformações, concluímos que seu comprimento permanece o mesmo após a deformação. Daí sua importância, pois por essa linha se calcula o desenvolvimento da peça, ou seja, a área que deve ter a chapa antes de ser dobrada, para que se possa obter a peça dobrada com as dimensões desejadas.

Quando se inicia a dobra, o eixo neutro está no centro da espessura e, à medida que a dobra aumenta, ele se desloca na direção do lado interno da curva, isto é, do lado de compressão. Na zona de tração, aumenta o comprimento do material e diminui a largura. Na zona de compressão, o comprimento diminui e a largura aumenta (figura 2.72).

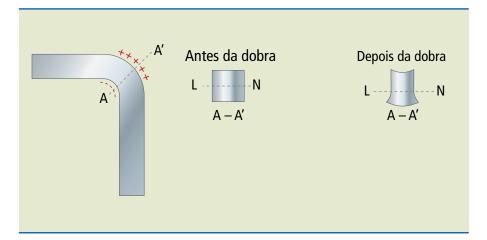


Figura 2.72
Comportamento
do material antes e
depois da dobra.





Cálculo do desenvolvimento

Para obter uma peça dobrada, é necessário começar com uma peça plana de perfil adequado. A partir desse perfil plano, é feito o desenvolvimento da peça. É por isso que é comumente chamado de perfil de desenvolvimento da peça. Esse desenvolvimento é calculado com base na linha neutra da peça. Como valores práticos para localização da LN podem ser citados para:

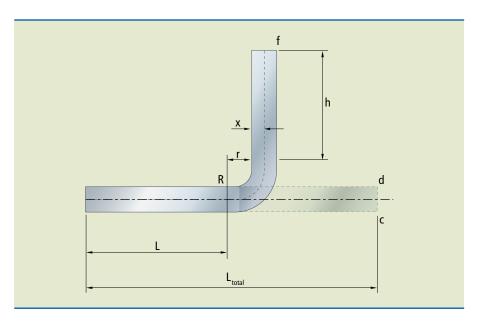
- chapas de até 2 mm \rightarrow LN = 1/2 · e (espessura da chapa)
- chapas de 2 até 4 mm \rightarrow LN = 3/7 · e
- chapas acima de 4 mm \rightarrow LN = 1/3 · e

Conhecida a posição da LN, para o cálculo do desenvolvimento, basta determinar o comprimento da linha neutra.

Determinação experimental da linha neutra

Para determinação exata da posição da LN, é necessário fazer o dobramento de uma tira de chapa com a espessura e o raio de dobramento desejado, como mostra a figura 2.73.

Figura 2.73Determinação da posição da linha neutra.



Temos:
$$L_{total} = L + \frac{2\pi R}{4} + h$$

(o desenvolvimento e a LN têm o mesmo comprimento)

Multiplicando a expressão por 2, temos:

$$2L_{total} = 2L + \pi R + 2h$$

$$\therefore R = 2(L_{total} - L - h)$$



$$\therefore$$
 x = R - r, ou seja, x = $\frac{2(L_{total} - L - h)}{\pi}$ - r

Retorno elástico (spring back)

Durante a operação de dobrar o material da chapa, nas regiões próximas ao eixo neutro, há solicitação de tensão inferior ao limite de elasticidade do material da chapa.

Por esse motivo, cessada a ação da força de dobramento, essas regiões tendem a voltar à posição original, o que é parcialmente impedido pela ação das outras regiões da peça que sofreram deformação permanente (acima do limite de elasticidade).

Entretanto, a chapa dobrada sempre tem o retorno de alguns graus na zona de dobramento, pelo fato de a zona próxima à linha neutra não ter passado do estado elástico para o plástico. Esse ângulo β de retorno varia de 1° a 10°, dependendo da espessura da chapa, do tipo de material e do raio de curvatura (figura 2.74). Para ter uma ideia exata de seu valor, convém realizar um ensaio prévio de dobra. Para o aço doce, $\beta \cong 2$ °.

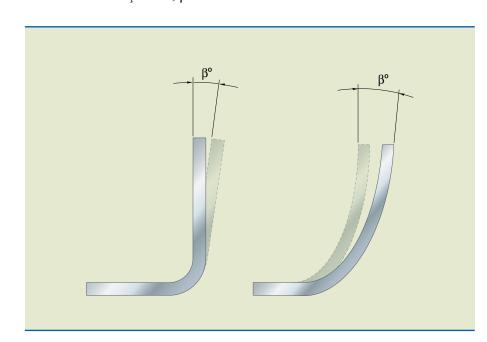


Figura 2.74 Ângulo de retorno.

Raio mínimo da dobra

Quanto menor o raio de dobra, maior o alongamento das fibras externas sujeitas à tração. Para evitar rupturas, esse raio de dobra não deve ser muito pequeno.

A determinação teórica do raio mínimo da dobra é bastante difícil, e na prática utilizamos valores obtidos por experiência. Para o aço doce, $R_{mín} \ge e$, em que e = espessura da chapa.





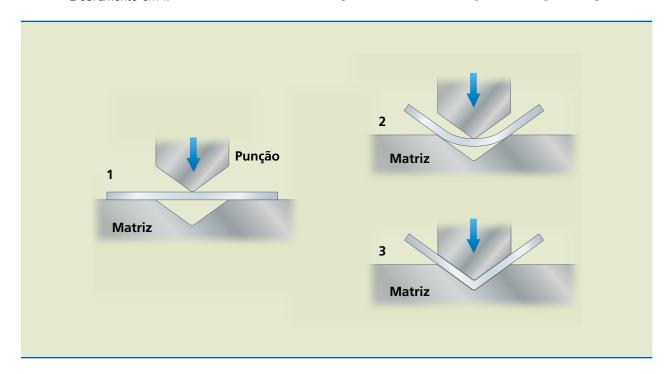
MECÂNICA 5

Métodos de dobramento

Existem basicamente três formas de ação do punção para obter um dobramento:

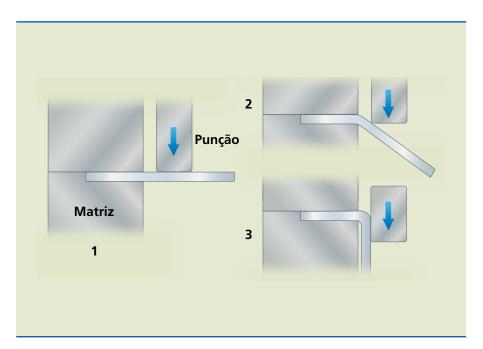
Figura 2.75Dobramento em V.

1. Dobramento em V (figura 2.75). Mais usado para dobrar perfis largos.



2. Dobramento em L ou U, com o qual é possível obter dobras perfeitas (figura 2.76) por causa do pequeno braço de alavanca em que atua o punção. Esse sistema é mais empregado para a obtenção de pequenas peças dobradas.

Figura 2.76Dobramento em L.



3. Dobramento de ação frontal (figura 2.77). É usado preferencialmente no dobramento de perfis fechados ou curvos.

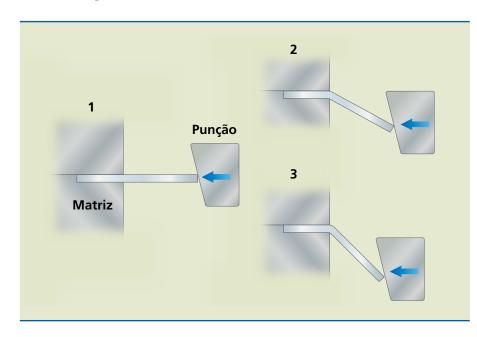


Figura 2.77
Dobramento de ação frontal.

Folga entre punção e matriz

Se não houver folga entre o punção e a matriz, como a espessura da chapa não é rigorosamente exata, podem aparecer formas de dobramento muito superiores às calculadas. Por esse motivo, é normal deixar uma folga de 1/10e. Assim, a folga total é dada por:

$$folga = e + 1/10e = 11/10e$$

Esforço de dobramento

O cálculo da força de dobramento é feito com base nas fórmulas de resistência dos materiais para flexão de uma barra (figura 2.78).

Para o caso da dobra em V, temos:

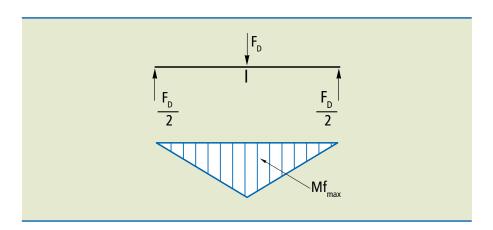


Figura 2.78Barra flexionada.





(1)
$$Mf_{max.} = \frac{f_D}{2} \cdot \frac{\ell}{2} = \frac{F_D \ell}{4}$$

(2)
$$Mf = \sigma_f \cdot W$$

em que:

Mf_{máx}. = momento fletor máximo;

 F_D = força de dobra;

I = comprimento do vão entre os dois apoios;

 σ_f = tensão de flexão;

W = módulo de resistência.

Para superfície retangular, como chapas, W vale: $Mf = \frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2}{6}$.

Substituindo em (1), temos: $\frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{F_D \cdot \ell}{4} \Rightarrow F_D = \frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2 \cdot 4}{6 \cdot \ell}$

$$F_{D} = \frac{b \cdot e^{2} \cdot \sigma_{f}}{1.5 \cdot \ell}$$

Quando há uma dobra em L, os cálculos são baseados no esquema de viga engastada:

$$Mf_{max} = F_{D} \cdot \ell \quad (1)$$

$$Mf_{max} = \sigma_{f} \cdot W \quad (2)$$

$$Mf_{max} = \sigma_{f} \cdot W \quad (2)$$

$$W = \frac{b \cdot e^{2}}{6}$$

$$F_{_D}\cdot\ell=\frac{\sigma_{_f}\cdot b\cdot e^2}{6}$$

$$F_D = \frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2}{6 \cdot \ell}$$

Esforço necessário para o dobramento

Em todas as operações de dobramento, com exceção da dobra em V, é necessário que o desenvolvimento seja mantido firmemente contra o punção (ou matriz), a fim de contrabalançar a força exercida e evitar que o desenvolvimento se movimente durante a operação.

O valor prático dessa força é retirado entre 0,3 e 0,4 F_D.

2.6.11 Repuxo

A operação de repuxar consiste em obter uma peça de forma qualquer partindo do desenvolvimento de uma chapa plana. A teoria que estuda o fluxo do metal nessa operação é bastante complicada, pois se baseia nas propriedades do metal na fase de plasticidade a frio, com estados de tensão duplos e triplos.

A técnica de repuxo começa no limite elástico do material e termina um pouco antes do limite de sua ruptura. Portanto, quanto maior a diferença entre o limite elástico e a carga de ruptura, maiores as possibilidades de repuxar determinado material (por exemplo, aço).

A chapa de aço para operações de repuxar deve ter um limite elástico bastante baixo (18 a 21 kgf/mm²) e a carga de ruptura mais elevada possível (35 a 42 kgf/mm²), com um coeficiente de alongamento em torno de 33% a 45%.

Nessa operação, ao contrário das precedentes, praticamente todo o volume da peça sofre tensões, e o material é encruado.

Em certos casos, o encruamento melhora a qualidade do produto acabado. Por exemplo, partes de carroceria de automóvel, nas quais, por causa do encruamento, o limite elástico e a carga de ruptura são elevados, ele aumenta a resistência a rupturas por fadiga, a deformações e à flambagem.

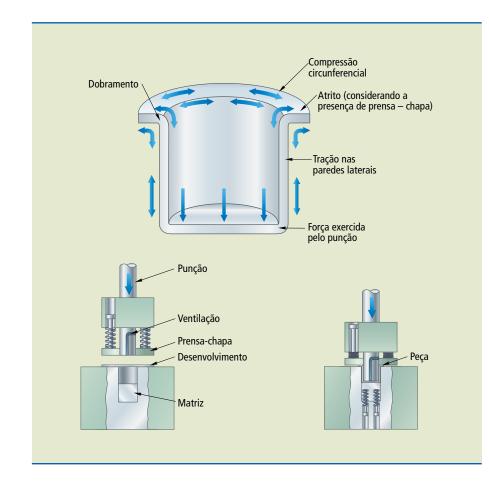


Figura 2.79
Repuxo de uma peça redonda.





Por outro lado, encruamentos excessivos devem ser evitados, pois isso pode tornar a peça frágil e fazer determinadas regiões chegarem muito perto do limite de ruptura do material.

A figura 2.79 mostra as forças que atuam na operação de repuxar uma peça redonda.

Cálculo do desenvolvimento de uma peça embutida

Para cálculo do desenvolvimento, utilizamos uma regra que na prática apresenta bons resultados: durante a operação de repuxar, a espessura da chapa permanece constante em todas as regiões da peça.

Nesse caso, torna-se fácil determinar o desenvolvimento, pois se trata de uma simples comparação de áreas. A área da superfície da peça repuxada é igual à área de desenvolvimento.

$$S \cdot e = S' \cdot e \rightarrow S = S'$$

Desenvolvimento de peças retangulares

O repuxo de uma peça quadrada ou retangular pode ser dividido em duas regiões:

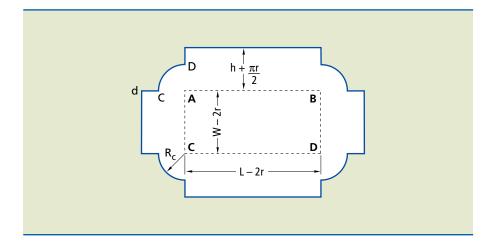
- região dos raios;
- região das linhas retas.

Na primeira região, considera-se um caso análogo ao do repuxo de uma peça redonda. Na segunda região, calcula-se o desenvolvimento como se fosse um dobramento.

Cálculo do desenvolvimento de uma peça retangular

Para começar o desenvolvimento, é desenhado um retângulo ABCD, como mostrado na figura 2.80, com largura de W-2r e comprimento igual a L-2r, em que:

Figura 2.80Cálculo de desenvolvimento de uma peça retangular.



L = comprimento do fundo da caixa;

W = largura do fundo da caixa;

r = raio de dobramento do fundo da caixa.

Depois, deve ser marcada uma distância igual a $h + \pi r$ partindo dos dois lados do retângulo ABCD, em que:

h = altura da lateral da caixa.

Nessa distância, devem ser traçadas paralelas aos lados do retângulo, com o mesmo comprimento deles.

Para completar o desenvolvimento, a partir dos pontos ABCD, traçam-se quartos de círculo com raio R_C , em que:

$$R_C = \sqrt{2Rh + R^2 + 1,41Rr}$$

e R = raio de dobramento dos cantos da caixa.

Teoricamente, esse desenvolvimento contém material suficiente para que a caixa seja repuxada. Mas a experiência demonstra que a união em canto vivo do arco *bc* com as bordas dos lados não permite obter o objeto de maneira correta. Efetuamos, por isso, a união arredondada dos citados elementos, como mostrado na figura 2.81.

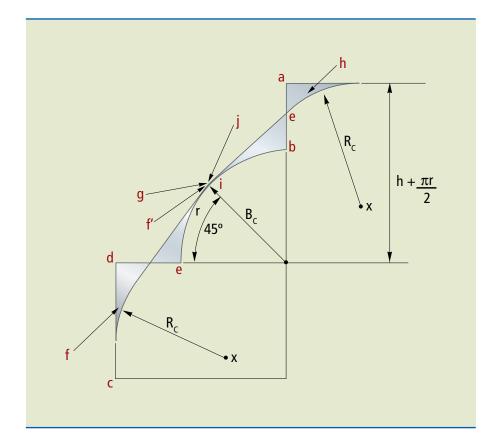


Figura 2.81
União arredondada dos elementos.





Para esse arredondamento, devemos agir da seguinte maneira:

- Traçar o ponto médio de ab e cd.
- Pelos pontos médios e e f traçar as tangentes gh e ij.
- Traçar arcos com raio R_C, de modo que eles coincidam com os lados do desenvolvimento e com as tangentes gh e ij.

O desenvolvimento dos cantos efetuados dessa maneira assegura a mesma distribuição de metal, porque as áreas dos triângulos curvilíneos que ficaram excluídos do desenvolvimento são exatamente iguais às dos que foram incorporados ao desenvolvimento.

Esforço de embutimento

Não é tarefa fácil calcular o esforço necessário para efetuar a operação de embutir uma peça, pois interferem muitos fatores, tais como: tipo de material, espessura da chapa, profundidade do embutimento, raios da matriz e do punção, acabamento superficial deles, lubrificação etc. Porém, é certo que o esforço de embutimento deve ser menor que a força de corte para o rompimento do fundo da peça. Assim:

 $F_e < S \cdot \delta$, em que:

 F_e = força de embutimento;

S = área resistente;

 δ = tensão de cisalhamento.

Para embutimentos cilíndricos realizados sobre matrizes corretamente construídas e providas de prensa chapa, podemos dizer que a força de embutimento pode ser dada pela seguinte equação:

Fe =
$$\pi \cdot d \cdot e \cdot \delta \cdot m$$

sendo um coeficiente que depende da relação d/D (tabela 2.6).

Tabela 2.6Coeficiente para o cálculo da força de embutimento.

d/D	М
0,55	1,00
0,60	0,86
0,65	0,72
0,70	0,60
0,75	0,50
0,80	0,40

em que:

d = diâmetro do fundo da peça;

D = diâmetro de desenvolvimento.

Folga entre punção e matriz

Em razão da falta de uniformidade de espessura da chapa, a folga deverá exceder em 1/10 essa espessura:

$$folga = e + 1/10e = 11/10e$$

Embutimento progressivo

Quando se trata de obter peças embutidas de grandes profundidades, como recipientes com um diâmetro muito pequeno em relação à altura, ou quando a relação entre o diâmetro d da peça embutida e o diâmetro d do disco inicial é d/D = 0.5, não é possível obter a peça em uma única operação, pois o encruamento seria tão grande que a peça se romperia. Para contornar esse inconveniente, realiza-se o embutimento por passadas sucessivas.

Naturalmente, os diâmetros d_1 , d_2 , d_3 etc. devem ser reduzidos gradualmente, em certa proporção, para evitar ruptura da chapa.

Em geral, são admitidas na prática as seguintes relações:

$$d_1 = K_1 \cdot D$$
 (1ª operação)

 $d_n = K_2 \cdot d_{(n-1)}$ para as operações seguintes.







soldagem é uma técnica antiga, utilizada para garantir uniões fixas em navios, caminhões e estruturas em geral. Foi classificada como processo de segunda categoria porque apresentava desvantagens, como aumento do peso nas estruturas, e era mais lenta e não perfeitamente impermeável.

No século XX, o processo de soldagem deu um salto. Além da fabricação de peças pela junção de duas ou mais partes metálicas, foram criados robôs que auxiliam na soldagem realizando um trabalho rápido e perfeito. Na figura 3.1, é mostrada uma máquina automática para soldagem.

Figura 3.1 Máquina automática para soldagem.



Os grandes avanços tecnológicos nas técnicas de soldagem fazem com que elas sejam amplamente utilizadas em diversos campos da engenharia, com maior aplicação na indústria automobilística e na construção naval.



Os processos de soldagem podem ser classificados da seguinte forma:

Sem proteção

Com fase líquida – por arco elétrico:

- com proteção fluxo sólido;
- com proteção fluxo gasoso;
- com proteção fluxo granular.

Por resistência elétrica:

• electroslag.

Por chama:

• oxiacetilênico.

Por GLP etc.:

No estado sólido:

- por pressão;
- por termo-compressão;
- por atrito (fricção);
- ultrassônica;
- por explosão;
- por radiação: através de raios *laser*.

3.2 Soldagem manual com eletrodo revestido, por meio do arco elétrico

A soldagem com arco elétrico é o processo no qual a fonte calorífica necessária à soldagem é obtida por um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça a ser soldada.

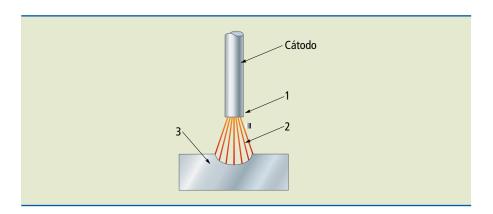
O arco elétrico é definido como uma descarga elétrica, de brilho incandescente, em um meio gasoso, acompanhada por intenso desprendimento de calor. O arco elétrico é gerado quando dois condutores de corrente (eletrodos) são unidos, efetuando o contato elétrico, e depois separados. O calor gerado pelo curto-circuito provoca grande movimentação eletrônica e faz com que o espaço de ar entre os eletrodos deixe passar corrente (ionização), revestindo assim o arco.

O arco elétrico ocorre nas regiões mostradas na figura 3.2:





Figura 3.2Regiões no processo de soldagem a arco.



Na figura, observamos:

- 1. cátodo, de onde os elétrons partem para o ânodo (~3200 °C);
- 2. espaço de ar no qual os átomos são ionizados (até 6 000 °C);
- 3. região do **ânodo**, onde estão os íons positivos (~3 400 °C).

Na abertura dos arcos, é necessária uma tensão maior do que a usada para mantê-lo, por causa da necessidade de o ar ser inicialmente ionizado. Para manter o arco, os eletrodos devem ter uma diferença de potencial que depende do **material**, da **corrente** do arco e de seu **comprimento**.

O comportamento da corrente e da tensão do circuito, em cada uma dessas fases, pode ser observado nas figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

Figura 3.3 Arco ainda não aberto.

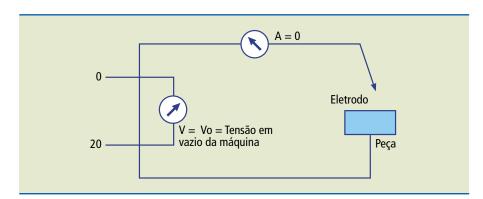
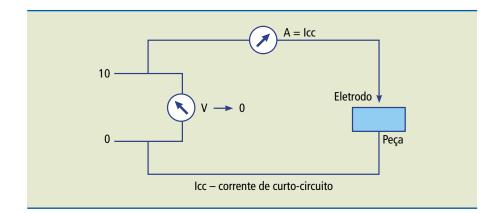


Figura 3.4 Abertura do arco.



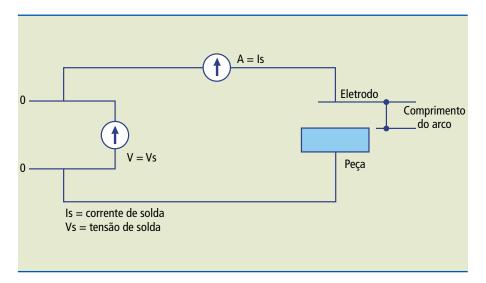


Figura 3.5Manutenção do arco.

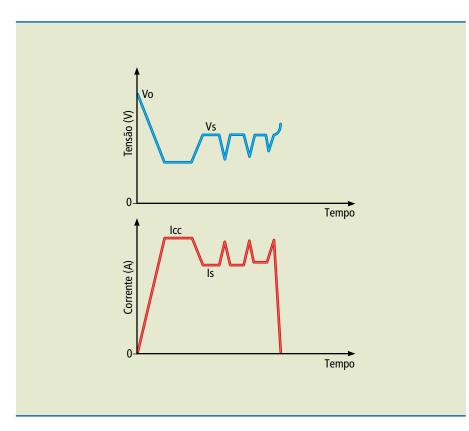


Figura 3.6Variação da tensão e a corrente no tempo.

3.2.1 Propriedades da soldagem a arco

Na soldagem a arco, este é mantido em um campo gasoso, cheio de vapores do metal do eletrodo e de seu revestimento (figura 3.7).

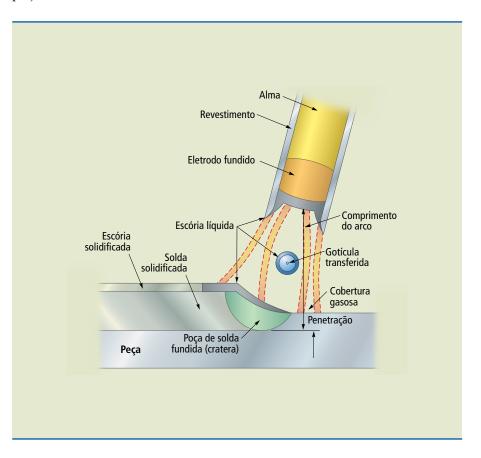
O metal da peça é fundido, e forma-se uma poça de metal fundido. Por sua vez, o metal de adição é também fundido e transferido à poça na forma de glóbulos. Essa transferência ocorre principalmente pela expansão dos gases, inclusão no arame dos eletrodos e em seu revestimento.





A distância medida da extremidade do eletrodo até o fundo da poça denomina-se comprimento do arco (figura 3.7). O controle desse comprimento é de vital importância no processo da soldagem e deve ser de 3 a 4 mm, para minimizar a possibilidade de os glóbulos de metal fundido entrarem em contato com a atmosfera e absorverem oxigênio, o que seria altamente prejudicial à solda.

Figura 3.7Características da soldagem a arco.



3.2.2 O revestimento do eletrodo e suas funções

As funções básicas do revestimento do eletrodo são:

- facilitar a estabilização e manutenção do arco;
- proteger o metal fundido contra a ação do oxigênio e nitrogênio do ar, pela produção de um campo gasoso que envolve o arco e a poça de solda;
- criar a escória de proteção evitando porosidades e reduzindo a velocidade de solidificação, de maneira a permitir um resfriamento lento da solda;
- diminuir as perdas por salpicos;
- introduzir elementos de liga não existentes na alma do eletrodo;
- facilitar a soldagem nas várias posições de trabalho;
- introduzir elementos desoxidantes, como o manganês e o alumínio.

Os eletrodos podem ser classificados, quanto ao tipo de revestimento em: ácidos, básicos, celulósicos, oxidantes, rutílicos e titânicos, cujas principais características são mostradas na tabela 3.1.



Tabela 3.1Principais caracterís

Principais características dos diferentes tipos de eletrodos.

3.2.3 Classificação dos eletrodos

A classificação mais usada para eletrodos é a da American Welding Society (AWS), segundo a qual os eletrodos são identificados por uma letra e quatro ou cinco algarismos. Os dois ou três primeiros algarismos indicam o limite de resistência à tração da solda em kips/pol² (1 kip = 1 000 libras); o penúltimo algarismo indica as posições de soldagem, e o último, as características de operação: tipo da corrente, tipo de escória, penetração e quantidade de pó de ferro, se houver (ver tabelas 3.2 e 3.3).





Tabela 3.2

Classificação dos eletrodos segundo os algarismos.

Algarismo	Significado
2 ou 3 primeiros	Resistência à tração em kips/pol²
Penúltimo	Posição de soldagem
Último	Tipo de corrente; tipo de escória; penetração; quantidade de pó de ferro

Penúltimo algarismo

1. Todas

3. Plana

2. Horizontal e plana

Tabela 3.3

Classificação dos eletrodos segundo o último algarismo.

Último	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo de corrente	(I) a	CC + ou CA	CC – ou CA	CC ± ou CA	CC ± ou CA	CC+	CC + ou CA	CC ± ou CA	CC + ou CA
Tipo de escória	(I) b	Orgânica	Rutílica	Rutílica	Rutílica	Baixo H	Baixo H	Mineral	Baixo H
Penetração	(I) c	Alta	Média	Pequena	Pequena	Média	Média	Média	Média
Pó de ferro	0 - 10%	_	0 - 10%	0 - 10%	30 – 50%	_	_	50%	30 – 50%

- a) E6010 é CC+, E6020 é CC± ou CA;
- b) E6010 é orgânica, E6020 é mineral;
- c) E6010 é alta, E6020 é média.

3.2.4 Seleção do eletrodo

A seleção do eletrodo a ser utilizado depende de uma série de fatores, como: composição do metal-base, posição de soldagem, tipo de serviços, grau de penetração requerido, espessura da junta a soldar, tipo de preparação da junta etc. Entretanto, podemos citar as seguintes regras básicas:

- juntas importantes, na posição plana, são realizadas mais rapidamente com eletrodos de alto rendimento do tipo ácido, básico ou rutílico;
- na maioria dos casos, o diâmetro do eletrodo deve ser, no máximo, igual à espessura da junta a ser soldada;
- fora da posição plana deve ser usado o eletrodo básico para juntas importantes, e o rutílico para as de menor importância;
- nos serviços de solda descontínua ou ponteamento, os eletrodos celulósicos são recomendados;
- o eletrodo básico é recomendado para aços com teor de carbono acima de 0,2% e juntas de grande espessura.

Os catálogos de fabricantes normalmente informam o seguinte:

- tipo de revestimento e intensidade de corrente por bitola;
- características de penetração;
- tipos de serviços que podem ser executados e de aços que podem ser soldados;
- características mecânicas do depósito;
- posições de soldagem mais recomendados;
- análise química do depósito.

3.2.5 Máquinas de solda ao arco elétrico

A figura 3.8 mostra o esquema funcional de uma máquina de solda ao arco elétrico.

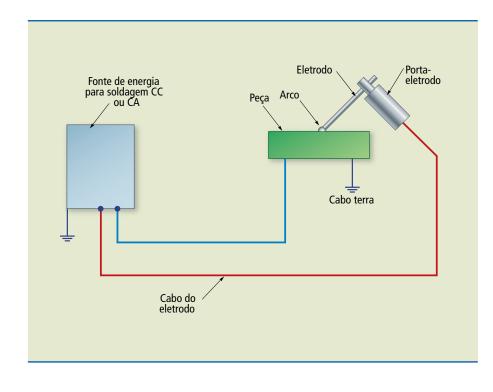


Figura 3.8Esquema funcional de uma máquina de solda ao arco elétrico.

Há três tipos de fonte de energia para soldagem com arco elétrico:

- transformador fornece somente corrente alternada (CA);
- retificador fornece corrente contínua (CC), podendo também fornecer CA;
- gerador fornece somente CC.

O objetivo principal de uma fonte de energia é proporcionar corrente controlável a determinada tensão.

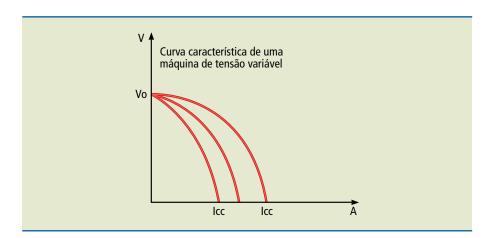
No caso de soldagem elétrica ao arco com eletrodos revestidos é utilizada uma fonte cujos controles de corrente estão inseridos nas próprias máquinas e cuja tensão é variável. A figura 3.9 mostra a curva característica de uma máquina de tensão variável.





Figura 3.9

Curva que relaciona
tensão e corrente em uma
máquina de tensão variável.



Transformador

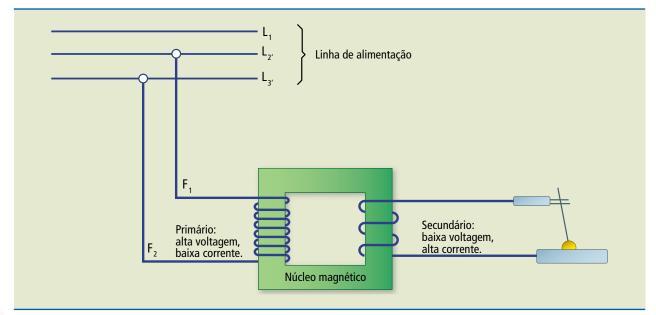
Opera pelo princípio da indução entre duas bobinas, cuja finalidade é modificar a alta tensão. Os principais circuitos ligados à fonte são chamados de:

- primário: recebe sua energia de uma fonte alternativa, sobre um núcleo de ferro, e apresenta dois fios; por isso diz-se que a máquina é monofásica;
- secundário: restitui energia, é feito de lâminas ou fios e é mais eficaz que o primário;
- núcleo magnético: circuito magnético por onde o fluxo magnético percorre o material.

Esquema simples de um transformador

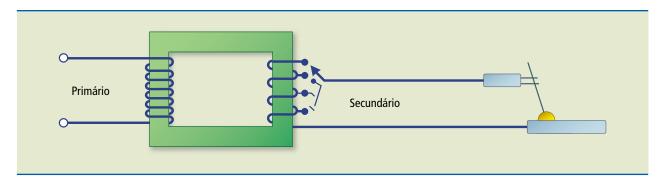
A figura 3.10 mostra o esquema simples de um transformador. O transformador apresentado não permite um controle de corrente e, na prática, é preciso ter uma máquina que permita obter a corrente desejada para os vários tipos de bitolas de eletrodos.

Figura 3.10Esquema de um transformador.



Há várias maneiras de obter o controle de corrente de um transformador. Dessas, as mais utilizadas são: tapes (figura 3.11), reator (figura 3.12), e variação do núcleo magnético (figura 3.13), conforme mostram os esquemas.

Figura 3.11
Esquema de um transformador regulado por tapes.



No controle regulado por tapes, ao se mudar de um tape para outro, ocorre uma variação tanto de corrente como de voltagem, o que não é interessante.

Uma maneira de obter sempre a mesma tensão (V_0) e variar a corrente é utilizar um reator, como mostrado na figura 3.12:

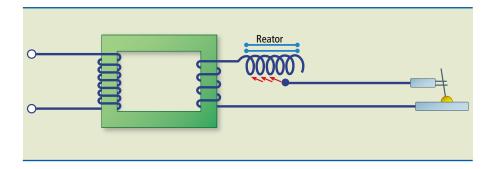
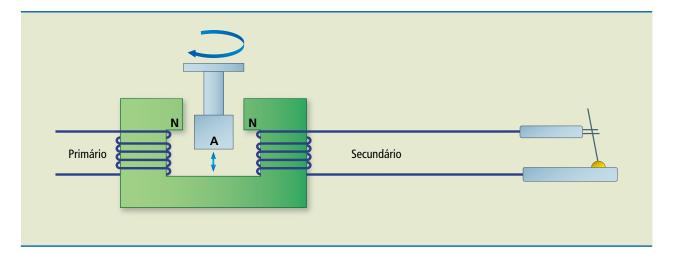


Figura 3.12
Controle por reator.

Figura 3.13Controle da corrente por variação do núcleo magnético.



O controle da corrente por variação do núcleo magnético é o método mais usado. Ao se variar a posição da peça A em relação ao núcleo N, varia-se a corrente de saída no secundário.





MECÂNICA 5

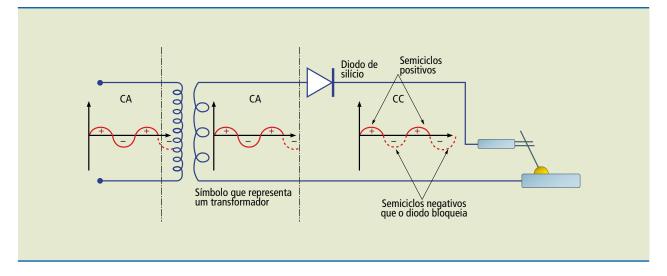
Os transformadores de solda, em condições normais de meio ambiente, não exigem praticamente nenhuma manutenção.

Retificador

Basicamente é um conjunto de elementos constituído de um transformador de corrente que converte CA em CC (figura 3.14).

Os retificadores mais utilizados são os diodos de silício, que permitem a passagem de corrente em um único sentido. Com isso, podemos concluir que os diodos permitem passagem da CA nos semicírculos positivos, bloqueando os semicírculos negativos.

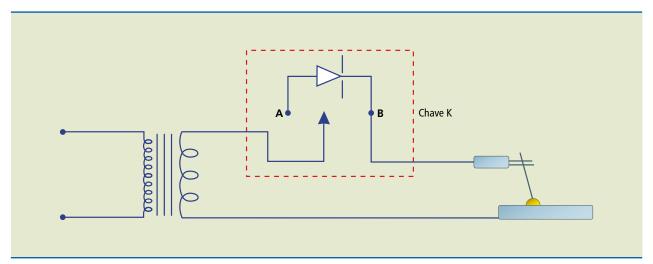
Figura 3.14 Esquema de um retificador.



Transformador-retificador de meia onda

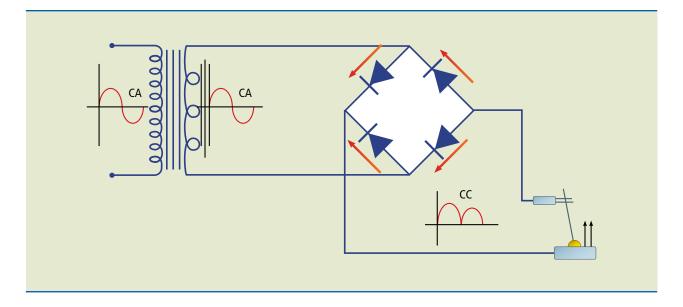
Figura 3.15
Esquema de um transformador-retificador.

Na figura 3.15, observamos um transformador-retificador provido de uma chave K que, quando colocada na posição A, fornece CC e, quando na posição B, fornece CA.



Como foi visto nos esquemas anteriores, obtemos a retificação só da metade de cada ciclo da corrente (retificação de meia onda), mas, na prática, desejamos uma retificação de onda completa e por isso lançamos mão de um maior número de retificadores e fazemos uma montagem especial denominada **ponte retificadora** (figura 3.16), que permite a retificação total da corrente.

Figura 3.16Ponte retificadora.

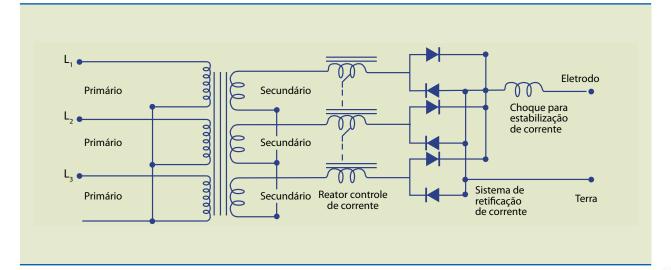


O tipo representado é conhecido como **retificador monofásico** e apresenta a vantagem de fornecer, além de CC, CA.

Entretanto, quando se deseja apenas CC, é usual um retificador trifásico (figura 3.17), pois o aproveitamento da máquina é muito maior, além de não causar problemas na linha de alimentação.

O controle de corrente nos transformadores-retificadores é normalmente efetuado pelo processo do núcleo magnético.

Figura 3.17
Esquema de um transformador-retificador trifásico.



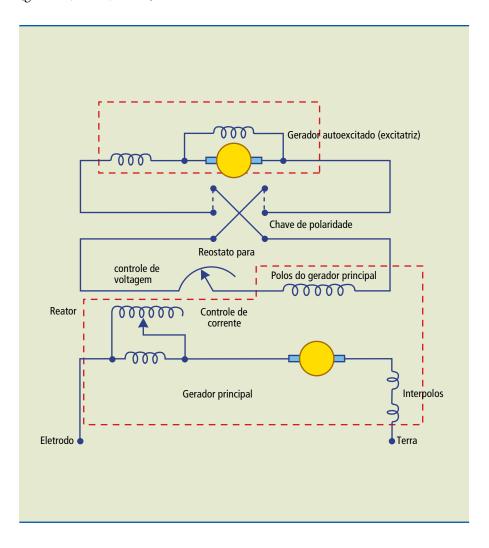




Gerador

Os geradores são fontes de corrente contínua. A CC é produzida por um gerador acoplado ao motor (figura 3.18), que pode ser elétrico ou de combustão interna (gasolina, diesel, álcool).

Figura 3.18
Esquema de um gerador
para soldagem movido
por motor elétrico com
excitação em separado.



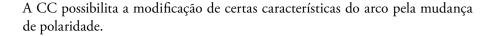
Como acontece com os transformadores e retificadores, os geradores devem ser providos de controles que permitam variar convenientemente a intensidade de corrente.

3.2.6 Escolha da máquina de solda

Comparação de soldagem com corrente contínua e corrente alternada

Corrente contínua (CC)

Um arco pode ser mantido com qualquer material condutor e executa soldagem de materiais, como alumínio, cobre e bronze, bastante refratários à CA.



Quando se trata de gerador movido por motor de combustão interna, independe de circuitos elétricos, sendo, portanto, ideal para trabalhos de campo.

Corrente alternada (CA)

Não permite o uso de eletrodos nus e obriga a manutenção de um arco mais curto.

O peso, o tamanho e o preço de um transformador são de 30% a 40% menores que os de um gerador de CC correspondente.

O transformador não possui peças móveis sujeitas a desgaste e não exige manutenção.

Valores estabelecidos para máquinas de solda pelas normas ABNT

Normas P - EB - 343 e NEMA - EW1:

Tensão para circuito aberto (V₀)

Para os transformadores, por motivos de segurança, a voltagem em circuito aberto não deve ser maior que 80 V. Para eletrodos com revestimento básico (baixo hidrogênio), o valor mínimo de V_0 deve ser da ordem de 55 V. Para retificadores e geradores, a tensão de circuito aberto pode ser de até 125 V.

Tensão no arco (V_s)

As normas estabelecem que os diferentes valores de corrente nominal estejam relacionados entre si por meio da seguinte equação:

 $V_S = 20 + 0.041$

 V_S = Voltagem no arco

I = corrente nominal

Em geral, a voltagem no arco para solda manual oscila entre 10 e 40 V. As normas estabelecem que a voltagem máxima no arco para máquinas de 600 A é de 44 V:

$$V_S = 20 + 0.04 \cdot 600 = 44 \text{ V}$$

Ciclo de trabalho

É o valor dado em porcentagem em relação a 10 min, no qual a máquina pode operar com a corrente nominal sem que haja superaquecimento ou qualquer estrago na isolação elétrica. Assim, se uma máquina de 300 A apresenta um ciclo de trabalho de 60%, significa que em 10 minutos a máquina pode ficar





em carga durante 6 minutos. As máquinas para solda manual apresentam ciclos de trabalho que variam de 20% (pequenas máquinas para serviços leves) até 60% (máquinas industriais para serviço pesado). Para a mesma máquina, os valores de corrente de saída e ciclo de trabalho estão relacionados pela equação:

$$I_1^2 T_1 = I_2^2 T_2$$
, em que:

 I_1 = corrente de saída no ciclo de trabalho T_1 I_2 = corrente de saída no ciclo de trabalho T_2

Exemplo

Para o ciclo de trabalho de 60% com uma máquina de corrente nominal 300 A, determinar a corrente que permitirá alterar esse ciclo de trabalho para 100%.

Solução

Temos:

$$I_1 = 300 I_2 = ?$$

$$T_1 = 0.6 T_2 = 1$$

$$300^2 \cdot 0.6 = I_2^2 \cdot 1 = I_2 = 232 \text{ A}$$

Portanto, uma máquina de 300 A a 60% pode trabalhar a 100% com uma corrente de 232 A.

Eficiência de uma máquina de solda

É determinada pelas perdas da máquina quando apresenta a corrente nominal e a tensão de arco especificada. É obtida dividindo-se a potência do arco (corrente e tensão nominais) pela potência de alimentação **e** é expressa em porcentagem.

Exemplo

Determinar a eficiência de uma máquina de solda de 300 A, de alimentação monofásica, com corrente de alimentação 70 A e tensão de 230 V, com um fator de potência de 0,83.

Solução

$$E = 20 + 0.04 \cdot 300 = 32 \text{ V}$$

$$Eff = \underline{32 \cdot 300} \cdot 100 = 72\%$$

$$230 \cdot 70 \cdot 0,83$$

Eficiência em torno de 70% e os geradores em torno de 50%, por causa das perdas na conversão da energia mecânica em elétrica.

Fator de potência

É a medida da utilização da energia elétrica recebida na alimentação da máquina de solda.

As máquinas monofásicas, transformadores ou retificadores, apresentam um fator de potência da ordem de 55%, ao passo que as trifásicas, da ordem de 75%. Os geradores movidos por motores elétricos trifásicos apresentam fator de potência da ordem de 85%.

Vantagens e desvantagens

As vantagens e desvantagens entre um tipo de máquina ou outro estão mostradas na tabela 3.4.

Tabela 3.4

Vantagens e desvantagens entre as diferentes máquinas de solda.

	Transformadores- -retificadores CA/CC	Retificador trifásico	Motor (elétrico) Gerador
Alimentação	Monofásico (mau)	Trifásico (bom)	Trifásico (bom)
Flutuação da linha	Má	Má	Boa
Trabalho em locais úmidos	Mau	Mau	Bom
Manutenção	Pouca	Pouca	Muita
Corte com carvão	Razoável	Razoável	Bom
Custo inicial	20%	50%	100%

3.3 Juntas

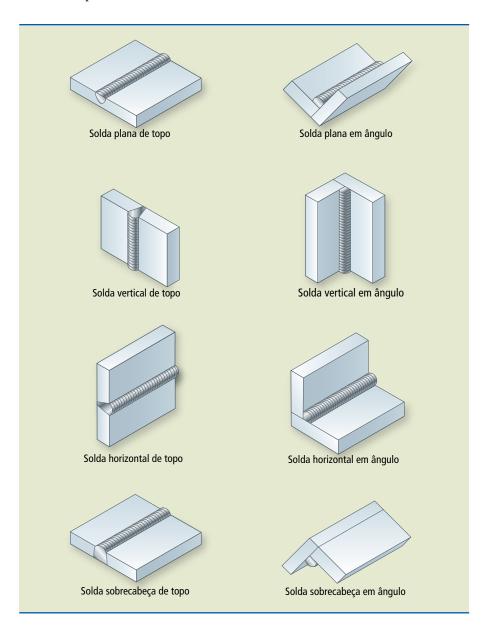
Denomina-se junta a região onde duas ou mais peças são unidas por soldagem. Para obter uma soldagem com penetração adequada e sem defeitos, na maioria dos casos temos de efetuar uma preparação por meio de chanfros. O tipo de preparação depende diretamente da espessura do material de base, do tipo da junta,





da facilidade de acesso à junta e da posição de soldagem. A figura 3.19 mostra diferentes tipos de uniões soldadas.

Figura 3.19Diferentes tipos de uniões soldadas.

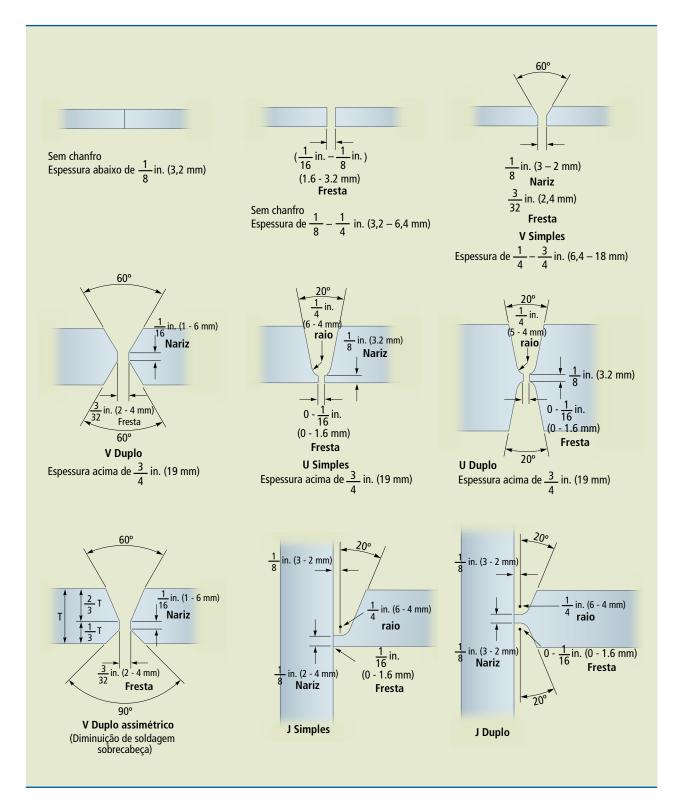


3.3.1 Posições de soldagem

Juntas de topo e preparações típicas

Denominam-se juntas de topo aquelas em que, em uma seção transversal, os componentes a soldar possuem espessuras semelhantes e se encontram no mesmo plano.

A preparação em V simples é utilizada para seções de espessura de no máximo 19 mm (3/4"). Acima de 19 mm, é mais econômico utilizar chanfros em V duplo, U simples ou U duplo, conforme pode ser visto na figura 3.20.



3.3.2 Preparação para juntas de topo

Para juntas de grande espessura, a preparação em U simples reduz consideravelmente o depósito de solda, porém é mais onerosa. Por sua vez, o U duplo minimiza o efeito de deformação, mas a junta deve ser de fácil acesso por ambos os lados.

Figura 3.20Diferentes tipos de preparação de bordas.



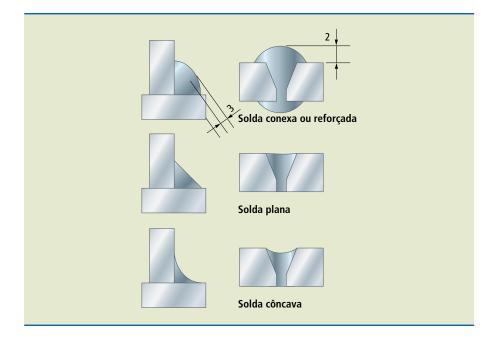


Alguns cuidados devem ser tomados na soldagem de juntas de topo:

- o primeiro passo de solda é de vital importância para a obtenção de uma solda perfeita;
- o reforço do cordão de solda não deve ser exagerado; usualmente é de 2 mm na posição plana e de 3 mm na vertical. Recomendações práticas indicam que deve ser limitado a 20% da espessura da junta.

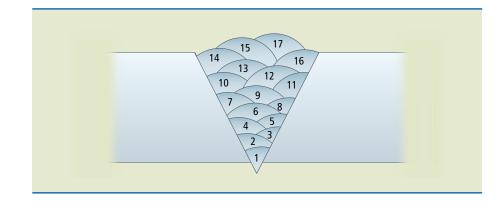
A figura 3.21 mostra alguns tipos de preparação de juntas.

Figura 3.21Preparação de bordas e reforço do cordão.



• o ato de "tecer" a solda não pode ser demasiado largo, não ultrapassando três vezes o diâmetro do eletrodo. Por essa razão, na soldagem de juntas espessas em ângulos muito abertos, as camadas superiores do cordão de solda devem ser feitas em dois ou mais passes. A figura 3.22 mostra a distribuição dos cordões de solda em uma junta de topo.

Figura 3.22 Distribuição dos cordões de solda em uma junta de topo.



A tabela 3.5 mostra o tipo de solda e o número de passes para soldagem de juntas de topo, em função do diâmetro do eletrodo e da espessura da peça.

Espessura da junta (mm)	Solda	plana	Solda v	ertical	Solda hoi	rizontal	Solda so -cabe	
	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes
3 - 4 5 - 6 7 - 8 9 - 11 12 - 13 14 - 15 16 - 19 20 - 25 24 - 30	3,25 4-5 4-5 5-6 5-7 5-7 5-7 5-7	1 2 2 - 3 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 - 7 7 - 11 9 - 18	3,25 3,25 3,25 3,25 3,25 - 4 3,25 - 4 4 4 - 5 4 - 5	1 2 2 3 4 5 5 - 7 7 - 10 10 - 15	3,25 3,25 - 4 3,25 - 4 4 - 5 4 - 5 4 - 5 4 - 5 4 - 5	2 3 4 4-5 5-7 7-10 11-18	3,25 3,25 3,25 3,25 - 4 3,25 - 4 3,25 - 4 4 4	1 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 6 - 7 7 - 8 9 - 15 16

3.3.3 Juntas em ângulo

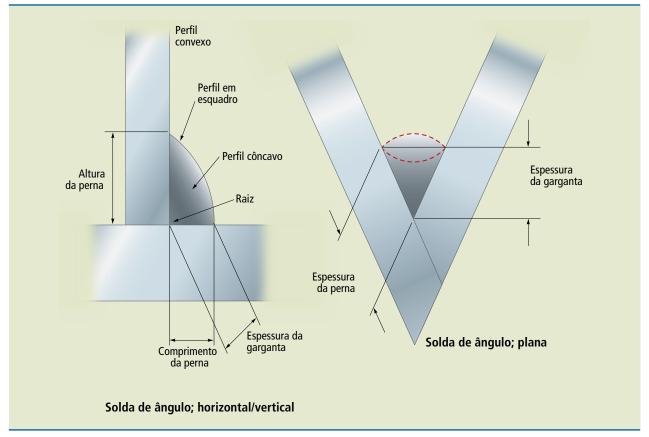
Junta em ângulo é aquela em que, em uma seção transversal, os componentes a soldar apresentam-se sob a forma angular. A solda realizada em juntas de ângulo é comumente conhecida como solda de filete (figura 3.23).

Deve ser feita, tanto quanto possível, na posição plana, a fim de minimizar os defeitos de soldagem. Os defeitos mais comuns são as mordeduras e as trincas.

Tabela 3.5

Relações entre espessura, diâmetro do eletrodo e número de passes para soldagem de juntas de topo.

Figura 3.23Soldas em ângulo.







A tabela 3.6 mostra, para as juntas em ângulo, as relações entre comprimento da perna, diâmetro do eletrodo e quantidade de passes.

Comprimento da perna (mm)	Solda	plana	Vert ascend		Sobre-c	abeça	Verti descen	
	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes	Diâmetro (mm)	Nº de passes
4 5 6 7 8 9 9 10	3,25 4 5 6,4 6,4 – 7 7 5 7	 	3,25 3,25 3,25 3,25 4 3,25 4	 	3,25 3,25 3,25 3,25 – 4 3,25 – 4 4	 -2 2	4 4 4 4	1 1 2 3 3

Tabela 3.6Relações entre parâmetros
para soldagem de
junta em ângulo.

3.3.4 Junta sobreposta

É aquela em que as superfícies dos dois componentes a soldar sobrepõem-se. Não é necessária nenhuma preparação das bordas, e a faixa de sobreposição precisa ter de 3 a 5 vezes a espessura da chapa mais grossa. Não deve ser usada para chapas com espessura acima de 10 mm.

3.4 Processos de solda automáticos e semiautomáticos com proteção gasosa do arame de solda e arco elétrico como fonte de calor

3.4.1 Processo MIG/MAG

Na figura 3.24 pode ser observada uma máquina para soldagem pelo processo MIG/MAG (metal inert gazlmetal active gaz).

Trata-se de um processo de solda automática ou semiautomática, a arco elétrico, que utiliza determinado gás como proteção para o arame de solda, que funciona como eletrodo.

A metalurgia das soldas feitas pelo processo MIG/MAG é a mesma de outros processos de soldagem no estado líquido.

Os fatores metalúrgicos que devem ser considerados são:

- calor desenvolvido;
- atmosfera de proteção;
- elementos de adição;
- composição e geometria do metal base.



Figura 3.24

Foto de uma máquina para soldagem pelo processo MIG/MAG.

O tipo de gás de proteção pode alterar as quantidades de elementos do arame eletrodo que são transferidos ao metal base pelo arco elétrico. Isso afeta as propriedades mecânicas da solda. Uma transferência inadequada pode provocar porosidades, inclusões, fragilização etc.

Por essa razão, o gás de proteção e o arame eletrodo devem ser combinados de forma correta. Os gases de proteção normalmente usados em soldagem MAG são: dióxido de carbono (CO₂), misturas de CO₂ com argônio e misturas de argônio com oxigênio. Para soldagem MIG, o mais usado é o argônio puro.

O argônio, por ser um gás inerte, tem pouca influência sobre a transferência, enquanto os gases CO_2 e O_2 , por serem oxidantes, podem afetar grandemente essa transferência.

O gás CO_2 , pelo preço reduzido em relação ao argônio, é o mais usado no processo MAG. Na temperatura ambiente, é um gás totalmente inerte. Quando submetido às altas temperaturas do arco de soldagem, ele se dissocia em $2CO_2 - 2CO + O_2$.

Essa reação expõe o metal em função ao oxigênio livre, o que explica as propriedades oxidantes do CO₂ durante a soldagem.

O CO e O_2 podem combinar-se com os elementos do metal de adição, produzindo óxidos desses elementos, ou modificando o teor de carbono do depósito de solda.





Os arames eletrodos usados com atmosfera de CO_2 devem ser fabricados especialmente para esse fim. Em soldagem a arco manual com eletrodos revestidos, o gás CO_2 representa 80% a 85% dos gases desprendidos. Para compensar seu efeito oxidante, elementos como o silício, o manganês, o alumínio e o titânio são incluídos no revestimento dos eletrodos. A foto da figura 3.25 ilustra o processo de soldagem MAG.

Figura 3.25 Processo de soldagem MAG.



Esses elementos agem como desoxidantes, neutralizam o oxigênio e mantêm assim as características metalúrgicas da solda. Na soldagem MAG, esses mesmos elementos são usados, mas, em vez de incluídos no revestimento ao redor do eletrodo, fazem parte integrante do metal do arame eletrodo. Assim compreende-se a alta importância da combinação gás e arame para as propriedades mecânicas da solda. A atmosfera de CO₂ tem poder oxidante equivalente a uma mistura de 85% de argônio e 15% de oxigênio.

Se um arame para o gás CO_2 é, por exemplo, usado com uma mistura de 95% de argônio e 5% de oxigênio, o metal de solda pode apresentar fissuramentos a quente, em consequência do aumento de silício ou alumínio no metal base, pois não existia O_2 suficiente para reagir com esses metais.

Além disso, as características de resistência à tração, ao alongamento e à dureza ficam alteradas.

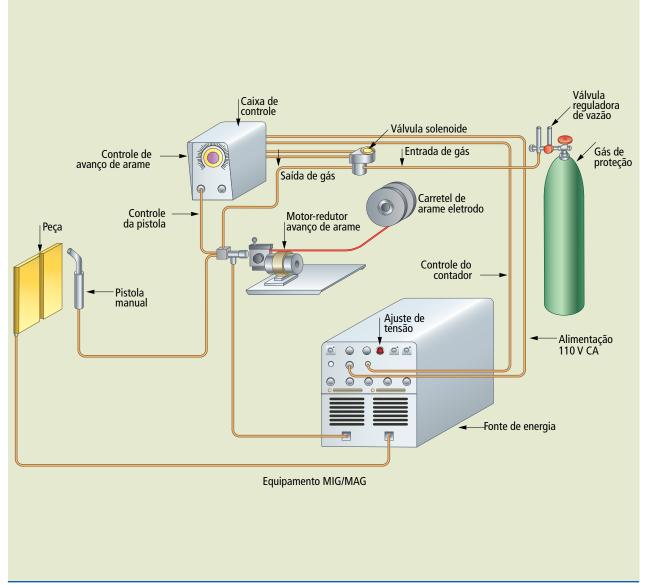
Equipamento

Os principais componentes do sistema de soldagem MIG/MAG são:

- máquina de soldar (fonte de energia);
- unidade de alimentação do arame eletrodo com seus controles (cabeçote);
- pistola de soldagem com seus cabos;
- gás protetor de seu sistema de alimentação;
- arame eletrodo.

A figura 3.26 mostra, de maneira simplificada, o esquema de um equipamento para soldagem MIG/MAG. Esse processo requer corrente contínua, cujo limite superior é de 250 A, para soldagem em todas as posições. A fonte de energia pode ser do tipo retificador ou gerador, com ciclo de trabalho de 100% e tensão de saída regulável até 40 V.

Figura 3.26Esquema de uma máquina de soldagem MIG/MAG.







O cabeçote leva o arame eletrodo desde seu carretel até o arco de soldagem através da pistola e de seus cabos. Inclui todos os sistemas de controle da velocidade do arame e da passagem do gás de proteção. Diferentes tipos de roldanas de tração podem ser montados rapidamente, de acordo com o diâmetro e o tipo de arame usado.

A pistola com seu conjunto de cabos é a ferramenta de soldagem propriamente dita e é com ela que o soldador controla o processo de soldagem. O bocal e as guias do arame eletrodo podem ser desmontados facilmente para trocas e limpeza. Existem diversos modelos de pistolas, de acordo com a corrente de soldagem e o tipo de serviço. Podem ser refrigeradas a água ou ar.

Para trabalhar sempre nas melhores condições, é importante conservar as pistolas limpas e em bom estado de funcionamento; os cabos devem ser limpos com jatos de ar cada vez que se troca a bobina de arame. Se isso não for feito, a sujeira pode acumular-se, dificultando a passagem do arame eletrodo.

O sistema de gás fornece e controla a vazão do gás de proteção do arco. É formado por um ou mais cilindros ou tanques de gás com regulador redutor de pressão, medidor de vazão e válvula solenoide de comando. É necessário que esses elementos sejam adaptados ao tipo de gás usado.

3.4.2 Variáveis de soldagem

Para conseguir resultados eficientes nos processos de solda, é importante conhecer as variáveis que podem ser ajustadas para controlar o procedimento.

As variáveis que podem ser reguladas e lidas facilmente são mais bem controladas do que aquelas que não podem ser controladas ou apenas modificadas por degraus. Sabendo disso, as variáveis no processo de soldagem podem ser divididas em três grupos: pré-selecionadas, que não permitem bom controle na solda; primárias, que controlam o processo após as variáveis pré-selecionadas terem sido escolhidas; e, por fim, as secundárias, que podem ser modificadas de modo contínuo.

Aplicações

A soldagem MIG/MAG é rápida, limpa (não deixa escória), e por isso ideal para produções em série. O CO₂ é barato e satisfatório para solda de aços-carbono.

Para soldar aço inoxidável, magnésio e alumínio são usados o argônio, o hélio e também algumas misturas com CO_2 e O_2 . Para o cobre e suas ligas, o nitrogênio dá muito bom resultado.

3.4.3 Soldagem MAG – avanço manual, passe simples

Solda de ângulo, plana

A figura 3.27 ilustra tipos de solda em ângulos e a tabela 3.7 mostra a relação entre a dimensão da solda e a espessura do material a ser soldado.

Figura 3.27Soldas em ângulo.

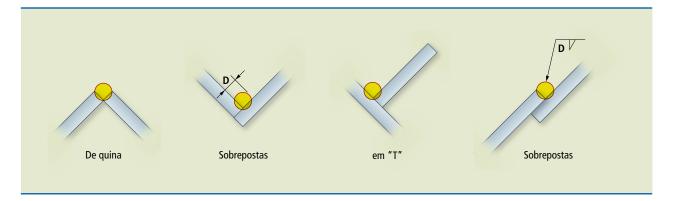


Tabela 3.7

Dimensão da solda		essura naterial	Nº de	Diâmetro Condições de º de do soldagem		Vazão de gás Litros pó/min		Velocidade	
(mm)	Nº mm		passes			o C.C.P.I. volts-amperes		co/h	de avanço mm/min
	24	0,64	1	0,8	15 – 17	30 – 50	7 – 9,5	15 – 20	380 a 510
	22	0,79	I	0,8	15 – 17	40 – 60	7 – 9,5	15 – 20	455 a 560
	20	0,95	1	0,9	15 – 17	65 – 85	7 – 9,5	15 – 20	890 a 1015
	18	1,27	1	0,9	17 – 19	80 – 100	7 – 9,5	15 – 20	890 a 1015
1,57	16	1,57	I	0,9	17 – 19	90 – 110	9,5 – 12	20 – 25	765 a 890
3,18	14	1,98	I	0,9	18 – 20	110 – 130	9,5 – 12	20 – 25	655 a 765
3,16	11	3,19	I	0,9	19 – 21	140 – 160	9,5 – 12	20 – 25	510 a 635
3,18*	11	3,18	I	1,2	20 – 23	180 – 200	9,5 – 12	20 – 25	685 a 815
4,76	7	4,76	I	1,2	20 – 23	180 – 200	9,5 – 12	20 – 25	355 a 480
4,76*	7	4,76	I	1,2	20 – 23	180 – 200	9,5 – 12	20 – 25	455 a 560
6,35	3	6,35	I	0,9	19 – 21	140 – 180	9,5 – 12	20 – 25	250 a 380
6,35*	3	6,35	I	1,2	20 – 23	180 – 200	9,5 – 12	20 – 25	305 a 455

N.B - Material aço-carbono

- I. Gás protetor CO₂ grau soldagem
- 2. Distância bico-peça* 6 mm a 10 mm (altura)
- 3.* Escolha alternativa do eletrodo





3.4.4 Processo TIG

A foto da figura 3.28 mostra uma máquina de solda para diferentes materiais utilizando os processos TIG (*tungsten inert gaz*) e MMA (soldagem a arco manual).

Figura 3.28Máquina de soldagem
TIG e MMA.



Trata-se de um processo de soldagem a arco elétrico, com proteção de fluxo gasoso, no qual o eletrodo, de tungstênio, não é consumido, e é adicionado arame de solda externamente, como na soldagem oxiacetilênica. O eletrodo de tungstênio na prática não sofre desgaste, sendo necessário apenas para estabelecer e manter o arco. Como o tungstênio pode suportar grandes intensidades de corrente, os pequenos diâmetros de eletrodos usados permitem obter uma fonte de calor extremamente concentrada, o que possibilita altas penetrações e grandes velocidades, com redução das deformações.

A solda obtida por esse processo é de alta qualidade. A proteção do metal fundido pelo argônio impede a ação do oxigênio e do nitrogênio do ar. No caso dos aços, o fato de usar um eletrodo de tungstênio que praticamente não se desgasta no curso da operação permite evitar qualquer aumento de teor de carbono. Isso é particularmente importante na soldagem de aços inoxidáveis.

A proteção é sempre feita com gases inertes (argônio ou hélio), pois o ${\rm CO_2}$ oxidaria o eletrodo de tungstênio interrompendo o arco. O arco obtido é estável e apresenta poucos respingos, o que torna a operação fácil para obter solda de ótimo aspecto. O esquema da figura 3.29 ilustra esse processo.

O cabeçote de solda pode ser refrigerado pelo próprio gás inerte (até 250 A) ou a água (até 500 A).

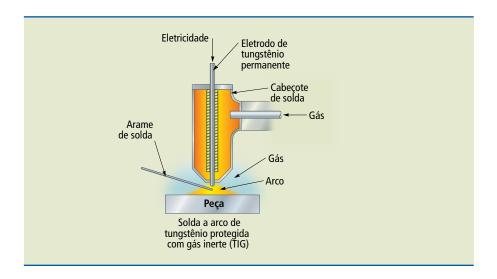


Figura 3.29
Processo TIG.

Fonte de energia

Dependendo do material a soldar, usa-se CC ou CA com alta frequência. Metais altamente oxidáveis, como o alumínio e o magnésio, só permitem a soldagem com CC na polaridade inversa (eletrodo + e peça –), pois só assim a camada de óxidos é removida da superfície da peça. Essa polaridade provoca alto aquecimento do eletrodo e não permite o uso de altas amperagens, que danificariam o eletrodo. Nesses casos, portanto, é mais recomendável CA, que rompe a camada de óxidos e permite maiores amperagens. A tabela 3.8 mostra o tipo de corrente e a polaridade em função do tipo de material.

Natureza do metal	Corrente	Comments	
a soldar	Polaridade inversa	Polaridade direta	Corrente alternada
Alumínio e ligas	3	4	I
Magnésio e ligas Espessura inferior a 3 mm	2	4	1
Magnésio e ligas Espessura superior a 3 mm	3	4	1
Aços inoxidáveis Espessura inferior a 0,7 mm	3	 	l" 3
Aços inoxidáveis Espessura superior a 0,7 mm	3	1	3
Aços doces ou de baixa liga	3	į	1""
Espessura até 1 mm Ferro fundido	3	i	3 3
Cobre, latão e bronze Níquel e ligas	3	I	۱""
Enchimentos			

Tabela 3.8Tipo de corrente e polaridade em função do tipo de material.

Significado dos números e aspas na tabela: I. meio de alimentação dando os melhores resultados; 2. meio de alimentação dando bons resultados; 3. meio de alimentação não recomendado; 4. solda impossível; "utilizar se o arco é estável em corrente contínua; "utilizar para trabalho em posição; "utilizar em certos casos: peças pequenas e mínimo de diluição no metal de base.





A tabela 3.9 indica o tipo de corrente e polaridade em função do diâmetro do eletrodo.

Tabela 3.9Tipo de corrente e polaridade em função do diâmetro do eletrodo.

Diâmetro	Corrente	Corrente	
do eletrodo em mm	Polaridade direta em amperes	Polaridade inversa em amperes	alternada em amperes
1	25 –70	15	15 – 50
1,6	60 – 150	10 – 20	40 – 110
2	100 – 200	15 – 25	70 – 140
3	200 – 350	25 – 40	140 – 200
4	350 – 520	40 – 60	200 – 275
5	520 - 800	60 – 85	260 – 365
6			320 – 500
7			380

Aplicações

O processo TIG é usado para soldagem de alumínio e suas ligas, e também para magnésio, cobre e suas ligas, níquel e suas ligas, titânio, aços inoxidáveis e aços-carbono.

É empregado para solda em todas as posições de chapas a partir de 0,5 mm, não sendo econômico para altas espessuras. Sua limitação é a baixa velocidade, se comparado com o processo MIG, por causa da alimentação externa de material.

3.5 Processo de solda automático ou semiautomático com proteção de fluxo granular do arame de solda e arco elétrico como fonte de calor

3.5.1 Soldagem com arco submerso

Trata-se de um processo em que a proteção ao eletrodo é dada por um fluxo granular que mantém o arco elétrico submerso. O eletrodo é o próprio arame de solda sendo alimentado como no processo MIG.

Como mostrado na figura 3.30, nas máquinas automáticas de soldagem com fluxo granular, o fluxo é conduzido ao local da soldagem por meio de um tubo e depositado em volta da área de solda, até mesmo sobre o arco, que é mantido submerso. O fluxo que não é fundido e transformado em escória pode ser reaproveitado, sendo recuperado por um aspirador que segue após o arame de solda. O arame de solda, por sua vez, é alimentado automaticamente e tem também a função de eletrodo.

O processo de ignição do arco é automático. Utiliza-se para sua abertura uma corrente de alta frequência, o que evita a necessidade do contato eletrodo e peça. Nesse processo, pode-se trabalhar com corrente contínua ou corrente alternada, embora a CA seja a mais usada, principalmente por problemas de custos.

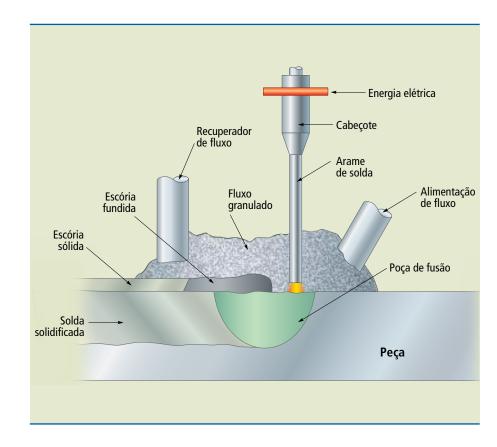


Figura 3.30
Processo de soldagem com arco submerso.

Aplicação

O processo TIG é indicado para a execução de costuras de topo em V e X, de costura em ângulos horizontais e de costuras circulares. Podem ser obtidas velocidades de soldagem superiores às de outros processos. A espessura mínima que se pode soldar é 3 mm, embora o processo se torne vantajoso apenas nas costuras compridas e com espessuras acima de 8 mm. Não há necessidade do uso de óculos especiais pelo soldador, pois o arco não é visível.

É utilizado para aços de baixo e médio conteúdo de carbono, alguns aços-liga e níquel e suas ligas.

Fluxo

Possui funções idênticas às do revestimento de eletrodos para arco manual. Contém vários elementos de adição, entre os quais ferro e desoxidantes como o silício, o alumínio e o manganês. A base do fluxo são ingredientes minerais. Para ser usado, o fluxo deve estar perfeitamente seco. A tabela 3.10 mostra parâmetros desse processo.





Tabela 3.10
Valores práticos
para soldagem com
arco submerso.

Forma da costura	Espessura da chapa	Tensão	Corrente	Velocidade de soldagem
	mm	٧	Α	mm/min
٧	5	36	575	840
٧	8	36	900	735
٧	10	37	1 000	685
٧	16	38	I 250	480
٧	22	40	I 500	255
٧	28	41	I 650	225
٧	32	41	I 700	205
٧	38	41	2000	150
٧	51	42	2900	125
٧	64	42	3 200	450
X	30	40	930	300
X	30	42	1 300	350
X	50	42	1 350	300
X	50	42	I 950	330

3.5.2 Processo de soldagem elétrica em banho de escória – processo electroslag

O processo electroslag é uma soldagem no sentido vertical ascendente, inicia como no processo de arco submerso e continua com uma etapa de aquecimento por resistência elétrica. No começo, o arco elétrico é aberto entre o eletrodo e uma chapa de fechamento feita de cobre. Esse arco é mantido submerso em um fluxo granular. Com o aquecimento provocado pelo arco, o eletrodo e o fluxo começam a fundir, mas são impedidos de escoar para fora da junta por duas chapas laterais, também feitas de cobre e refrigeradas a água.

No decorrer do processo, o arco elétrico acaba se apagando dentro do fluxo fundido e, nesse momento, o aquecimento para a fusão do eletrodo passa a ser por efeito Joule, por causa da alta resistência elétrica do fluxo fundido. As chapas de proteção de cobre continuam subindo e acompanhando a zona de solda para que não haja escoamento do metal líquido. O fluxo, por ter menor densidade, flutua no banho evitando o contato com o $\rm O_2$ do ar. O esquema da figura 3.31 ilustra essa técnica de solda.

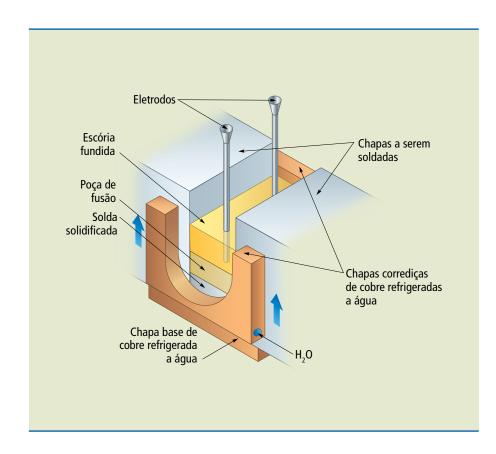


Figura 3.3 I Soldagem elétrica em banho de escória.

Aplicação

A capacidade de fusão do processo electroslag é muito elevada, principalmente por permitir trabalhar com vários eletrodos. É muito usado na indústria naval e soldas de enchimento em chapas grossas de aço-carbono, assim como aços de alta resistência. A tabela 3.11 mostra valores práticos utilizados nessa técnica de soldagem.

Espessura da chapa (mm)	Números de eletrodos	Tempo de solda (min)
50	I.	0,54
100	2	0,54
150	3	0,54
300	3	1,10
400	3	1,45

Tabela 3.11Valores práticos na soldagem elétrica com banho de escória.

3.6 Processo de soldagem por resistência elétrica

As soldas a ponto, por projeção e topo a topo, formam um grupo em que o calor necessário para o processo de união das peças é gerado por resistência elétrica,





MECÂNICA 5

através de um circuito de baixa voltagem e alta amperagem, que atua em um período de tempo relativamente curto. As peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de dois eletrodos não consumíveis; depois, faz-se passar uma alta corrente por eles, a qual, em consequência da resistência existente entre as peças, produz calor por efeito Joule:

$Q = KI^2R$

em que:

I = a corrente elétrica;

R = a resistência elétrica;

K = uma constante.

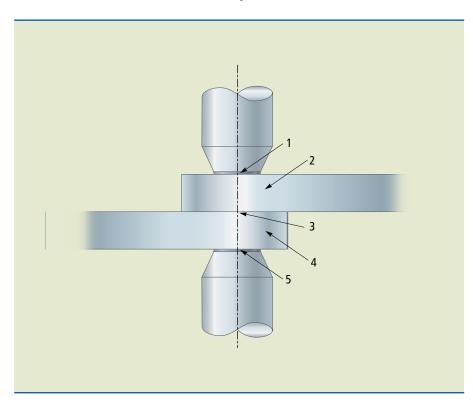
3.6.1 Variáveis do processo

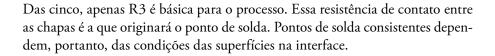
As três variáveis mais importantes do processo são: a resistência, a corrente e o tempo. Sob controle do operador, estão a pressão dada nos eletrodos, a corrente e o tempo.

Resistência

Quando os eletrodos comprimem as chapas a serem soldadas, a corrente elétrica atravessa cinco resistências diferentes (figura 3.32).

Figura 3.32Resistências envolvidas
no processo de solda
por pressão.





As resistências R1 e R5, provocadas pelo contato eletrodo-peça, devem ser minimizadas com uma boa limpeza das chapas e uma pressão adequada dos eletrodos, que devem ser ótimos condutores elétricos.

As resistências R2 e R4 dependem da resistividade e espessura das chapas, bem como da temperatura de trabalho.

Corrente e tempo

Os efeitos da corrente e do tempo podem ser considerados em conjunto, mas, embora ambos contribuam para a quantidade de calor desenvolvido, é apenas a corrente que determina o grau máximo de calor. Uma parte desse calor é perdida, principalmente na água de refrigeração dos eletrodos.

O tamanho a que o ponto vai chegar depende da velocidade de geração do calor, portanto, da corrente. O tamanho máximo conseguido é cerca de 10% maior que o diâmetro do eletrodo.

3.6.2 Ciclos de operação

O processo básico de soldagem por resistência apresenta um ciclo de operação composto de quatro estágios:

Compressão: é o tempo entre a primeira aplicação da pressão dos eletrodos e a primeira aplicação da corrente de solda.

Tempo de solda: é o tempo durante o qual a corrente de solda passa.

Tempo de fixação: é o tempo durante o qual a pressão dos eletrodos continua a ser aplicada, após a corrente ter sido interrompida.

Descompressão: é o tempo durante o qual os eletrodos não estão em contato com a peça.

Processo

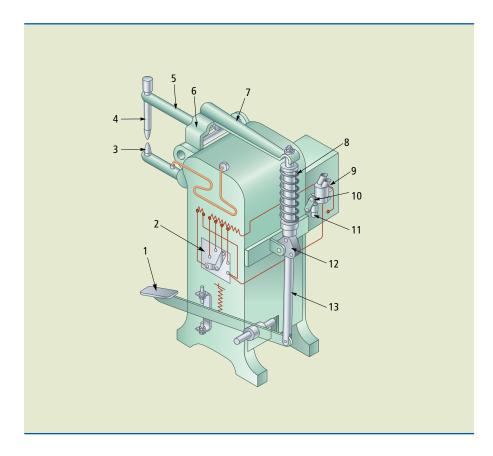
O processo de solda por resistência é automático e todas as variáveis devem ser prefixadas e mantidas constantes. Isso é necessário porque, uma vez iniciada a solda, não há nenhum modo de controlar seu progresso. Além disso, os testes não destrutivos são muito difíceis de realizar e não completamente satisfatórios. É costume estabelecer esquemas para testes destrutivos em algumas amostras e manter o controle das variáveis o melhor possível.

A figura 3.33 mostra o esquema básico de uma máquina de solda a ponto por resistência.





Figura 3.33
Esquema de uma máquina de solda a ponto por resistência.



Na figura:

- 1. pedal de acionamento;
- 2. "taps" para mudança da relação de transformação;
- 3. eletrodo inferior;
- 4. eletrodo superior;
- 5. braço móvel superior;
- 6. eixo de articulação;
- 7. alavanca de comando;
- 8. mola de pressão;
- 9. contato elétrico que liga o transformador para passagem de corrente nos eletrodos;
- 10. rolete de acionamento do contato;
- 11. excêntrico para acionamento do contato;
- 12. excêntrico;
- 13. alavanca.

A corrente de soldagem é estabelecida na máquina pela mudança de relação do transformador ("taps" de controle em controle eletrônico, como visto nas máquinas para soldagem a arco elétrico).

O controle de tempo das diversas etapas do processo pode ser mecânico, como mostrado na figura 3.34, ou por meio de *timers* eletrônicos, usados nas máquinas modernas.

3.6.3 Tipos de solda por resistência

A ponto

A solda a ponto é a mais conhecida dos processos de solda por resistência. Consiste em unir as chapas com pontos de solda formados no local onde são pressionados os eletrodos (figura 3.34).

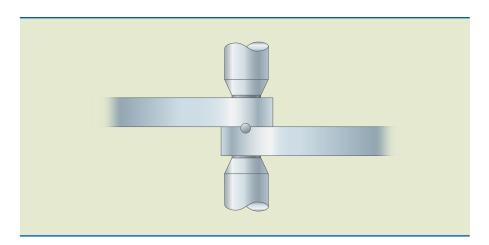


Figura 3.34 Solda a ponto.

Pelo processo de soldagem por pontos podem ser soldadas chapas de aço de até cerca de 2×6 mm, chapas de alumínio de até 2×3 mm e de cobre de até $2 \times 2,5$ mm. A espessura mínima que pode ser soldada praticamente não é limitada e depende da possibilidade de regulagem, do tempo de soldagem e da capacidade de soldagem da máquina em questão.

Por projeção

Nesse processo (ver esquema da figura 3.35), os pontos são predeterminados pelo puncionamento de uma das chapas. Assim, é obtida uma concentração maior de calor na zona de soldagem.

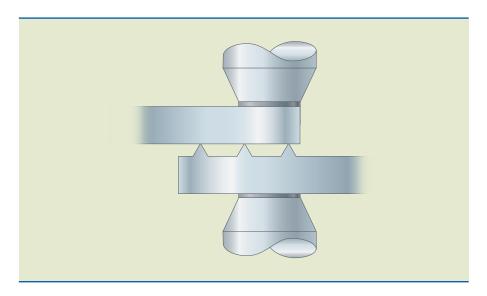


Figura 3.35Soldagem por projeção.





Por costura

Esse processo consiste em usar como eletrodos dois roletes que rolam sobre as chapas, fazendo uma solda de maneira contínua e não mais por pontos.

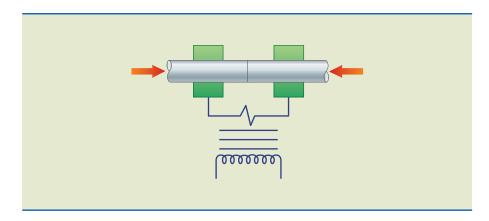
Nesse caso, em consequência do tempo de aplicação da força e pelo fato de ter um ciclo de operação abreviado (compressão, solda, fixação e descompressão), a espessura máxima das chapas a serem soldadas é inferior à da solda a ponto (cerca de 50%). A velocidade da solda por costura é de até 12 m/min.

Topo a topo

Por contato

As peças a unir são presas em mordentes, postas em contato, e faz-se passar uma corrente elétrica (figura 3.36).

Figura 3.36Solda por contato.



Por causa da resistência de contato, aparece na junta um aquecimento que aumenta até atingir a temperatura de soldagem. Em seguida, as peças são comprimidas firmemente uma contra a outra e assim efetua-se a junção.

Esse processo é apropriado para a soldagem de até 500 mm² de seção transversal, dos metais leves e do cobre. A pressão de soldagem é de 1,5 kgf/mm² para o aço doce e de 0,6 kgf/mm² para os metais leves. As seções transversais a soldar devem ser iguais. A resistência mecânica da junta é da ordem de 80% da resistência do metal soldado.

Por faiscamento (arco elétrico)

A soldagem de topo com arco baseia-se no mesmo princípio, porém, é mais versátil, podendo ser soldadas seções transversais bem maiores (até 50 000 mm²), obtendo-se, além disso, resultados melhores.

Nesse tipo de soldagem, as peças entram inicialmente em contato. O circuito elétrico é fechado e, em seguida, as peças são afastadas ligeiramente. O arco elétrico que se forma funde as partes salientes. Ao desligar a corrente elétrica, os morden-

tes são comprimidos repentinamente um contra o outro, ocorrendo a soldagem. A resistência mecânica da união soldada equivale à original.

Por esse processo podem ser soldados os aços-carbono, quase todos os aços-liga, o aço fundido e o ferro fundido maleável branco. O processo é empregado para soldar o aço redondo, perfilado e em chapas.

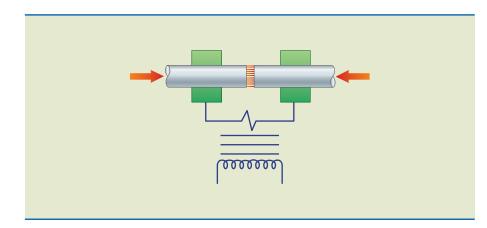


Figura 3.37Solda por arco elétrico.

Soldagem a resistência com alta frequência

No processo de soldagem topo a topo, por contato, o calor gerado vem da resistência interfacial de contato, como em uma solda a ponto comum. Mas, se aumentarmos a frequência de oscilação da corrente para cerca de 450 Kc/s e elevarmos a tensão, teremos um novo processo, conhecido por solda a resistência com alta frequência. Esse tipo de solda usa o chamado efeito de superfície, que estabelece que a corrente tende a se concentrar na superfície à medida que a frequência aumenta.

Em virtude da concentração de calor ser exatamente na região desejada, consegue-se um excepcional rendimento. Usando unidades de potência de 60 kW e trabalhando na confecção de tubos com costura de paredes de 1 mm, podemos atingir velocidades da ordem de 100 m/min. Além de tubos, vigas T e cantoneiras também podem ser soldadas por esse processo.







ajustagem é o processo de adaptar de maneira adequada elementos e órgãos de uma máquina uns aos outros; por exemplo, assentar peças de um mecanismo. Acontece em processos de montagem e desmontagem de conjuntos e subconjuntos de elementos mecânicos, seja na fabricação seja no reparo por manutenção. Também são atividades de ajustagem os trabalhos manuais de traçagem, serramento e outras, nos departamentos de ferramentaria e de manutenção.

Os ajustes adicionais na montagem de mecanismos recebem o nome de "retrabalhos", pois nesse caso é realizada uma atividade não designada para que o mecanismo fique perfeitamente funcional. Algumas razões que podem causar o retrabalho:

- a atribuição de tolerâncias dimensionais e geométricas (de forma e posição) inadequadas ou a falta delas;
- erros de projeto ou de etapas de fabricação do(s) componente(s);
- cotagem nos desenhos de projetos sem uso de superfície de referência, ou falta de cotas funcionais nos componentes de conjuntos.

Os ajustes podem ser necessários por uma soma de erros. Nas atividades de ajustagem são utilizadas limas diversas, traçadores, esquadros, escalas (réguas), serras, plainas limadoras, rasquetes, brocas, machos, furadeiras e outros.

4.1 Instrumentos de medição utilizados na ajustagem

É importante saber identificar, entender e manusear corretamente os instrumentos para executar as medições com precisão. Para realizá-las e assegurar maior durabilidade, devem ser seguidos os cuidados específicos de manuseio e de conservação que cada um deles requer. Versões digitais de instrumentos facilitam a medição.

4.1.1 Escala

A escala é utilizada para verificar grandezas lineares e para traçar linhas diversas no plano como réguas comuns. São fabricadas em aço e geralmente gravadas de 0,5 em 0,5 mm para as versões em milímetros. Sua graduação inicial (zero) coin-

cide com a face lateral, por isso deve-se ficar atento com a tomada de referência, que é essa face lateral. Por vezes inicia-se a leitura pela marcação 10 mm, por exemplo, para referência de abertura de um compasso para traçagem (figura 4.1).

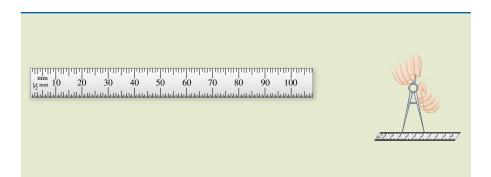


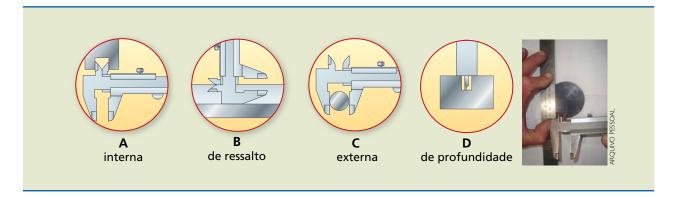
Figura 4.1
Vista de parte de uma escala em milímetros.

4.1.2 Paquímetro universal quadrimensional

Esse tipo de paquímetro é usado para medições internas (por exemplo, o diâmetro de um furo), externas (o diâmetro de uma broca) e de profundidades (por exemplo, a profundidade de um furo não passante). Existem diversos modelos de paquímetro em faixas de grandeza de medição e classes de precisão, com leituras em milímetro e polegada no mesmo instrumento.

Esses paquímetros possuem um nônio para efetuar medições mais precisas do que as feitas com escalas, com diversas resoluções em frações de milímetro e polegada. Nunca devem ser usados como riscadores em traçagens nem como bases ou apoios para os riscadores em traçagens. A figura 4.2 ilustra várias medições feitas com esse instrumento.

Figura 4.2 Medição quadrimensional com paquímetro.



4.1.3 Micrômetro

O micrômetro é utilizado, em geral, para medições com maior precisão do que as realizadas com o paquímetro. Modelos de micrômetro em faixas de grandeza de medição e classes de precisão permitem leituras apenas em milímetros ou apenas em polegadas, ou em ambas. Existem modelos com nônio para resoluções de 0,001 mm e frações de polegada. As versões digitais facilitam a obtenção de leituras. Na figura 4.3 são ilustrados tipos de micrômetros e aplicações.





Figura 4.3

Figura 4.4

tradicional;

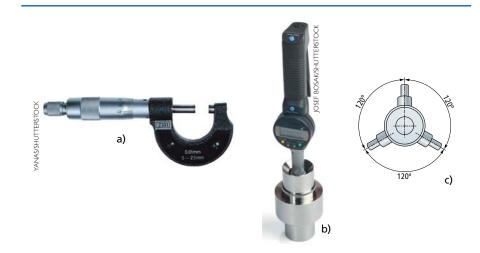
a) Relógio comparador

b) exemplos de aplicação

e c) base magnética com

haste de três articulações.

a) Vista geral de um micrômetro para medição externa; b) medição de profundidade em um rebaixo de uma peça; c) micrômetro interno de três pontas e detalhe das pontas, para medir furos precisos.

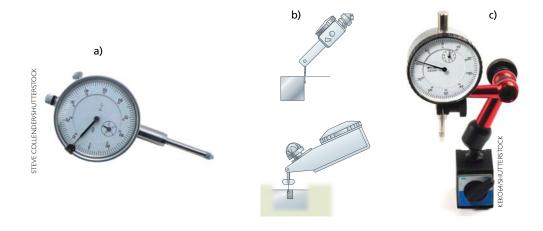


4.1.4 Relógios comparadores, relógios apalpadores e base magnética

Os relógios são mecanismos constituídos por engrenagens de precisão acionadas pela pressão exercida em sua haste de contato. São úteis para verificar a centragem de elementos em rotação, alinhamento e planicidade, entre muitas outras aplicações, e possibilitam economizar tempo em ajustes e medição. Existem versões com resolução de 0,01 e de 0,001 mm e devem ser manuseados com cuidado.

alguns relógios e suas aplicações.

Os relógios apalpadores possuem hastes reclináveis apoiadas em microrrolamentos e engrenagens temperadas, apoiadas em mancais de rubi. A figura 4.4 mostra



Os relógios comparadores e apalpadores em geral são fixados em uma haste articulada montada em uma base magnética. A base magnética se acopla a superfícies de aço ou ferro por um botão ou chave que ativa e desativa a ação magnética. Existe um entalhe em V ou um alívio na face de contato que auxilia na adaptação da base magnética em diferentes superfícies.

A haste articulada possibilita realizar o ajuste universal tanto nos planos vertical como horizontal. O apalpador pode, ainda, ser usado em calibradores traçadores de altura, para realizar medições.

4.1.5 Calibrador traçador de altura

Esse tipo de calibrador é um instrumento com uma base, haste retangular com escala fixa graduada na vertical, normalmente em milímetros, na qual se desloca um cursor, com funcionamento que lembra o paquímetro.

A base do calibrador traçador de altura é de aço-carbono temperado e retificado, para garantir maior precisão e resistir ao desgaste provocado pelo deslizamento em mesas de desempeno de ferro fundido ou de granito. Existem versões digitais, com saída de dados para periféricos, aumentando a versatilidade de aplicação e uso.

Principais aplicações desse instrumento:

- traçagem de peças que podem facilitar operações posteriores de fabricação;
- controle dimensional com auxílio de relógio apalpador e acessórios, por exemplo, para medir profundidade de furos.

4.1.6 Transferidor

É utilizado para a medição (figura 4.5), verificação e traçado de ângulos. É formado por uma haste, um arco graduado em graus e uma porca de travamento para fixar a haste em qualquer ângulo. Na haste existe o traço de referência para medição. Com a haste na perpendicular à borda da régua, o traço de referência coincide com a gravação de 90° do disco.



Figura 4.5 Transferidor.





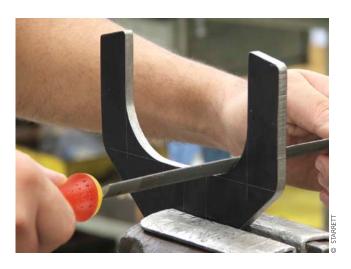
> Com o posicionamento da régua e haste no ângulo desejado, podemos traçar a inclinação angular com o uso de um riscador. O valor angular da inclinação pode ser medido fazendo contato da face da régua e da haste do transferidor com duas superfícies não paralelas de uma peça. Algumas versões são conhecidas como goniômetro, que podem incluir graduação para frações de graus e uma pequena lente de aumento para maior precisão de leitura. Para facilidade e precisão de medição de faces angulares, pode ser usado o projetor de perfil.

4.2 Limagem

É um processo de usinagem que visa obter superfícies planas ou curvas, com ou sem concordância, com o uso da ferramenta chamada lima. Essa ferramenta é utlizada em movimento contínuo ou alternativo na peça, que fica presa, em geral, em morsas.

Os movimentos da lima são feitos com os braços. Uma das mãos segura o cabo da lima, enquanto a outra apoia a lima contra o material. No movimento de ida, aplica-se pressão na lima para remover o material. Na volta é feito o recuo sem pressão da lima no material. A figura 4.6 ilustra a posição típica de limagem com a peça presa em morsa na bancada. O serramento manual é similar.

Figura 4.6 Processo de limagem.



Nas indústrias e nas escolas, colocam-se cabos de madeira. Opcionalmente, adquire-se a lima com cabo plástico. A figura 4.7 mostra as partes principais de uma lima e, na figura 4.8, podemos observar uma lima de aço-carbono com cabo plástico à prova de choques.

Figura 4.7 Desenho de lima e descrição de suas partes.

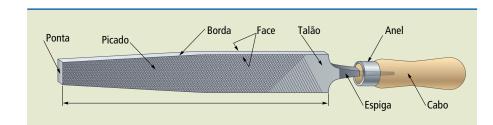




Figura 4.8 Lima de aço-carbono com cabo plástico à prova de choques, com emborrachamento

texturizado.

4.2.1 Escolha da lima

A escolha da lima ideal para o trabalho visa atingir o formato da peça com tolerância dimensional e geométrica exigidas e a qualidade de rugosidade da superfície. O quadro da Tabela 4.1 mostra a relação entre peças e limas a serem usadas. A seleção pelo tipo, tamanho, material e formato da lima é baseada:

- na dureza e na geometria da peça a ser trabalhada (se é um canto ou entalhe);
- no tamanho, precisão e acabamento da superfície;
- na quantidade de material a ser retirado.

Acabamento superficial

Escolhe-se entre as limas bastarda e murça, segundo a intensidade dos sulcos nas faces:

- **bastarda** para desbastes, superfícies sem exigência de acabamento;
- murça para acabamento mais refinado (sulcos menos profundos nas faces da lima).

Relação entre peças e limas						
Peças	Limas					
I. Natureza do material a ser trabalhado	Picado da lima	Simples – aço macio Cruzado – aço duro Curvo – aço macio e aço duro Tipo grossa – alumínio				
2. Grau de rugosidade da superficie (tipo de acabamento)	Graus de corte	Bastarda Murça				
3. Pefil da superficie (desenho)	Tipos	Quadriculares Triangulares Circunferenciais				
4. Linha de ação (L) de trabalho	Comprimento da lima (C) C = ± 3L					

Tabela 4.1 Relação entre peças e limas a serem utilizadas.





Dureza e formato do material que se usina

- limas vitrificadas utilizadas na remoção de pequenas imperfeições;
- **limas diamantadas** indicadas para todos os tipos de arredondamentos de cantos vivos em ferramentas de metal duro;
- limas de aço-carbono são feitas de aço com médio ou alto teor de carbono. Podem ser:
- agulhas em perfis variados, como chata paralela, triangular, quadrada, meia-cana, redonda para serviços leves e de precisão;
- mecânicas as mais usadas em escolas, com tamanhos e picados para cada trabalho específico. Após o uso, esse tipo requer cuidados de limpeza com escovas de aço, seguindo a direção dos sulcos (picadas).

Os tipos usuais de limas mecânicas e suas aplicações são:

• **lima meia-cana** (figura 4.9) – utilizada para limagem de materiais diversos em superfícies perfiladas (côncavas, convexas ou sem forma) e planas. A ponta é afilada na direção da largura;

Figura 4.9 Lima meia-cana .



• **lima redonda** (figura 4.10) – utilizada para limagem em ajuste e aberturas circulares ou superfícies perfiladas. É levemente afilada na ponta, com perfil circular.

Figura 4.10 Lima redonda.





• **lima quadrada** (figura 4.11) – usada para limagem de ranhuras quadradas ou superfícies planas em geral. Possui quatro faces com picado duplo e extremidade ligeiramente afilada.

Figura 4.11 Lima quadrada.



• **lima mecânica triangular** (figura 4.12) – usada na limagem de superfícies planas internas com ângulo igual ou maior que 60°. Existe versão para afiação de serrotes.

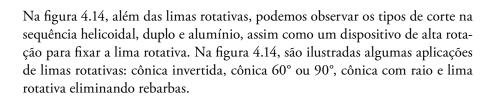


Figura 4.12
Lima mecânica triangular.

Existem ainda as **limas rotativas** (figura 4.13), fabricadas de metal duro e usadas em dispositivos de alta rotação, por acionamento elétrico ou pneumático. Sua aplicação típica é em acabamentos finais de faces e arestas ou para remoção de rebarbas em peças que já passaram por tratamento térmico. Possuem corte helicoidal simples para maiores remoções, duplo para pequenas remoções, e "alumínio" para não ferrosos e não metálicos.



Figura 4.13 Limas rotativas.



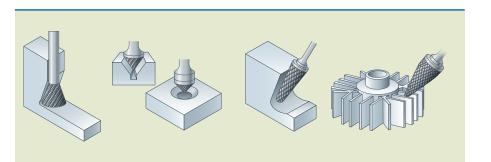


Figura 4.14 Aplicações das limas rotativas.





4.2.2 Acabamento com baixa rugosidade

Utiliza-se a pasta de diamante, que atinge valores próximos de 0,05 e 0,025 Ra, especialmente para dar acabamento fino nas aplicações em que existe a especificação de superfícies com baixa rugosidade ou baixíssima remoção de material.

Outra operação destinada a produzir superfície plana com baixa rugosidade em atividades de ajustagem é o rasqueteamento. Nele, com uma ferramenta chamada rasquete, o operador ajusta guias de máquinas que fazem contato mecânico de deslizamento linear nos carros das máquinas. A superfície gerada proporciona maior área de contato das faces e melhor lubrificação, de modo que muitas vezes é o processo escolhido no lugar da retificação. Essa característica de maior contato define maior rigidez mecânica, porém com menor velocidade, se compararmos com as máquinas atuais que utilizam guias lineares para deslocamento dos carros.

4.3 Serramento

Serramento é a operação que visa dividir ou seccionar uma peça em mais partes ou, ainda, separar partes não necessárias de material para chegar ao formato final requerido. São usadas ferramentas chamadas serras em equipamentos manuais ou de acionamento eletromecânico.

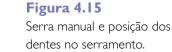
Pode ser contínuo ou circular e, ainda, adaptado para recortes. Utilizam-se serras de fita vertical e horizontal em serramento contínuo ou circular, e a serra tico-tico em recortes. Como o serramento não é uma operação de precisão, em geral são feitas operações posteriores para melhor acabamento da face.

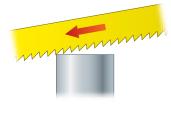
4.3.1 Serramento manual

A lâmina de serra é fixada no arco de serra por meio de uma porca tipo borboleta (figura 4.15). As lâminas são classificadas pela quantidade de dentes por polegadas, que orientam sua seleção para uso. Ao serrar, o cabo deve ser empurrado de maneira semelhante à da lima, com movimento de pressão na ida e pouca pressão na volta. Uma das mãos segura o cabo e a outra se apoia na curvatura frontal do arco. Deve-se tomar cuidado com acidentes, pois a lâmina de serra, ao dobrar durante o uso, pode quebrar. Algumas versões de lâminas bimetálicas podem ser dobradas em qualquer ângulo sem quebrar.

O serramento manual quase sempre ocorre após a traçagem. Antes de serrar, devemos verificar se as pontas dos dentes da lâmina de serra estão voltadas para a frente, em sentido oposto ao cabo (ver a figura 4.15), se a lâmina está suficientemente tensa, e também se a colocação da lâmina está no plano do arco de serra. Na figura é ilustrado como a posição da porca tipo borboleta pode mudar em função do modelo de serra.







4.4 Traçagem

É uma operação feita para marcar linhas sobre a superfície de uma peça e indicar os limites de corte e desbaste ou o centro de furos. É anterior ao serramento, à furação e a algumas outras operações de usinagem, como o fresamento de base de máquinas. A traçagem pode ser realizada no plano ou no espaço.

- Traçagem no plano (figura 4.16) é o traçado de linhas sobre uma superfície plana.
- Traçagem no espaço (figura 4.17) é o traçado nas três dimensões da peça, com o uso de calibrador traçador de alturas ou graminho.









no plano e ajustagem: 1) blank de geometria circular e produto

Figura 4.16

Exercício típico de traçagem

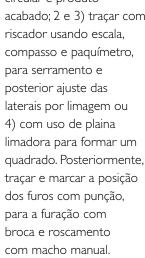
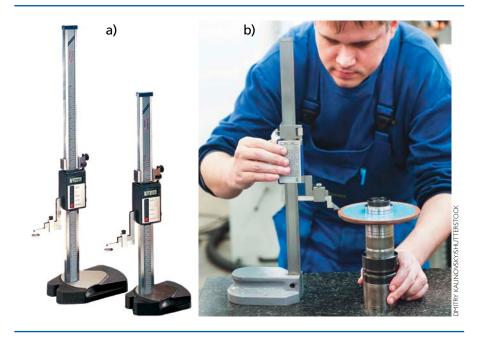






Figura 4.17

a) Vista geral de calibrador traçador de altura digital;b) exemplo de manuseio típico do instrumento.



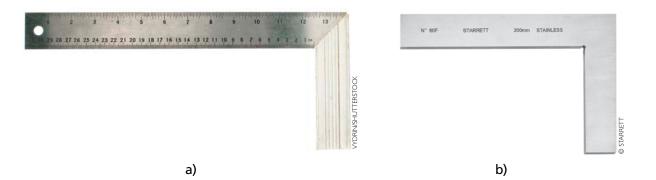
4.4.1 Outros acessórios e ferramentas para traçagem

- **Tinta para traçagem** normalmente em tonalidade azul opaca. Visa eliminar reflexos e destacar o traçado em uma superfície. É solúvel em água ou álcool.
- **Riscador** após aplicar a tinta, é deslizado com pressão sobre uma superfície de material mais macio, para riscar ou traçar uma linha.

Quando a operação ocorre no plano ou com uso de graminhos, o riscador é uma haste de aço cilíndrica com ponta aguda soldada de metal duro, ou apenas endurecida. Nos traçadores de altura, é um acessório de ponta aguda de metal duro com formato prismático.

• **Esquadro** (figura 4.18) – é um instrumento para verificar e traçar faces perpendiculares (90°). Existem vários tipos de esquadro, de acordo com a finalidade e o grau de precisão.

Figura 4.18
a) Esquadro com
lâmina graduada;
b) esquadro de precisão
maciço de aço inoxidável.



• Mesa de desempeno (figura 4.19) — plana, de granito ou de ferro fundido retificado. É usada para traçagem, inspeções e verificações de planos ou de retas paralelas. Sobre o desempeno desliza-se o graminho ou o calibrador traçador de altura, tomando o cuidado para que a superfície da mesa esteja lisa e limpa. Após o uso, somente o desempeno de ferro fundido deve receber uma ligeira camada de óleo, para evitar corrosão.



Figura 4.19Mesa de desempeno.

• Compasso divisor — é um instrumento com duas pernas sustentadas por uma mola em arco, usado para riscar e traçar, ou auxiliar na verificação e medição. As pernas, de pontas finas e duras, precisam estar no mesmo comprimento e na direção vertical em relação à superfície a riscar. Uma porca é utilizada para fazer ajustes rápidos e travar as pernas. Ajusta-se a medida de abertura para traçar a partir de uma escala.

Existem compassos de diferentes formatos (figura 4.20). Nos compassos de verificação, utiliza-se o paquímetro para ajuste da abertura.

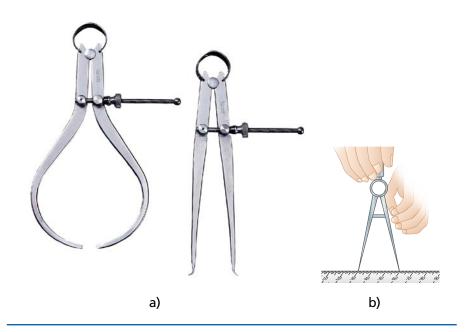


Figura 4.20

- a) Compassos para verificação externa e interna;
- b) ajuste das pernas em compasso para traçar.





4.5 Atividades da tecnologia de furação em ajustagem

A furação propriamente dita é uma operação de usinagem para fazer furos em um material qualquer, com auxílio de uma ferramenta chamada broca. A furação pode ser um processo único de obtenção de um furo, ou preliminar aos processos de rebaixamento, alargamento e roscamento com macho.

O furo com broca costuma ser feito impondo a ela um movimento de rotação e de avanço linear paralelo a seu eixo, em máquinas chamadas furadeiras. A broca é fixada com auxílio de acessórios, geralmente em mandris universais. É comum os furos serem feitos após traçagem e marcação prévia da posição com um punção. Dependendo do diâmetro da broca, é conveniente efetuar a usinagem de um furo de guia com uma broca de centro, após a marcação do furo com punção.

Alguns cuidados devem ser tomados na execução do processo:

- a seleção da furadeira adequada, levando-se em conta a posição do furo, o tamanho da peça e da broca;
- a definição da afiação da broca, considerando-se o material que a constitui e o material da peça;
- os acessórios necessários para a fixação da peça e da broca.

O uso de equipamento de proteção individual (EPI) é importante, pois, ao executar o processo, são liberados pedaços de material na forma de cavacos, que podem atingir os olhos do operador.

Ao executar operações posteriores à obtenção do furo, deve-se tomar cuidado para que a centragem dessas operações coincida com a furação inicial.

Para chanfrar as bordas dos furos, utiliza-se o escareador.

Na aplicação, por exemplo, de acomodar a cabeça de parafusos, o rebaixamento do furo é feito com rebaixadores ou fresa topo.

O alargamento visa obter uma dimensão mais precisa do diâmetro do furo e melhor acabamento superficial, para montar um pino cônico ou cilíndrico em conjuntos e subconjuntos mecânicos. É feito com o alargador cilíndrico ou cônico, aplicado manualmente ou com o auxílio de máquinas.

O roscamento com macho em geral é realizado com o uso de um jogo de macho manual, preso em um acessório denominado desandador para machos ou utilizam-se suportes articulados para facilitar o trabalho do operador.

No alargamento e no roscamento, é obrigatório realizar a correta seleção do diâmetro da broca em função do diâmetro do alargador ou da medida nominal do macho. No alargamento, procura-se deixar uma quantidade mínima de sobremetal entre a furação com broca e a operação com alargador.

Para o roscamento, e algumas vezes para o alargamento, existem tabelas de furos preliminares para roscar ou para alargar, que são editadas e distribuídas por fabricantes de brocas, alargadores e de ferramentas para roscar.

A furação pode ser feita com uma das seguintes furadeiras:

- portátil usada em locais de difícil acesso;
- de bancada máquina de pequenas dimensões e capacidade do motor. O avanço da broca é manual;
- **coluna** (figura 4.21) a mesa em que a peça é fixada pode ser posicionada linear e angularmente. O avanço da broca é semiautomático;
- radial utilizada para furar peças de grandes dimensões. É versátil por furar em diversos pontos sem deslocar a peça. A broca é posicionada no ponto necessário de furação, traçado ou guiado por dispositivo tipo máscara, em movimento linear e de translação por um braço que se articula girando sobre uma coluna. A peça mantém-se presa e imóvel;



Figura 4.21
Furadeira de coluna.

de coordenadas ou fresadoras ferramenteiras – o posicionamento da broca
pode ser feito com maior precisão. A peça se desloca linearmente na mesa, que
possui um anel graduado ou visores digitais de coordenadas. Também é possível realizar pequenos fresamentos, por exemplo, abrir rasgos com fresas de topo.

4.5.1 Broca

É a ferramenta para furar. Possui haste para fixação, aresta de corte com ângulo de ponta, corpo principal com guia externa e ranhuras em canais helicoidais para a saída de cavaco. É fabricada, em geral, de aço rápido. Em regime de produção, empregam-se brocas de metal duro, que oferecem maior resistência ao desgaste, e aplica-se uma camada externa de revestimento, como o nitreto de titânio, caracterizado pela coloração amarelada das brocas, o que aumenta ainda mais sua resistência ao desgaste.





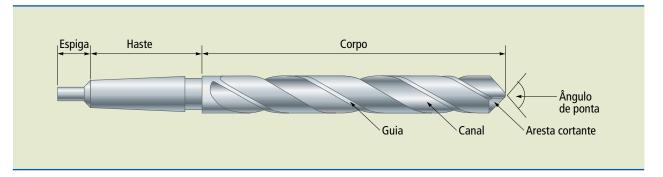


Figura 4.22 Partes de uma broca.

A figura 4.22 ilustra a estrutura de uma broca. O ângulo de ponta forma as arestas de corte, com geometria afiada, de acordo com o tipo de material que será furado. Para trabalhos comuns, o ângulo da ponta deve ter 118° para brocas de aço rápido, e 140° para brocas de metal duro. A guia serve de suporte quando a broca tiver penetrado no material, enquanto os canais expulsam os cavacos para fora do furo. Muitas vezes, dependendo da profundidade do furo, são feitos movimentos de retirada da broca do furo antes de atingir a profundidade final, para que sejam removidos por completo os cavacos nos canais helicoidais.

A interrupção do avanço de usinagem visa impedir a saída de cavacos longos, pois quebra o cavaco. Isso é útil especialmente em materiais que produzem cavacos longos como aços e alumínio, para prevenir acidentes.

A haste da broca pode ser cilíndrica ou cônica e é usada para fixar a broca na máquina com auxílio de acessórios (mandril, bucha, suporte padrão). A rotação ideal para o corte é calculada pela equação:

$$N = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

em que:

N = velocidade de rotação (revoluções por minuto (rpm));

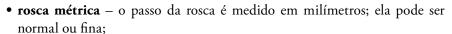
 V_C = velocidade de corte, em metros por minuto (m/min);

D = diâmetro da broca, em mm.

A seleção da velocidade de corte é feita com o auxílio de tabelas oferecidas pelos fabricantes das brocas, e depende, basicamente, do material da peça e do material da broca.

4.6 Roscamento

É a formação de saliências de perfis e dimensões padronizados em superfícies cilíndricas, com a intenção de proporcionar fixação removível ou realizar movimento. Os filetes são produzidos por fresas, ferramentas de torno, machos, cossinetes. Os principais sistemas de rosca de perfil triangular são:



• rosca em polegadas – são roscas Whitworth e outras, em classes fina e grossa (normal). O passo da rosca é medido em número de fios por polegada (fios /1").

A verificação do passo da rosca pode ser feita com o pente (ou canivete) de rosca (figura 4.23).

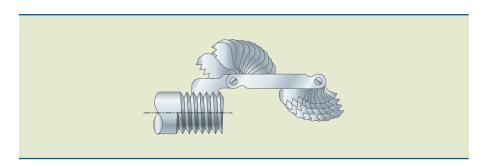


Figura 4.23
Verificação do passo
da rosca com o uso
de pente de rosca.

4.6.1 Ferramentas e tipos de roscamento em ajustagem

Machos manuais

São ferramentas de corte construídas de aço temperado específico e destinadas a gerar rosca interna. O perfil externo é fabricado de acordo com o formato e passo da rosca a serem obtidos. A haste cilíndrica possui extremidade quadrada para ser fixada no desandador para machos. A figura 4.24 ilustra um jogo de machos manuais.



Figura 4.24
Jogo de machos manuais.





Os canais servem para alojamento e quebra dos cavacos durante o roscamento, e a ponta cônica é útil para permitir a entrada no furo e iniciar o roscamento, além de auxiliar na identificação do macho no jogo. Os machos vêm comumente em jogos de três peças:

- macho desbastador reconhecido pelo nº 1, com um entalhe circular na haste. A extremidade roscada é significativamente cônica, com filetes achatados;
- macho intermediário é o de nº 2, com dois entalhes circulares na haste.
 A extremidade cônica é menor do que a do macho nº 1, com poucos filetes achatados;
- macho acabador é o de nº 3, sem identificação na haste. Tem cerca de dois filetes achatados, e o restante do corpo possui vértice agudo na medida final de execução da rosca.

Cossinetes

São ferramentas de corte construídas com aço temperado específico e empregadas para gerar rosca externa, utilizadas manualmente ou em máquinas operatrizes. Existem dois tipos: com e sem entrada helicoidal:

- **cossinetes com entrada helicoidal** utilizados amplamente para materiais que produzem cavacos longos, em operações com tornos automáticos;
- **cossinetes sem entrada helicoidal** são universais, empregados manualmente ou em tornos para roscar materiais que produzem cavacos curtos e quebradiços.

Desandador

É um dispositivo fabricado com aço comum para acoplar os machos ou cossinetes no roscamento manual. O operador age com as mãos, sujeitando as hastes para produzir o movimento de rotação, fazer a penetração do macho no furo ou promover o avanço do cossinete no eixo a roscar. A peça fica estática e o macho ou o cossinete giram pela alavanca produzida pelo desandador. A figura 4.25 mostra dois modelos de desandador.

Figura 4.25
a) Desandador para cossinete em uso;
b) Desandador para macho em uso.



a)



Capítulo 5 Usinagem – máquinas e operações





fabricação é uma atividade que visa obter produtos ao mesmo tempo úteis e rentáveis. Envolve interações entre materiais, máquinas, mão de obra, método, entre outros, que se iniciam em um projeto e na produção de componentes montados em um produto final. Os sistemas de produção são definidos pelo tipo e pelos detalhes do processo utilizado e pela maneira como é organizada a produção. Um esquema dessa organização é mostrado na figura 5.1.

Figura 5.1 Fluxograma de um sistema de produção.



5.1 Processos de transformação por usinagem → manufatura

Na transformação por usinagem, muitas vezes ocorre grande mudança no formato da matéria-prima, enquanto em outras são feitas operações com pouca mudança. É importante saber quais serão os recursos transformados, a maneira de agir, e como serão a definição e a organização do fluxo de processo.

Os processos de fabricação em áreas afins são chamados segmentos, por exemplo:

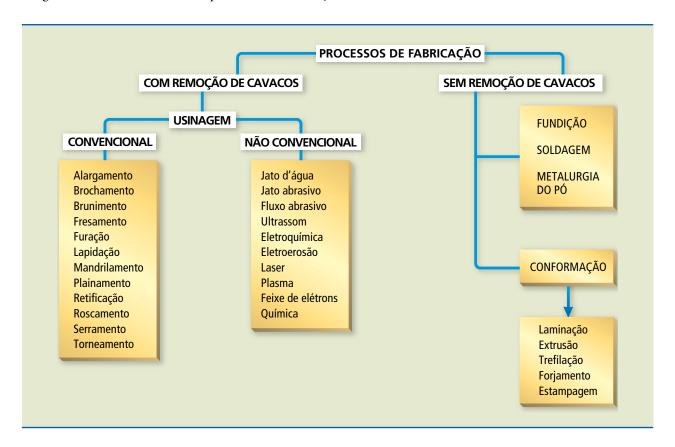
- a indústria metal-mecânica, em que o aço e suas ligas são a matéria-prima principal de fabricação, além de ligas de ferro fundido, alumínio e cobre, movimentando a indústria de equipamentos siderúrgicos, de máquinas, de matrizes etc.;
- a **indústria de plásticos**, que fabrica utensílios domésticos, embalagens e peças técnicas como a carcaça dos telefones celulares e os para-choques de

veículos, movimentando a indústria de máquinas, de equipamentos hidráulicos, de moldes etc.;

Outros tipos de indústrias são destacados nessa segmentação, como a agroindústria, a indústria de energia, de componentes ortopédicos, aeroespacial, farmacêutica etc. Todos esses segmentos concentram conhecimento e vivências específicas.

5.2 Tipos de processos de fabricação

A figura 5.2 mostra os diferentes processos de fabricação.



Para saber que tipo de transformação a indústria de usinagem realiza, é preciso avaliar o custo/benefício em função do fluxo de produção:

- em regime de produção contínua (em linha ou produção em massa) predominam a transformação de fundidos e forjados;
- em produção intermitente (por lotes ou por encomenda) ou produção em grandes projetos (sem repetição), ocorrem os fundidos, mas predominam os laminados.

Em todos os casos, os fatores de decisão são o custo e a qualidade da matéria-prima, que deve estar em consonância com o projeto do produto.

Os processos de obtenção da matéria-prima metálica em geral não garantem os formatos necessários nas peças, como rebaixos, saliências, furos calibrados

Figura 5.2 Processos de fabricação.





Figura 5.3

Exemplos de peças feitas com alumínio injetado em automóveis que passam por operações de usinagem após a fundição. ou roscados etc. Apresentam superfícies grosseiras e de tolerâncias muito "abertas" para que um componente possa ser montado com funcionalidade e intercambiabilidade, características cada vez mais exigidas na mecânica. Esses processos primários precisam das operações de usinagem para atender às necessidades de montagem e funcionalidade (ver exemplo da figura 5.3).



5.3 Conceito e importância da usinagem

Operações de usinagem são aquelas em que, ao conferirem à peça a forma, o acabamento, as dimensões, ou ainda a combinação deles, produzem cavaco (FERRA-RESI, 1977). A usinagem é o processo de fabricação mais empregado no mundo. Como exemplos da importância da usinagem para a sociedade, podem ser citados:

- as engrenagens para transmissão, que são quase todas usinadas;
- a maioria dos componentes da indústria aeroespacial é usinada;
- todos os pinos odontológicos e a maioria dos ortopédicos são usinados.

A usinagem depende das variáveis: máquinas operatrizes, ferramentas e acessórios. A seleção dessas variáveis é muito importante, pois existe grande oferta de tipos, formas e tamanhos para diferentes trabalhos. A escolha correta possibilita a execução do trabalho, cumpre os procedimentos destacados nas folhas de processo ou de operações, atende às definições diversas até mesmo de segurança industrial, ganha tempo e reduz desperdícios.

Como exemplo de escolha ou de seleção de processo de usinagem, utilizamos a tabela 5.1, com valores de rugosidade que se podem obter com diversos processos de fabricação. Para uma necessidade de rugosidade de 0,2 Ra que exija escolha da retificação, em geral ocorrem: a geração da matéria-prima, a preparação para início de usinagem, as etapas iniciais de usinagem (prevalecendo o torneamento), aplicação de tratamentos térmicos e, finalmente, o uso do processo de retífica.

Também devem ser considerados fatores de tolerâncias dimensionais e o fator geométrico na escolha do processo de usinagem. Quanto maior a exigência, maior é a necessidade de processos mais precisos e de grande controle, que em consequência são mais caros.

Historicamente, o desenvolvimento dos processos de usinagem começou com a transformação e execução dos movimentos lineares e de rotação. A combinação entre esses movimentos permitiu a realização de trabalhos com maior precisão e

menor esforço. À medida que novos desenvolvimentos aconteceram, máquinas mais sofisticadas e processos modernos viabilizaram operações que não eram conseguidas, em formato e tolerâncias, com a rugosidade desejada.

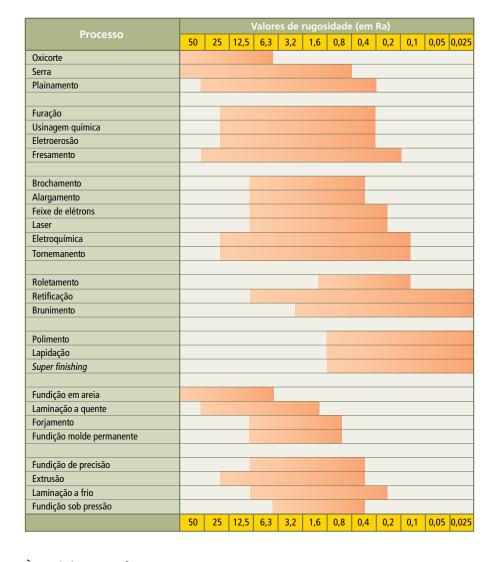


Tabela 5. I
Valores de rugosidade
para vários processos
de fabricação

À medida que as ferramentas e as máquinas tornam-se mais precisas e versáteis, alteram-se as condições de projeto das peças, com base no que as máquinas podem realizar quando se procura a melhoria de precisão e durabilidade dos componentes de mecanismos. A tabela 5.2 mostra o tipo de usinagem em função da precisão a ser atingida.

	Precisão atingível				
Usinagem	até ano 1980	de 1980 até ano 2000			
Normal	5 μm	Iμm			
de precisão	0,5 μm	0,1 µm			
de ultraprecisão	0,05 μm	0,01 µm			

Tabela 5.2Tipo de usinagem em função da precisão a ser atingida





5.4 Processos e qualidade na usinagem

Utiliza-se máquina-ferramenta para usinar componentes com qualidade de tolerâncias dimensional, geométrica e de rugosidade. Mesmo indiretamente, como no caso de peças produzidas por processos de conformação ou injeção, a qualidade resultante é uma função dos processos de usinagem utilizados na obtenção dos moldes. A qualidade de uma máquina-ferramenta está associada a seus sistemas, ao uso a que é destinada, aos esforços mecânicos e térmicos a que se submete, à forma como afeta o meio ambiente e às precisões e acabamento estipulados para a peça.

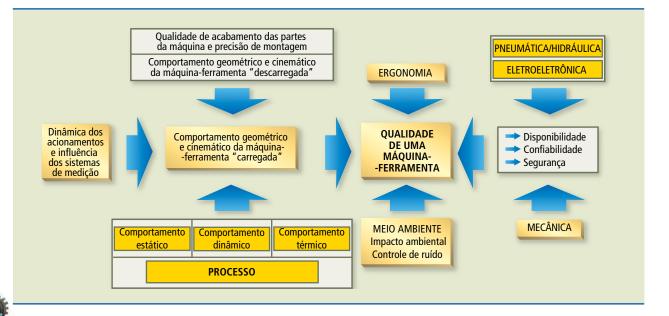
A máquina é o item de maior custo na usinagem, incluindo os operadores. Porém, mesmo a melhor das máquinas pode apresentar resultados de usinagem não satisfatórios, quando, por exemplo:

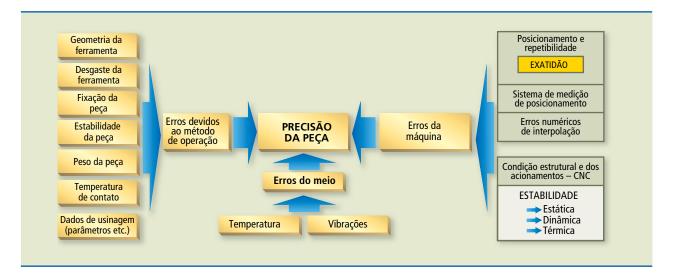
- não é instalada corretamente fundação ineficiente, falta de estabilização da energia elétrica;
- não se utiliza a correta fixação da peça e das ferramentas de corte.

Com apoio nas figuras 5.4 e 5.5, podem ser resumidos os fatores mais importantes dos processos de usinagem, visando a melhor precisão da peça usinada:

- máquina-ferramenta estrutura, estabilidade, tamanho, componentes e precisão;
- fixação da peça e da ferramenta;
- peça a ser usinada tipo de material, geometria e tolerâncias;
- ferramenta de corte material da ferramenta, formato/geometria, estabilidade:
- segurança do operador e questões de ordem ambiental tolerâncias apertadas de peças sujeitas à dilatação térmica requerem ambiente controlado;
- sistemas de controle e medição é preciso consonância dos instrumentos e métodos com os requisitos de projeto e processo.

Figura 5.4 Influência da qualidade da máquina-ferramenta.





Os processos de usinagem são empregados para transformar as superfícies de peças metálicas em geral, visando atingir os requisitos de formato, dimensões, tolerâncias e rugosidades. Existem processos diversos de usinagem. Os processos convencionais de usinagem são as operações de retificar, brunir, lapidar, tornear, fresar, furar, alargar, brochar, mandrilar, plainar, roscar, serrar. As operações mais frequentes são representadas nas figuras 5.6 e 5.7:

Figura 5.5Precisão da peça.

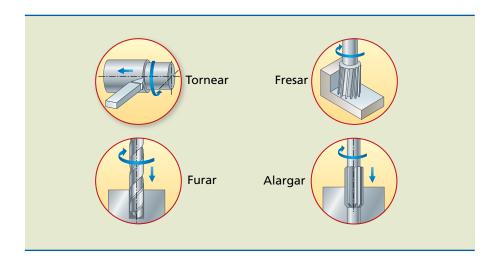


Figura 5.6Operações de torneamento, fresamento, furação e alargamento.

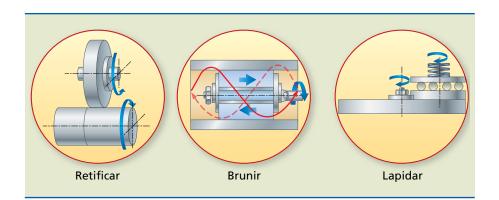


Figura 5.7Operações de retificar, brunir e lapidar.



5.4.1 Tendências no desenvolvimento de máquinasferramenta

Entre as principais tendências no desenvolvimento de máquinas-ferramenta para usinagem, temos os conceitos de máximos avanços com grande precisão (até mesmo em termos de nanotecnologia) e de máxima flexibilidade.

A manufatura em pequena escala (no nível nano) está limitada pela falta de estabilidade dos parâmetros dos materiais. Em usinagem com CNC (comando numérico computadorizado), verifica-se atualmente que os componentes eletrônicos estão possibilitando o nanoposicionamento, existindo limitação na parte mecânica. É o caso das novas máquinas para usinagem de moldes. Em algumas versões, é possível visualizar as coordenadas dos eixos em 0,0001 mm de posicionamento; as máquinas possuem controles térmicos e compensação de posicionamento baseada em fórmulas térmicas.

Capítulo 6

Usinagem:
parâmetros,
fluidos de corte,
cavacos e
ferramentas



a indústria, os conhecimentos e competências de metrologia, usinagem, desenho mecânico, segurança industrial e outros são praticados com interdisciplinaridade. O termo "usinagem" faz parte de uma gama universal, em que toda operação tem por característica dois objetivos relacionados com a funcionalidade e condição de trabalho a que será sujeita a peça:

- obter **forma e dimensão** dentro dos limites de tolerâncias dimensionais e geométricas do projeto;
- realizar na superfície um **grau de rugosidade** (acabamento superficial).

A figura 6.1 mostra alguns exemplos de peças obtidas por usinagem.

Figura 6.1 Peças obtidas por usinagem.



Uma peça usinada é, muitas vezes, um subproduto do que o consumidor final recebe. Os processos de usinagem predominam nos produtos industrializados, direta ou indiretamente. Por exemplo, para produzir este material impresso foram necessárias máquinas, montadas por peças que eventualmente foram usinadas, ou usaram moldes e ferramentas diversas para serem produzidas e receberam operações de usinagem.

O processamento de usinagem passa por etapas chamadas fases de processo. Por exemplo, em processo de usinagem mostrado na figura 6.2, para produzir peças com um pedaço de material laminado, pode-se usinar diretamente nele ou recorrer ao forjamento (colocando-se um pedaço de material laminado em uma matriz para gerar um perfil). A avaliação custo/benefício é o que determinará o melhor fornecimento de matéria-prima antes da usinagem. As etapas de fabricação são descritas e seguidas na folha de processos ou de operações.



Figura 6.2Processo de usinagem.

Em uma visão generalista, a administração dos parâmetros, ferramentas e fluidos de corte, assim como o controle dos cavacos, oscila desde totalmente exigente e cuidadosa na maioria das empresas, até de forma nem tanto exigente em outras.

A avaliação criteriosa do custo/benefício na adoção dos insumos em usinagem é mais evidente nas empresas que adotam produção contínua em massa. Já em uma empresa que trabalhe fabricando lotes com poucas peças, o lote de produção poderá encerrar antes que o operador saiba se a ferramenta é melhor ou pior do que outra que usou anteriormente naquela mesma atividade. Teria de acompanhar a quantidade de serviços que cada uma realizou até atingir o fim da vida útil, atividade possível se utilizados os modernos equipamentos CNC, porém de difícil execução e organização. Na empresa que administra e executa com base em folha de processo e operações, é determinante sempre empregar os tipos de ferramentas, parâmetros e acessórios que estão inseridos, pois houve, previamente, uma avaliação minuciosa de custo/benefício visando a economia e a produtividade.

Por causa da competitividade, as empresas precisam se adaptar às constantes buscas de redução nos custos e de aumento da produtividade. Ao adotarmos máquinas mais econômicas e identificarmos o intervalo mais eficiente dos parâmetros de corte, sem prejuízo na qualidade, obtemos maior produtividade nas

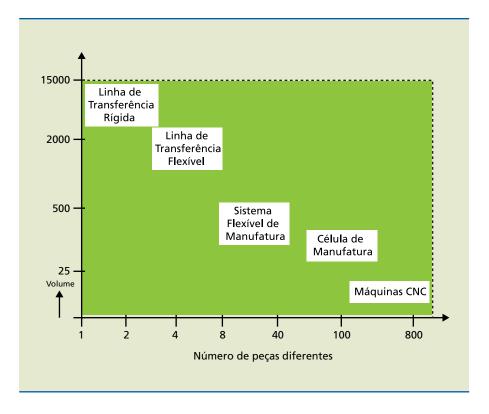




usinagens. Os melhores parâmetros e o melhor método permitem menor tempo de uso das máquinas. O fator máquina é o maior custo na usinagem, e o custo é definido na equação: custos da máquina = custo hora (R\$) multiplicado pelo tempo necessário para usinagem (min).

Os processos de transformação precisaram adaptar-se à redução de estoques, seja de material e insumos antes da transformação, seja de produtos acabados após a transformação. A administração da produção modificou a forma de produzir, deixando de fazê-la pela previsão de venda para, então, produzir pela demanda solicitada pelos clientes. Basicamente é a entrega da quantidade certa na hora certa e combinada, definida em contrato e ajustada dia a dia, de acordo com o volume de produção do cliente. Trabalha-se com a mínima quantidade de estoque, com a maior flexibilidade possível, redução do tempo de preparação (setup) entre as mudanças de um lote de produção para outro, fabricação em lotes de quantidade mínima de peças, sem deixar de atender a entrega necessária solicitada pelo cliente. O ambiente de produção organiza-se em células e sistemas flexíveis de manufatura, com envolvimento maior das tecnologias CAD/CAM/CNC, das folhas de processo e operações e outras metodologias.

Figura 6.3
Relação entre quantidade
de peças por lote
(volume) e número de
peças/lotes diferentes.



Verifica-se que os equipamentos controlados por comando numérico computadorizado (CNC) são cada vez mais aplicados na usinagem em pequenas, médias e grandes empresas, pois possibilitam flexibilidade e melhor adaptação aos sistemas de produção. Alguns tipos de produtos ainda justificam a existência de sistemas rígidos de produção, pela complexidade e/ou altíssimo volume de produção em baixíssima variedade de peças.

No gráfico da figura 6.3 é mostrada a abrangência geral da forma de produção, relacionando a quantidade de peças por lote (volume) com o número de peças/lotes diferentes. Aplica-se a máquina CNC desde lotes unitários e diversificados até lotes de volumes maiores e pequeno número de peças diferentes.

Ao longo do tempo, o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas leva à evolução das máquinas; outras vezes, as máquinas levam à evolução de novas ferramentas (materiais e geometrias). O avanço na engenharia de materiais tem provocado uma evolução mais rápida e contínua das ferramentas de corte para usinagem, tanto no desenvolvimento de materiais novos quanto no aperfeiçoamento dos materiais e geometrias existentes.

As novas geometrias e a possibilidade de novas camadas superficiais de revestimentos (chamadas cobertura da ferramenta) permitem melhorar o desempenho das ferramentas. As novas geometrias são desenvolvidas por sistemas computadorizados (CAD e outros) e métodos numéricos, simulando o desempenho das ferramentas pela análise dos esforços térmicos e mecânicos, antes mesmo de serem testadas e utilizadas na prática.

Os recursos de projeto e simulação computadorizados também são usados na fabricação das máquinas. Criam-se bases de máquinas mais leves, mais rígidas e estáveis, máquinas com melhor escoamento dos cavacos, árvores de máquinas para maiores rotações para atender o aumento da velocidade de corte dos diversos tipos de ferramentas. A eletroeletrônica é grande aliada da mecânica no desenvolvimento das máquinas-ferramenta da atualidade, dando origem à mecatrônica.

6.1 A importância e a formação do cavaco

Usinagem é considerada uma técnica empírica, na qual se inicia o processo que busca o acerto baseado em experiências anteriores e dados diversos, para depois, se necessário, corrigir os parâmetros e procedimentos.

Cavaco é a "porção de material da peça retirada pela ferramenta" (FERRARESI, 1977) para que ocorra a usinagem. Possui forma geométrica regular ou irregular. Na usinagem, é necessário ocorrer um movimento favorável ao corte entre um material e uma ferramenta mais dura do que esse material e com geometria adequada ao corte.

Por analogia, ao descascar uma laranja ou maçã com o uso de uma faca, o movimento giratório da fruta (peça), realizado pelas mãos (máquina), contra a aresta de corte afiada e mais dura da faca (ferramenta) retira a casca (cavaco). Se a faca girar em sentido contrário ao corte, ou não tiver aresta devidamente preparada para o corte e não for mais dura, a operação de retirar a casca da fruta será difícil ou impossível de ser executada.

As operações de torneamento, furação e fresamento são as de maior ocorrência industrial entre todos os processos de usinagem convencionais. Com base no estudo





da matéria-prima e do cavaco gerado nesses processos de usinagem, a aplicação é aperfeiçoada e se define como e quando utilizar os parâmetros e os fluidos de corte.

As ferramentas de usinagem são constituídas de arestas cortantes para remover cavacos. São selecionadas conforme a aplicação, sobretudo pela usinabilidade do material da peça.

Usinabilidade é a propriedade dos materiais que possibilita a remoção de cavacos com mais ou menos facilidade, seja pela dificuldade de controle de cavaco, seja pela durabilidade da ferramenta, pela conservação da geometria ou pela precisão e acabamento superficial da peça usinada.

Existem materiais cuja usinagem só é possível ou viável com a aplicação adequada do material e da geometria da ferramenta de corte e, ainda, nas condições (parâmetros) corretas, incluindo o uso ou não de fluidos de corte.

A experiência anterior e o conhecimento são importantes para o sucesso da usinagem. Por exemplo, a usinagem do alumínio requer ferramentas de corte com arestas extremamente positivas e com face de saída do cavaco polida, em vez de receber coberturas.

Tabela 6.1Propriedades e usinabilidade do material.

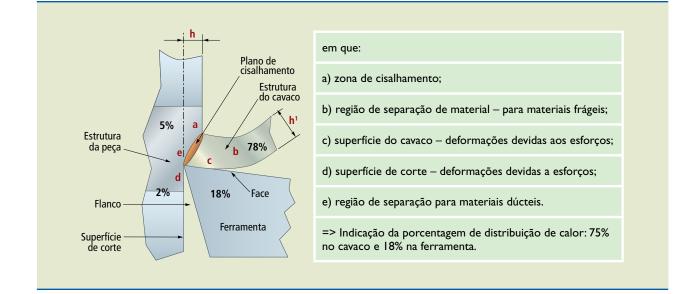
Propriedade	Problema	Menor vida da ferramenta	Alto esforço de usinagem	Altas temperaturas de usinagem	Acabamento superficial ruim	Baixo controle de cavacos
Dureza	Alta	×	X			
Resistência mecânica	Alta	×	X	X		
Encruamento	Grande	×		X	×	X
Condutividade térmica	Baixa	×			×	
Ductibilidade	Grande				×	X
Afinidade química	Grande				X	×

Analisando as propriedades dos materiais e os problemas que ocorrem na usinagem, identificamos na tabela 6.1, por exemplo, que o baixo controle dos cavacos tem origem na ocorrência de grande encruamento, alta ductibilidade e alta afinidade química entre o material e a ferramenta. Nos meios produtivos, sabe-se que materiais tenazes tendem a formar cavacos longos, e a afinidade química tende a formar arestas postiças.

Como mostra ainda a tabela 6.1, a menor vida da ferramenta ocorre pela alta dureza do material, alta resistência mecânica (o material tende a maiores esforços e temperaturas de usinagem), o maior encruamento e a menor condutividade térmica.

O **encruamento** é o endurecimento por deformação plástica. Ele modifica a estrutura dos metais. A deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização causa o endurecimento do metal. Quando uma peça é usinada em torneamento com vários passes de desbaste, cada passe causa aumento da dureza por encruamento, comprometendo a vida da ferramenta de corte. A figura 6.4 ilustra o contato da ferramenta com a peça e a retirada do cavaco.

Figura 6.4Contato da ferramenta com a peça.



Fases definidoras dos tipos de cavaco

No contato da ferramenta com o material, sob determinados valores dos parâmetros de profundidade de corte, avanço e velocidade de corte, ocorrem as fases que definem os tipos de cavaco:

- o recalque do material da peça contra a face da ferramenta;
- a deformação plástica que aumenta até o valor da tensão atingir a tensão limite de cisalhamento, iniciando o deslizamento do material recalcado segundo os planos de cisalhamento;
- a ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo também da ductibilidade do material;
- o escorregamento de material deformado e cisalhado sobre a face da ferramenta.

Fonte: Projeto de máquinas-ferramentas. UFSC, www.lmp.ufsc.br.

Os cavacos longos ou contínuos são considerados indesejáveis, dificultam o manuseio e a armazenagem, causam risco de acidentes ao operador, obstruem e travam o transportador de cavacos causando paradas de máquina ou até quebras. Podem enrolar e causar danos na ferramenta, bem como refugos, e prejudicam a tolerância e o acabamento superficial da peça. Procura-se formar

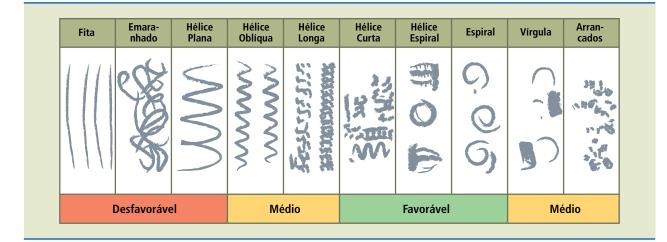




MECÂNICA 5

Figura 6.5 Tipos de cavacos.

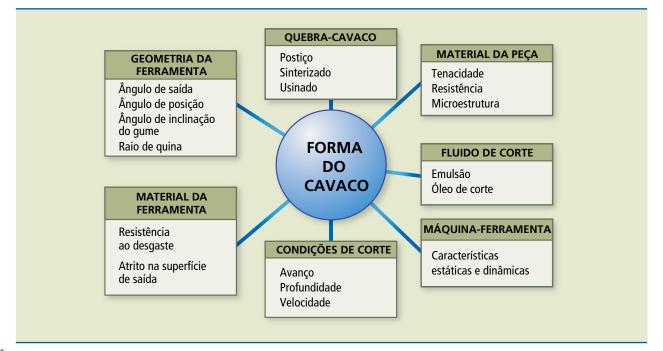
cavacos favoráveis, do tipo hélice espiral, que ocupam pouco volume, não obstruem o local de trabalho e são removidos facilmente. A figura 6.5 mostra os tipos de cavacos.



6.2 Influências que definem o tipo e a forma do cavaco

Com a melhor avaliação e aplicação dos parâmetros e da **geometria de corte da ferramenta**, busca-se um processo mais contínuo. A seleção e alteração do método e de parâmetros de corte podem reduzir o tamanho dos cavacos. O aumento do **avanço** (f) e a redução da velocidade de corte (V_C) são alternativas para produzir cavacos curtos, mas precisam ser avaliados o raio da ferramenta, a rugosidade, o tempo de usinagem e a durabilidade da ferramenta. A figura 6.6 mostra os fatores que influenciam a forma do cavaco.

Fatores que influenciam a forma do cavaco.



As medidas da **profundidade de corte (ap)**, principalmente nas operações de torneamento, precisam ser maiores do que a distância da ponta da ferramenta ao quebra-cavaco (é o desenho na face de saída da ferramenta, figura 6.7), para garantir a passagem do cavaco nessa região da ferramenta criada para reduzir seu tamanho. As pastilhas possuem quebra-cavacos específicos para as operações de desbaste, semiacabamento e acabamento.

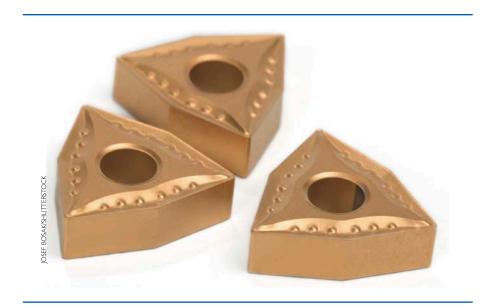


Figura 6.7
Pastilhas com quebra-cavaco.

Na figura 6.8, o gráfico profundidade de corte (ap) *versus* avanço (f) mostra o efeito desses parâmetros no tipo de cavaco. Maiores avanços e/ou maiores profundidades de corte tendem a resultar em cavacos mais curtos e maior potência de corte. O aumento do avanço, assim como o da profundidade de corte devem ser avaliados, visando a uma potência de corte menor do que a potência disponível no motor da máquina utilizada para a usinagem.

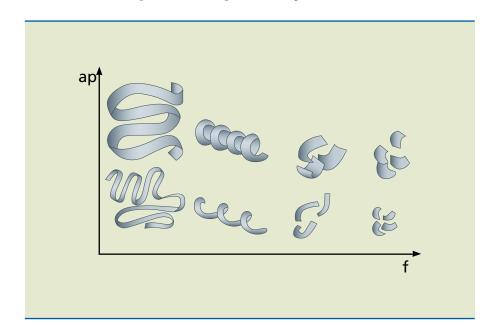


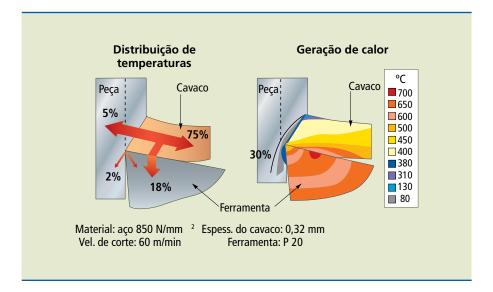
Figura 6.8Influência da profundidade de corte e do avanço no tipo de cavaco.





No momento do corte do material, o impacto e o atrito da ferramenta geram calor. A figura 6.9 é apenas um exemplo da geração e distribuição de calor no momento do corte, pois esses valores dependem do tipo de material da peça, do tipo e material da ferramenta, das condições de corte e geometria do cavaco. Basicamente, se os cavacos tiverem o menor contato possível na face de saída da ferramenta, ou se existir excelente refrigeração, é transmitido menos calor para a ferramenta, o que aumenta sua durabilidade.

Figura 6.9Geração e distribuição de calor durante o corte.



6.3 Fluidos de corte

Fluidos de corte são os líquidos (podem ser também gases) aplicados na região de corte, para facilitar ou até viabilizar a operação, quando as condições de usinagem são desfavoráveis. Definem-se como **lubrificantes** ou **refrigerantes** porque reduzem o **atrito** entre a ferramenta e o material, diminuem a **temperatura** na região de corte, **controlam** os cavacos e até auxiliam sua remoção, por exemplo, em operações de torneamento interno (figura 6.10). O uso de fluidos de corte possibilita diminuir o calor gerado na aresta de corte, prolongar a vida da ferramenta, manter o controle dos cavacos e a precisão da peça usinada.

No final do século XIX, já se usava água como refrigerante na região de corte, com o benefício de aumento da velocidade de corte, redução dos tempos de usinagem sem grande prejuízo para a vida das ferramentas, mas esse procedimento corroía as peças. Atualmente, utilizam-se fluidos sintéticos e minerais misturados com água, na proporção média de 5%, ou óleos integrais, dependendo da aplicação. Nos fluidos em geral são colocados aditivos.

A escolha correta dos fluidos de corte, assim como sua aplicação possibilitam muitas **vantagens**, como a diminuição dos custos operacionais e melhora da qualidade do acabamento superficial das peças e da produtividade. Precisam ser manipulados e tratados corretamente, para deixarem de ser **nocivos** à saúde dos usuários e ao meio ambiente.



Figura 6.10
Uso de fluido no processo de torneamento interno.

Os fluidos de corte precisam ter "propriedades e características anticorrosivas, antiespumantes, antioxidantes e de lavagem; compatibilidade com o meio ambiente; alta capacidade de umectação; boas propriedades antidesgaste e antissolda ou EP; estabilidade durante a estocagem e o uso; ausência de odor forte e/ou desagradável; ausência de precipitados sólidos e outros de efeito negativo; viscosidade adequada e transparência, se possível". (Fonte: www.cimm.com.br)

"Os custos com refrigerantes atingem perto de 16% dos custos de usinagem. Destes, 40% são custos de estoque, 22% são custos de descarte, 24% são custos operacionais e de compra, 7% são custos de manutenção." (Fonte: MITSUBISHI CARBIDE, 2007.)

6.3.1 Classificação dos fluidos de corte

Os tipos principais de fluidos de corte são os solúveis (as **emulsões** e as **soluções**) e os **óleos integrais**.

- Emulsões os fluidos semissintéticos são formadores de emulsões e apresentam menor concentração de óleo na emulsão. Essa característica aumenta a vida do fluido, diminui os riscos à saúde e torna o óleo indicado para altas velocidades.
- **Soluções** os óleos solúveis são compostos de óleo mineral e grande quantidade de aditivos. Ao se misturar com a água, a solução torna-se translúcida. É usado principalmente em retificadoras e centros de usinagem.
- Óleos integrais são constituídos basicamente de óleos graxos e óleos minerais, que podem ser usados puros, misturados ou com aditivos (ver figura 6.11).





Com aditivos ativos: – para altas pressões e temperaturas, para reagir quimicamente com a superfície nascente do cavaco, melhorar condições de atrito (cisalhamento).

Com outros aditivos (inativos): – óleos minerais puros, óleos graxos, compostos de óleo mineral e óleos graxos puros, aditivos antifricção, anticorrosão, antioxidante.

Figura 6.11
Exemplo de emprego
de óleo integral em
fresamento de engrenagem.



Na tabela 6.2, uma comparação entre propriedades dos fluidos de corte como orientação de aplicação e uso revela, por exemplo, que, quanto ao poder refrigerante, as soluções são mais aplicadas do que os óleos; porém, quanto ao poder lubrificante, os óleos são mais indicados.

Tabela 6.2
Emprego de soluções,
emulsões e óleos em
função das propriedades
do fluido de corte

Propriedades do fluido de corte	Soluções	Emulsões	Óleos
Poder lubrificante	Baixo	Intermediário	Alto
Poder refrigerante	Alto	Intermediário	Baixo
Velocidade de corte (V _C) empregada	Alta	Alta	Baixa
Admite aditivo EP	Sim	Sim	Sim
Suscetível à infecção bacteriana*	Não	Sim	Sim
Propriedades anticorrosivas**	Fracas	Fracas	Boas

^{*} A manutenção do fluido e uso correto de bactericidas amenizam o problema.

Os fluidos de corte são modificados com **aditivos** – compostos químicos que melhoram as propriedades dos fluidos ou lhes atribuem novas características. Os aditivos mais usados são: de extrema pressão (EP), antiferrugem, antisséptico e antiespuma.

Óleos com aditivos de extrema pressão (EP) são compostos de enxofre, cloro ou fósforo, que reagem em altas temperaturas (200 a 1000 °C), gerando uma película contra a formação do gume postiço na ferramenta de corte.

6.3.2 Formas de aplicação dos fluidos de corte

O conjunto de fotos e desenhos mostrados na figura 6.12 ilustra exemplos de formas de aplicação dos fluidos de corte.

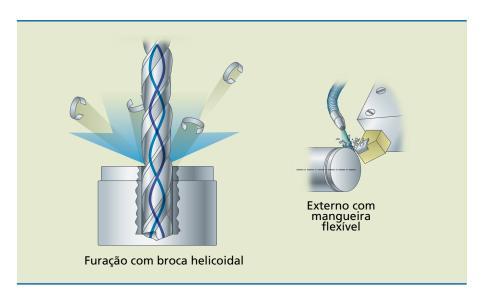


Figura 6.12Formas de aplicação dos fluidos de corte.

O fluido deve ser aplicado com jato abundante e controlado na área de corte. Além de jato abundante, aplicam-se maiores pressões de refrigeração e de gases e névoas.

Gases e névoas são usados em operações de mecânica de precisão, usinagem de altas velocidades e em MQL (quantidade mínima de lubrificante – fluido de corte). O uso de MQL é favorável à consciência ambiental, com menor consumo e menor necessidade de descarte. A MQL é empregada em sistemas de névoa em que o fluido é disperso na forma de *spray* sobre a região que se quer refrigerar ou lubrificar (mistura ar + óleo).

Na indústria de moldes e matrizes, por exemplo, é utilizada principalmente a operação de fresamento em *high speed machining* (HSM) ou *high speed cutting* (HSC) – designação mundial para processos de usinagem a altas taxas de velocidade de corte e avanço com baixa profundidade de corte. Indica-se a MQL, pois, ao se aplicar o fluido refrigerante em corte interrompido, as mudanças bruscas de temperatura provocam trincas térmicas na ferramenta, enquanto a opção de usinagem sem refrigeração provoca dilatação térmica e dificuldades de manuseio dos cavacos sob altas temperaturas, além de comprometer o acaba-





^{**} Para problemas de corrosão com fluidos solúveis, em geral, usam-se aditivos antiferrugem.

mento superficial. O ar comprimido é utilizado para melhorar a retirada de calor e expulsão do cavaco da região de corte.

Como desvantagens da MQL podem ser citadas a necessidade de um sistema de exaustão da névoa gerada e a capacidade limitada de lubrificação e refrigeração.

6.3.3 Problemas comuns no uso de fluidos de corte

O uso de fluidos de corte exige cuidados especiais na manipulação, manutenção, transporte, armazenagem e descarte, para não colocar em risco a saúde dos operadores e o meio ambiente com uma possível contaminação do produto. Não existe um fluido de características universais. A melhoria de certas qualidades pode provocar a piora de outras.

Uma das formas de contaminação dos fluidos por sujeiras ou impurezas pode ocorrer com a adição do óleo lubrificante das guias das máquinas. Com os ciclos de lubrificação periódica das máquinas automáticas e computadorizadas, o óleo lubrificante é levado pelo fluido ao reservatório, sem se misturar. Com o passar do tempo, produz-se uma película de óleo sobrenadante no reservatório e mau cheiro. Outro problema decorrente é a corrosão de peças e/ou da máquina que sofrem ataque do fluido fora da especificação de concentração. Além disso, alguns fluidos podem atacar a pintura da máquina.

No ambiente industrial, podem ocorrer problemas de saúde ao usuário pela inalação de vapores surgidos da refrigeração sob alta pressão e resultantes de operações em máquinas de alto rendimento, bem como de uma concentração de máquinas utilizando óleos integrais. Nesses casos, é recomendada a instalação de exaustores de névoas nas máquinas. Outro problema de saúde, atualmente já não tão frequente, é a possibilidade de irritações e doenças na pele do usuário em contato com fluidos de corte. Nesses casos, é recomendado avaliar a troca do fluido, ou o uso de luvas, ou mudar o operador de posto de trabalho, caso seja identificado um problema específico de alergia.

6.3.4 Purificação de fluidos de corte

Os fluidos de corte podem ser submetidos a processos de purificação através de sistemas individuais ou centralizados (para várias máquinas), tendo por objetivo:

- permitir o controle da concentração dos fluidos em sistemas centralizados;
- a redução do descarte com a possibilidade de remoção de partes metálicas finas e outros contaminantes;
- o aumento da vida útil do fluido de corte;
- a redução de paradas de máquinas e da mão de obra na limpeza de reservatórios.

Métodos de purificação

• **Decantação** – é um processo de separação por gravidade, no qual são empregados dispositivos como chicanas de separação etc.

- **Filtração** o fluido passa por filtragem em meios porosos, por exemplo, papel filtrante.
- Sistemas qualificadores de fluido de corte removem cavacos e retiram parcialmente óleos sobrenadantes nos fluidos de corte. Esses sistemas são aplicados na purificação do fluido de retificadoras, brochadeiras, centros de usinagem, equipamentos de broqueamento profundo, usinagem com ferramentas de alto rendimento e precisão, entre outros.

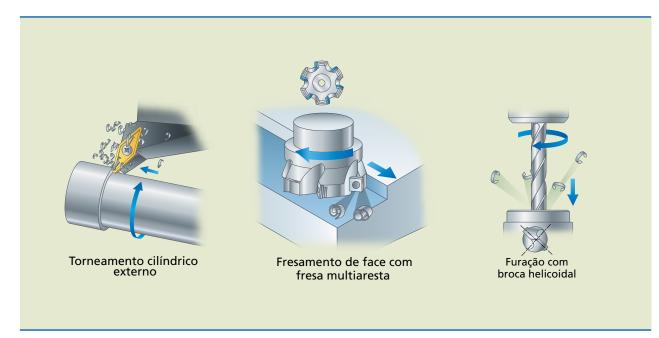
6.4 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte é muito importante para o sucesso da usinagem. Embora seu custo inicial seja de 3% a 5% dos custos totais do processo, a seleção correta do material, da classe e geometria, bem como dos parâmetros de corte da ferramenta, permite otimização de recursos ao reduzir o tempo de usinagem, o tempo de máquina, o consumo de energia elétrica etc.

As ferramentas de usinagem são constituídas de arestas cortantes, destinadas à remoção do cavaco. As ferramentas monocortantes possuem apenas uma superfície de corte e predominam no torneamento, enquanto as ferramentas multicortantes possuem mais de uma superfície de corte e predominam na furação e fresamento. Em geral, existem as ferramentas inteiriças, ferramentas com adição de material mais resistente soldado, como aresta de corte, e as ferramentas indexáveis (com pastilhas ou insertos intercambiáveis). A figura 6.13 mostra três tipos de ferramentas de corte.

A escolha do material da ferramenta, da geometria e dos parâmetros de corte está associada ao tipo de material que vai ser usinado, às características da atividade a ser executada, aos objetivos que se quer atingir e em qual máquina-ferramenta será aplicado. A geometria da ferramenta e os parâmetros de corte influenciam na formação do cavaco, nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade final do trabalho.

Figura 6.13Ferramentas de corte.







6.4.1 Requisitos desejados em ferramenta de corte

Uma ferramenta de corte deve apresentar em geral:

- condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica adequados;
- resistência à compressão;
- dureza;
- tenacidade;
- resistência ao calor e à abrasão;
- resistência ao desgaste e à oxidação;
- pequena tendência à fusão e caldeamento.

Muito dificilmente uma ferramenta atende a todos os requisitos. É importante conhecer os materiais das ferramentas e a geometria para o sucesso da usinagem.

6.4.2 Evolução dos principais materiais para ferramenta de corte

Aço rápido - desde 1900

É um aço para ferramentas que pode usinar em altas velocidades (em inglês, HSS – *high speed steel*). Com dureza de 60 a 67 HRC após tratamento térmico complexo, resiste a uma temperatura de até aproximadamente 600 °C. É universal, aplicado em ferramentas para todas as operações de usinagem, tais como: machos e cossinetes de roscas, brocas helicoidais, alargadores e fresas de todos os tipos, cortadores de engrenagens, escareadores, ferramentas para tornear, enfim, em aplicações que exigem dureza e elevada tenacidade.

Aplicando revestimentos (TiC, TiN), proporciona menor atrito, redução no desgaste e aumento da vida da ferramenta.

Metal duro – desde 1926

O metal duro é aplicado como ferramenta para quase todas as operações de usinagem (sob a forma de insertos intercambiáveis), brocas helicoidais inteiriças, fresas de topo, alargadores e outras aplicações.

O metal duro possui muitas propriedades requeridas para ferramentas de corte. É feito com carboneto de tungstênio (WC) em pó, cobalto (Co) em pó e elemento liga. A mistura é sinterizada em atmosfera controlada e fica com menor volume e mais peso específico do que antes da sinterização. Resiste a temperaturas da ordem de 1000 °C.

As ferramentas fabricadas com metal duro podem trabalhar com maiores velocidades em relação àquelas com aços rápidos e têm aumento na vida útil. O quadro da figura 6.14 ilustra a influência dos elementos que compõem o metal duro em suas características.



Figura 6.14
Influência dos elementos
que compõem o
metal duro.

É possível obter propriedades específicas com variações da composição de carbonetos. Nos anos 1970, surgiram os metais duros revestidos e os primeiros cermet (metais duros à base de TiC), ainda aplicados atualmente, possibilitando o uso de maiores velocidades. Nos anos 1990, com a redução do tamanho do grão de WC, o metal duro adquiriu estrutura denominada microgrão, ou seja, tamanho de grão menor de 1 μ, o que melhorou suas características de aplicação e possibilitou maiores velocidades e maior vida útil, facilitando a deposição de camadas.

Atualmente, os processos de revestimentos CVD (deposição por vapor químico) e PVD (deposição por vapor físico) predominam entre os fabricantes de pastilhas de usinagem. Os revestimentos CVD são de alta tenacidade e necessitam de substrato especial, enquanto os revestimentos PVD são de alta dureza, sem exigência de substrato especial. Partindo de substrato tenaz, aplicam-se um ou vários revestimentos duros, como TiC, TiN, Ti(C,N), Al₂O₃ e outros. Podem combinar alta resistência a choques com alta resistência a desgaste (maior vida útil da ferramenta). A figura 6.15 mostra pastilhas com vários revestimentos.



Figura 6.15
Pastilhas com revestimentos.

Tipos e propriedades das camadas de revestimento dos insertos de metal duro

- carboneto de titânio (TiC) alta dureza, proteção contra o desgaste na superfície de saída;
- nitreto de titânio (TiN) estabilidade termodinâmica;
- carbonitreto de titânio [Ti (C,N)] alta dureza, comportamento frágil, estabilidade térmica;





- nitreto de alumínio-titânio [(Ti, Al)N] boa resistência à oxidação, boa dureza a quente;
- óxido de alumínio (Al₂O₃) boa resistência à abrasão, boa resistência à oxidação.

No início do século XXI, teve início a aplicação de revestimentos de baixa tensão. As características buscadas foram tornar as pastilhas PVD mais tenazes, com revestimentos na face de saída do cavaco que reduzem a porosidade e facilitam o escoamento do cavaco.

Cerâmicas - desde 1938

Características gerais: alta resistência à compressão, alta estabilidade química, limitações na aplicação por causa do comportamento frágil, aplicação indispensável em áreas como fabricação de autopeças (exemplo: discos e tambores de freio). Dividem-se em cerâmicas óxidas e não óxidas.

- Cerâmica óxida à base de Al₂O₃ é a cerâmica de coloração branca, composição Al₂O₃ com adição de óxido de zircônio (ZrO₂), usada em torneamento de semiacabamento e acabamento de FoFo cinzento, em velocidades moderadas e sem refrigerante de corte.
- Cerâmica óxida mista base de Al₂O₃ adicionado de componentes não óxidos (TiC ou TiN), coloração escura. Possui grãos finos conferindo melhor tenacidade, resistência ao desgaste e de quina, pequena resistência a choques térmicos. Aplicada em torneamento e fresamento leves de FoFo cinzento e usinagem de aços cementados e temperados, em velocidades moderadas e sem refrigerante de corte.
- Cerâmicas não óxidas são cerâmicas à base de carbonetos, nitretos, boretos, silicatos, principalmente materiais à base de Si₃N₄. Aplicadas em usinagem em corte interrompido de FoFo, torneamento de discos de freio, com altas velocidades sem refrigerante quando se estiver usinando corte interrompido. Usada em superligas à base de níquel em velocidades moderadas.

Aplicando revestimentos CVD, aumenta a resistência em desbastes e cortes interrompidos de ferro fundido em altas velocidades, podendo ser usado refrigerante.

Nitreto de boro cúbico (CBN) – após 1950

Campo de aplicação – indicado para usinar os seguintes materiais:

- aços temperados com dureza maior que 45 HRC torneamento, fresamento, furação.
- aço rápido (de ferramentas de corte) e aços resistentes a altas temperaturas;
- ligas duras e material sinterizado;
- em operações de corte interrompido, desbaste ou acabamento;
- usinagem de aços e ferros fundidos resistentes ou endurecidos, que não são usinados com diamante em função da afinidade química.



Figura 6.16 Nitreto de boro cúbico policristalizado sinterizado

a uma base de carboneto.

Diamante – após 1970

Geralmente é chamado PCD (policristalino). A vida das ferramentas PCD é cerca de 50 a 80 vezes maior que a das ferramentas de metal duro. São classificados:

- quanto à origem naturais (normalmente na forma monocristalina) e sintéticos (fabricação sob temperatura e pressão elevadas, produção de partículas de diamante monocristalino transformado em policristalino por compressão a quente).
- quanto à composição do inserto monocristalino e policristalino (diversos cristais aglutinados por galvanização).

Aplicação: usinagem de precisão e ultraprecisão, com pequenas profundidades e avanços em altas velocidades em materiais não ferrosos (possui afinidade química com Fe–C, motivo pelo qual não se usa em materiais ferrosos), como plásticos, pedras, ligas de cobre e alumínio em altas velocidades. Usinagem com tolerâncias estreitas (baixa resistência à flexão das ferramentas).

O gráfico mostrado na figura 6.17 apresenta as propriedades dos principais materiais utilizados na fabricação das ferramentas de corte.

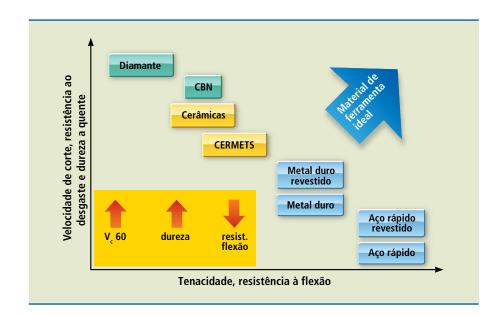


Figura 6.17
Propriedades dos
principais materiais das
ferramentas de corte.



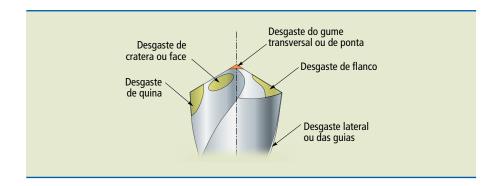


6.4.3 Desgaste e avarias das ferramentas

Os danos **normais** nas ferramentas são o desgaste frontal (flanco) e de saída (craterização) (figura 6.18), ocasionados pela abrasão com o material. Ocorrendo os desgastes normais, a ferramenta sempre deve ser trocada quando eles chegarem ao limite de aplicação (vida útil), para evitar a quebra.

Porém, se os danos forem prematuros, deve-se substituir a classe da ferramenta por outra que melhor se adapte à aplicação. Ou corrigir parâmetros de corte como o avanço e a V_C (velocidade de corte). Ocorrendo os desgastes normais, a ferramenta sempre deve ser trocada quando eles chegarem ao limite de aplicação (vida útil), para evitar a quebra da ferramenta e maiores problemas com a peça ou a máquina.

Figura 6.18
Danos sofridos pelas
ferramentas de corte.



Formas de avaliação do desgaste (ou final da vida)

O desgaste das ferramentas de corte pode ser avaliado por:

- medição direta inspeção visual feita com lupas ou óptica (microscópios e câmeras);
- medição indireta observando o aumento das vibrações, do ruído, piora da qualidade, quebra de bordas ou aparecimento de rebarbas excessivas na peça, rejeição dimensional e aumento de esforços de corte.

Entre os **desgastes anormais** que devem ser evitados, podemos citar como os mais importantes:

- aresta postiça usinagem de material que gruda na aresta de corte por adesão térmica. Solucionar com o aumento da V_C (velocidade de corte), geometria mais positiva ou uso de refrigerante de corte.
- lascamento do gume ocasionado por forças de corte excessivas, inclusões duras na peça e em usinagem de corte interrompido com classe muito dura. Inicia-se com microlascamento, que leva à fratura e quebra. Pode ser solucionado com a diminuição de esforços de avanço, aplicação de classe mais tenaz e formato mais estável de ferramenta.
- trincas térmicas ocorrem quando a aresta de corte é submetida a grandes choques térmicos. Entre as soluções, deve-se utilizar uma classe mais tenaz, aumentar a quantidade ou remover definitivamente o fluido de corte.

- deformação plástica causada por altos avanços e esforços, que elevam a temperatura. O avanço e a velocidade devem ser reduzidos ou trocar por uma ferramenta mais resistente.
- **trinca mecânica** caracterizada por cortes interrompidos quando há variação de esforços na ferramenta. Deve ser utilizada uma classe mais tenaz, reduzindo o avanço e a profundidade de corte.

6.5 Parâmetros e grandezas de corte

Os principais parâmetros em usinagem são a velocidade de corte (V_C), a rotação por minuto (N), o avanço (f_n) e a profundidade de corte (ap). Para cada operação, são importantes, ainda, a rugosidade, a largura de corte e as características da máquina-ferramenta empregada.

6.5.1 Velocidade de corte (V_C)

Na usinagem, é necessário que a ferramenta e o material se movimentem em sentido favorável ao arranque de cavaco a uma velocidade de corte (V_C) e velocidade de avanço (V_f). Essas duas velocidades, em somatório vetorial, formam a velocidade resultante chamada velocidade efetiva de corte. (Ver exemplo para torneamento na figura 6.19.)

A velocidade de corte "é a velocidade instantânea do ponto de referência (parte da aresta cortante próxima à ponta da ferramenta), segundo a direção e sentido de corte" (FERRARESI, 1977), na unidade metros por minuto (m/min). Com o valor selecionado da $V_{\rm C}$, podemos calcular as rpm (rotações por minuto) em que a peça (em torneamento) ou ferramenta (em furação e fresamento) giram. O valor das rpm possibilita conhecer qual potência de motor estará disponível para executar a usinagem, consultando o conjugado gráfico de torque/potência fornecido pelo fabricante da máquina-ferramenta (figura 6.20).

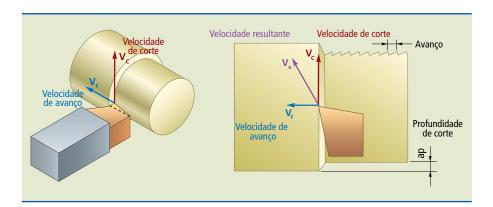


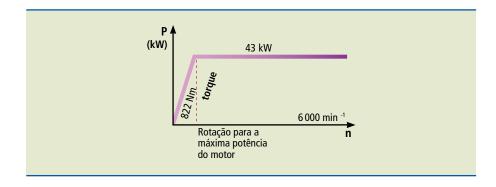
Figura 6.19
Velocidade de corte no torneamento.

A V_C é considerada o principal parâmetro na usinagem, responsável pela definição da vida útil da ferramenta, dos tempos produtivos e do acabamento da peça usinada. Velocidades excessivas diminuem a vida útil da ferramenta por desgaste e velocidades muito baixas geralmente causam aresta postiça e não são econômicas por resultar em maior tempo de usinagem.





Figura 6.20 Gráfico de torque/potência.



A motorização da máquina no exemplo da figura 6.20 é de 6 000 rpm(n), torque de 822 Nm. É preciso atingir um valor de rpm para ter a máxima potência do motor disponível (43 kW). Abaixo do valor de rpm, é requerido o uso de gráficos detalhados para saber qual potência do motor estará disponível.

A seleção da velocidade de corte depende de alguns fatores, como:

- material da peça com maior dureza do material, geralmente aplica-se menor V_C ;
- material da ferramenta materiais mais resistentes suportam maior V_C; por exemplo, o metal duro é mais resistente que o aço rápido e permite maior V_C ;
- seção e formato da peça formas delgadas (torneamento fino), maior velocidade; formas espessas (desbaste), menor velocidade; para corte interrompido em torneamento, é recomendado o uso de menor velocidade do que para corte contínuo;
- refrigeração de corte com refrigeração, principalmente em corte contínuo, admite-se velocidade de corte até 40% maior – em fresamentos por via seca é comum maior velocidades de corte do que em via úmida;
- modelo construtivo da máquina máquinas robustas e rígidas permitem maior velocidade de corte;
- fixação da peça e ferramenta procura-se fixação estável para aplicar maior velocidade de corte.

O valor da V_C para cada aplicação e operação é sugerido pelos fabricantes de ferramentas em faixas de valores obtidos de dados experimentais para certo tempo de vida da ferramenta, em corte realmente efetivo. Pode ser calculada a rotação (rpm) com esse valor sugerido de V_C, por exemplo, para o uso de uma broca. Pode ser calculada a V_C quando são conhecidos a rotação (rpm) e o diâmetro. Ou seja, podemos calcular e definir a rotação a ser usada, bem como podemos calcular a V_C ao ver uma aplicação, para conferir com valores sugeridos.

Para o cálculo da rpm (revoluções por Para o cálculo da V_C caso a rpm seja minuto) em função da velocidade de conhecida, utilizamos corte, utilizamos

$$N = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

$$V_{C} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

em que:

$$V_C$$
 = velocidade de corte (m/min) D = Diâmetro (mm) π = 3,14 (constante) N = rotação do eixo árvore (rpm)

Na operação de torneamento, considera-se o diâmetro da peça que a ferramenta está usinando. Para o fresamento ou furação, no cálculo da rotação (em rpm) da ferramenta, considera-se o diâmetro da fresa ou da broca.

Exemplo

Determinar a rotação (rpm) para desbastar no torno convencional um tarugo de aço ABNT 1045 e produzir na peça um diâmetro de 20 mm, usando uma ferramenta de metal duro, se foi indicada uma V_C média de 150 m/min.

 V_C sugerida = 150 m/min

D = 20 mm

Por arredondamento, usar rpm mais próxima de 2387.

Solução

Substituindo os valores, temos:

$$N = \frac{150 \cdot 1000}{\pi \cdot 20}$$

N = 2387,3 rpm

A figura 6.21 mostra o gráfico histórico comparativo da velocidade de corte de diferentes materiais das ferramentas.

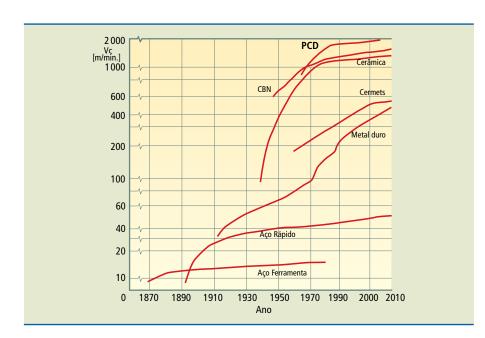


Figura 6.21 Histórico comparativo da velocidade de corte para diferentes materiais das ferramentas de corte.





6.5.2 Avanço (f_n) e velocidade de avanço (V_{Δ})

O movimento de avanço é o deslocamento da ferramenta por rotação da peça, ou da própria ferramenta, medido no plano de trabalho. O avanço a ser utilizado depende principalmente do acabamento superficial exigido e de outros fatores, como:

- a potência e a estabilidade da máquina;
- o material e o formato da peça;
- a ferramenta: seu formato, o raio de ponta, o tamanho da pastilha, o quebra--cavacos, a classe e o ângulo de posição.

Para selecionarmos o avanço, verificamos as recomendações do fabricante para aquele tipo de ferramenta. Prosseguimos verificando se a combinação avanço/raio de quina (ponta) alcançará o acabamento superficial esperado. O avanço máximo deve ser sempre menor que o tamanho do raio de quina. Avanços muito pequenos normalmente resultam em um fluxo de cavacos ruim, uma vida da ferramenta mais curta e maior tempo de usinagem. Se o avanço for muito alto, produz aumento de esforços e maior potência de corte, o que prejudica o acabamento superficial e causa avarias na ferramenta, como as trincas mecânicas e deformação plástica.

Em geral, no torneamento utiliza-se o avanço em mm/rpm. Com ferramentas multicortantes (fresas), é comum a especificação do avanço por dente ou aresta da fresa (f_z), mas regulam-se ou programam-se as máquinas pela velocidade de avanço, calculada pela expressão:

$$V_A = f_n \cdot z \cdot N$$

 V_A = velocidade de avanço (mm/min)

 $f_n = avanço (mm/rpm)$

Z = quantidade de facas ou arestas (1 p/torneamento e furação; para fresamento contar os dentes ou cortes da fresa)

N = rotação do eixo árvore (rpm)

6.5.3 Profundidade de corte (ap)

É a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No torneamento, é o valor retirado no raio da peça (resultando alteração no diâmetro de duas vezes o valor da ap). A figura 6.22 ilustra dois exemplos, um em torneamento e outro em fresamento. A profundidade de corte máxima depende dos seguintes fatores:

- potência da máquina;
- estabilidade;
- material da peça;
- formato e tamanho da pastilha;
- raio de ponta;
- quebra-cavacos;
- classe e ângulo de posição da ferramenta.

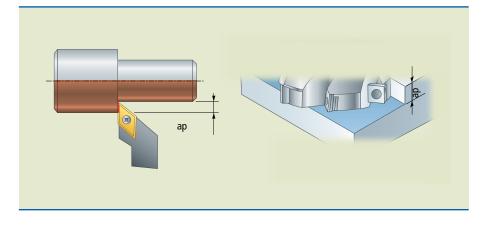


Figura 6.22

Profundidade de corte (ab) em torneamento e fresamento.

A seleção da profundidade ideal começa com a verificação da necessidade de usinagem, o tamanho da aresta da ferramenta (pastilha) e as recomendações para o quebra-cavaco escolhido. A profundidade de corte máxima ideal é o resultado dessas informações, e a adoção do valor real depende da potência disponível no motor. Devemos evitar que a profundidade de corte mínima seja menor que o tamanho do raio de ponta da ferramenta.

Em operações de acabamento no torneamento, principalmente interno, usa-se o mínimo raio de ponta possível e ângulo de saída positivo, para obter menor pressão de corte, o que evita a deformação da geometria usinada, como os desvios de circularidade e cilindricidade.

A utilização de grandes profundidades de corte aumenta a quantidade de metal removido por unidade de tempo, mas, em compensação, provoca significativos acréscimos na potência de corte e no desgaste e quebra das ferramentas. Usar uma profundidade muito pequena causa perda do controle dos cavacos, possíveis vibrações, além de não ser econômico, por precisar passar a ferramenta mais vezes para remover a quantidade de material requerida.

6.6 Cálculo do tempo de usinagem

Os parâmetros de corte são responsáveis pelo tempo efetivo de corte na usinagem. Pode-se calcular o tempo efetivo de usinagem t pela seguinte equação:

$$x = \frac{\text{espaço}}{V_{\Delta}} \text{ (min)}$$

em que:

t = tempo (min);espaço = espaço percorrido pela ferramenta (mm); V_A = velocidade de avanço (mm/min).

O valor é calculado em minutos. Multiplicando o resultado por 60, temos a conversão do tempo de minutos para segundos.





Percebe-se a importância dos parâmetros para fazer a usinagem mais econômica. O espaço percorrido pela ferramenta tem influência na profundidade de corte, em que maiores profundidades geram menor quantidade de passes de desbaste e menor espaço percorrido. A velocidade de avanço tem a influência inicial da velocidade de corte (V_C) (que determina a rotação, rpm) e do valor de avanço para gerar maior velocidade.

A aplicação correta das ferramentas pode trazer muitos benefícios, utilizando os parâmetros adequados, garantindo o menor tempo de usinagem e a maior vida possível da ferramenta.

Os valores da **força de corte** e da **potência de corte** são calculados conforme o processo de usinagem a ser realizado: torneamento, fresamento ou furação.

Capítulo 7

Usinagem – folhas de processo



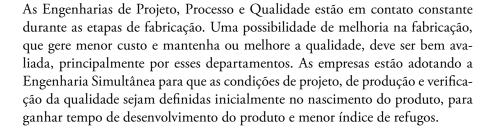
m um ambiente industrial, o gerenciamento do produto e projeto ocorre em conjunto com o ciclo de produção, realizado pela Engenharia de Produto. Estão incluídos os dimensionamentos, a verificação dos esforços e desgastes, a simulação da vida útil de um componente e do conjunto. É necessária a condição de intercambialidade entre as peças componentes, mesmo que sejam fabricadas em épocas diferentes ou por empresas distintas. Há ainda a necessidade de tratamento térmico, as tolerâncias dimensionais, especificações de desvios de forma e posição, rugosidade superficial e o estudo das tolerâncias que permitam a montagem do conjunto. É importante que o profissional de projetos tenha vasta experiência técnica.

A simulação em poderosos *softwares* de engenharia possibilita a verificação antecipada de ocorrências que seriam percebidas somente no serviço do elemento de máquinas ou estrutura. Após os testes de protótipo do produto aprovados em funcionalidade e qualidade (um molde, uma matriz, um conjunto/subconjunto ou um produto montado), procura-se atingir um índice de credibilidade e satisfação, sem preocupação de reposição prematura de peças e componentes, ou até causar algum acidente em sua utilização. No caso de moldes, seus componentes usinados são os postiços, que definem o formato da peça a ser injetada, forjada ou fundida, e que poderão ser alterados ou trocados se o teste do molde for reprovado.

Com o desenho de produto liberado, a nova fase é a produção propriamente dita. Inicia-se a definição do processo de obtenção do material bruto e dos processos e etapas de fabricação. O produto poderá ser típico de lote unitário, se for um molde ou matriz, ou de média ou alta escala de produção, se for um produto de maior consumo e utilização, como engrenagens e eixos da caixa de câmbio de veículos automotores.

Para garantir as condições de projeto, é preciso planejar a fabricação por meio do planejamento de processos. O processo de fabricação, integrante da Engenharia de Fabricação e auxiliado pela Engenharia de Qualidade, é o intermediário entre o projeto e a produção e utiliza a metodologia de análise e tratamento tecnológico dos problemas. É necessário que os processos de usinagem garantam:

- a condição de utilização do componente, seja ele lote unitário ou seriado;
- a qualidade do produto constante em todos os lotes fabricados;
- os custos menores possíveis, fechando o ciclo de pré-requisitos que devem ser atingidos, para que o produto seja competitivo.



Esse novo departamento da empresa é constituído pela Engenharia de Produto, Engenharia de Fabricação e Engenharia de Qualidade, reunidas para fazer uma avaliação crítica no desenvolvimento do produto e, assim, obter um produto mais bem elaborado, com baixo índice de necessidade de revisão e alteração de desenho. Isso facilita o gerenciamento e auxilia o planejamento da produção.

As informações e definições do processo de fabricação determinam importantes parâmetros. Envolvem os custos, o planejamento de produção e a efetivação da produção, bem como auxiliam em informações ao departamento de vendas quanto a prazos. Essas informações determinam e definem o fluxo de produção, a necessidade e disponibilidade de máquinas, de ferramentas e dispositivos. Fazem, ainda, análise crítica do projeto do produto. Os profissionais da Engenharia de Processos devem estar constantemente atualizados sobre as novidades que possam ser aplicadas na melhoria da produtividade e na redução de custos.

É importante destacar que, nas empresas, todos os dados, de projeto, de processo, de fabricação e de qualidade são absolutamente confidenciais. Essas informações definem a competitividade do negócio das empresas e não são aprovadas para divulgação.

Outros fatores econômicos e tecnológicos poderiam ser citados.

7.1 A folha de processo

A figura 7.1 é um diagrama genérico que representa o ciclo de um produto, desde sua necessidade e viabilidade no projeto, até a entrega ao cliente, interno ou externo à organização.

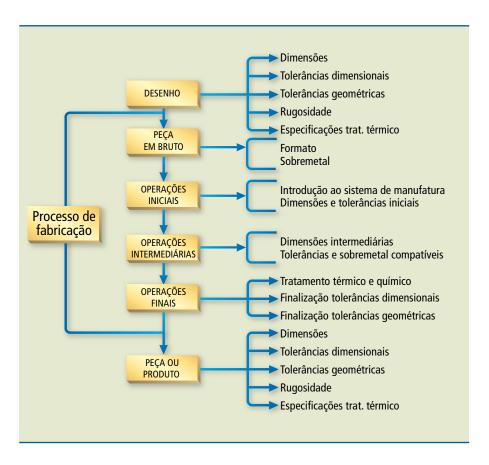
A Engenharia de Fabricação é responsável pela elaboração, entre outros, de processos de fabricação. Representa a ligação entre as responsabilidades de projetar, produzir e controlar a qualidade. A Engenharia de Fabricação auxilia na confecção de protótipos.

Partindo do desenho do produto final, os integrantes da Engenharia de Fabricação elaboram a folha de processo, que contém a seleção de processos de fabricação por usinagem e das máquinas-ferramenta, os roteiros e a descrição de atividades de cada etapa da fabricação, a definição do material em bruto, a dimensão, o sobremetal e a rugosidade das superfícies para a usinagem inicial e entre as operações intermediárias. Deve garantir que a última operação do roteiro gere a peça, atendendo exatamente às especificações do desenho.





Figura 7.1 Ciclo de um produto.



O planejamento de processos é usado em diversos tipos de processos de fabricação. Apesar de restringido apenas à usinagem, existem dificuldades e assuntos a serem conhecidos para estabelecer os roteiros e processos necessários para a maior parte das peças encontradas na indústria de transformação. A dificuldade está na grande variedade de tipos de peças e procedimentos.

Existem muitas empresas de usinagem que são mais especialistas do que generalistas, por exemplo, os usinadores de carcaça de alumínio ou de ferro fundido, usinadores de certos grupos de peças automotivas, usinadores de peças aeroespaciais, usinadores de moldes. Elas detêm quase todo o conhecimento técnico de aplicação na fabricação dos produtos que fornecem a seus clientes. Utilizam a tecnologia de grupo (TG), definida basicamente como a identificação e agrupamento de componentes similares em projeto e fabricação, assim como tiram vantagens das similaridades para ganhar em economia nos métodos do fluxo de produção.

Duas ou mais empresas concorrentes no fornecimento do mesmo segmento de peças, porém, podem ter pequenas diferenças no método de fabricação, apesar de usarem as economias possibilitadas pela TG. Isso faz parte das questões inerentes à competitividade entre elas.

A escolha adequada do formato da peça em bruto para a produção das peças acabadas necessita do conhecimento das características tecnológicas e econômicas dos processos primários de fabricação (laminação, fundição, forjamento

etc.), do parque fabril disponível e da capacidade dos fornecedores. Esses dados garantem menor custo e confiabilidade de fornecimento do material bruto. O objetivo é possibilitar o processamento em máquinas-ferramenta com a máxima capacidade de produção e realizando a menor remoção de cavaco possível. Outras informações importantes na definição da forma de fabricação e do material em bruto são:

- o tamanho do lote a ser produzido por fatores econômicos, lotes menores tendem ao laminado/trefilado, enquanto em lotes maiores é mais utilizada a fundição e o forjamento. Na análise técnica de um item usinado, feito de laminado em que há grande remoção de material, por exemplo, eixos com ressaltos, em geral ocorre a redução da resistência mecânica da peça, quando comparada com a mesma peça obtida de forjado, necessitando de tratamentos térmicos intermediários na fase inicial de fabricação para normalização e alívio de tensões;
- o material e o tamanho da peça conhecer o formato, o tamanho e as características mecânicas do material, para selecionar a matéria-prima, que vai influenciar na indicação da máquina e no ferramental a utilizar, em geral.
- a quantidade de material a ser removido definido o material em bruto, escolhem-se a máquina e o ferramental a utilizar, em geral;
- o número de etapas e as fases de fabricação os processos alternativos reduzem o ciclo, como o forjamento a frio, e impactam em ferramental de corte apropriado a esse processo.

A avaliação financeira do fornecimento do material depende da situação econômica mundial, de facilidades em geral e comparação de custos. Já é possível, por exemplo, o forjamento de precisão de engrenagens cilíndricas de dentes retos (ECDR) e, em alguns casos, de engrenagens helicoidais, com rugosidade, precisão dimensional e geométrica controladas entre as características dimensionais da peça e dos dentes das engrenagens, em vez de passar por várias etapas e fases de usinagem. Nesse caso, a peça já é fornecida acabada, sem necessidade de operações de usinagem.

A definição das operações do roteiro de fabricação, partindo do desenho de produto, depende basicamente de duas condições e em cada operação do roteiro deve:

- permitir a execução das operações posteriores;
- ser executada com operações anteriores.

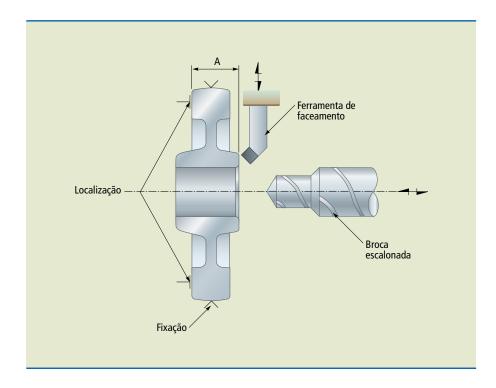
Para fabricar uma engrenagem em aço, por exemplo, em geral o material em bruto será forjado ou laminado. Ele necessita do torneamento em tolerâncias dimensional e geométrica, com rugosidade específica nas características da peça (furo e face de encosto principalmente) em que será fixado o material para usinar e gerar dentes com precisão. Nos esboços e desenhos de processos, utilizamos simbologia de fixação e localização, como nas figuras 7.2 e 7.3. A superfície de referência criada com a operação de faceamento deve ser seguida durante todas as outras operações subsequentes, para garantir a qualidade final das tolerâncias geométricas.





Figura 7.2

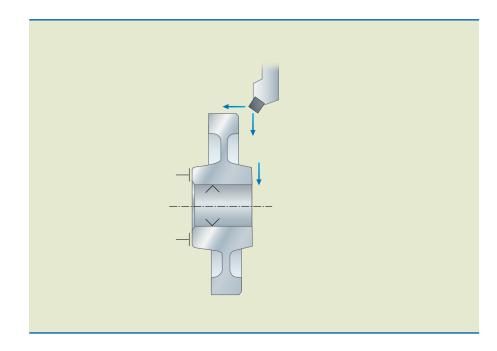
Operação inicial de faceamento do cubo e desbaste do furo de uma engrenagem – fase 10.



A superfície de referência criada com a operação de faceamento deve ser seguida durante todas as outras operações subsequentes, para garantir a qualidade final das tolerâncias geométricas. Nas folhas de processo são indicadas as tolerâncias dimensionais e geométricas, independentemente do desenho do produto, para garantir a qualidade dimensional e geométrica nas operações posteriores.

Figura 7.3

Operação de faceamento
do cubo e desbaste
do diâmetro externo
da engrenagem,
guiando-se pelo furo
e pela face usinados
anteriormente – fase 20.



A peça, posteriormente, tem operações de fresamento e acabamento dos dentes, arraste pelo furo (usinagem de rasgo de chaveta ou ranhurado interno por brochamento ou outro processo) para possibilitar o arraste pelo furo quando esta

engrenagem estiver em uso, além de outras possíveis operações de usinagem para acabamento dos dentes. Pode sofrer tratamento térmico e processo de retificação no furo, nas faces de encosto e, em alguns casos, nos dentes da engrenagem para atender à especificação dimensional e de rugosidade do projeto do produto. Enfim, busca-se a ordem no roteiro, mais lógica do ponto de vista das características do produto e das operações de usinagem.

A colocação lógica e ordenada das operações do roteiro depende da limitação dos processos e das características das operações. É necessário ter conhecimento dessas características das operações como dados fundamentais para elaboração dos documentos que se seguem nas etapas de fabricação: o desenho de processo e a folha de operações, ou, dependendo de cada empresa, de um documento único chamado folha de processo. Esse documento contém o desenho de processo, a descrição e os dados técnicos de cada operação, como a maneira de fixação da peça e ferramenta, qual ferramental deve ser empregado para o corte e fixação, os parâmetros e o tempo de usinagem ou produção horária.

O desenho de processo é elaborado com base no desenho de produto, resguardando-se as duas condições apresentadas acima e observando-se o sobremetal e o formato para operações posteriores, as limitações de tolerância de cada operação, compatíveis com o projeto e as dispersões do sistema máquina/ferramenta/ dispositivo/peça.

Na necessidade de troca de componentes de fixação ou ferramental, bem como no início de lotes de fabricação, o operador da máquina dirige-se ao almoxarifado com a folha de processo para a retirada ou troca do acessório e registra a retirada ou o motivo da troca, se quebra ou desgaste, para atividades de gerenciamento do ferramental e produção.

O sobremetal de usinagem é a quantidade de material a ser retirada de uma superfície durante a usinagem. A definição dessa quantidade de material é motivada por valores técnicos e práticos entre as operações e deve ser analisada caso a caso pelo formato e dimensão da peça, pelas características das operações que vão retirar o material. Formas de análise do sobremetal necessário são, por exemplo: a deformação causada pelos tratamentos térmicos que obrigam deixar material mínimo necessário para uma retificação; os erros de fixação das peças, que resultam em deformidades e necessitam dessa quantidade mínima de material, somados a outros fatores como: erros inevitáveis de produção, de processamento de usinagem por causa dos métodos de fabricação da peça em bruto e da peça acabada, além de erros geométricos das máquinas-ferramenta. Essa análise define o sobremetal ideal entre operações, inclusive do material em bruto para a operação inicial.

A quantidade do sobremetal de usinagem afeta os aspectos econômicos de um processo de fabricação, principalmente na produção seriada. Quanto mais sobremetal a ser retirado, maiores serão as necessidades de tempo para remoção, o que aumenta os custos pelo trabalho dispensável, incluindo maior gasto com as ferramentas de corte e energia elétrica. Pode até ser preciso maior número de máquinas-ferramenta e maior área para a fabricação de determinado número de peças por





Tabela 7.1

Erros que ocorrem na fixação de peças no processo de torneamento

Usinagem de acabamento

Retificada

0,05

0.02

0,03

0.03

certo tempo definido. Já o sobremetal insuficiente acarreta aumento dos custos das peças produzidas, pelas perdas e refugos.

A tabela 7.1 mostra, por exemplo, os erros que ocorrem na fixação de peças em torneamento.

Valores médios de erros de montagem na fixação em placas de três castanhas. Diâmetro da superfície a ser fixada D (mm) 120 a 260 a 120 a até 50 Deslocamento radial (mm) Deslocamento axial (mm) Fundida em areia 0,30 0,40 0,50 0,60 0,10 0,12 0,15 0,20 Fundida em moldes 0,20 0,30 0,40 0,08 0,10 0,12 0,15 0,50 permanentes Fundida em shell molding 0,10 0,15 0,20 0,25 0,05 0,08 0,10 0,12 Forjado em martelo 0,30 0,40 0,50 0,60 0,10 0,12 0,15 0,20 Forjado em prensa 0,20 0.30 0,50 0,05 0,10 0,12 0,15 0,40 0,12 Usinagem de desbaste 0,10 0,15 0,25 0,05 0,08 0,10 0,20

0,10

0.04

0,12

0.05

O Departamento de Produção executa o arranjo físico, posicionando as máquinas e as estações produtivas por meio das informações recebidas da Engenharia de Processos de Fabricação. A Produção tem, ainda, as funções de:

0,03

0.01

0,05

0,02

0,08

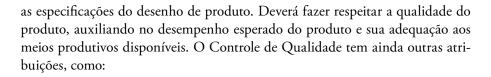
0.03

0,20

0,03

- produzir as quantidades programadas dentro do prazo definido, de acordo com as necessidades de venda e entrega. Utiliza as informações técnicas detalhadas da folha de processos, com planejamento e previsões de quantidade para evitar eventuais problemas (lote mínimo para estoque mínimo). A Produção deve reportar as anormalidades e desvios ocorridos aos departamentos de Processo, Qualidade e Manutenção para as necessárias correções.
- com base na sequência de fabricação estabelecida pelos processos de fabricação, definir os tempos padrão para sua execução. Esses tempos possibilitam: determinar o custo da peça, o controle de eficiência da linha de fabricação e do operador, a relação entre horas trabalhadas e horas disponíveis e, em alguns casos, os prêmios de produção.

O Controle de Qualidade deverá assegurar que a peça esteja de acordo com a folha de processo em cada operação e, no fim do ciclo de fabricação, que tenha



- determinar o plano de controle e avaliar os resultados obtidos pelo processo de fabricação ao longo do tempo. Essa comunicação com a Engenharia de Fabricação, por meio de estudos de capacidade de máquinas ou processos, auxilia na melhoria contínua dos processos de fabricação;
- conhecer as máquinas nas diversas operações do processo de fabricação e permitir que a produção fabrique peças dentro dos limites de rejeição estabelecidos, definindo periodicidade de inspeção.

7.2 Planejamento do processo

O planejamento do processo pode ser dividido nas seguintes fases:

- seleção do material em bruto;
- seleção das máquinas-ferramenta, dos processos, ferramentas e dispositivos;
- seleção das condições de processo;
- definição do roteiro de operações;
- seleção dos instrumentos de medição e periodicidade;
- determinação das dimensões intermediárias e das tolerâncias de produção;
- determinação dos tempos ativos e passivos;
- edição das folhas de processo contendo as informações detalhadas.

As informações iniciais importantes e necessárias para planejar a fabricação são:

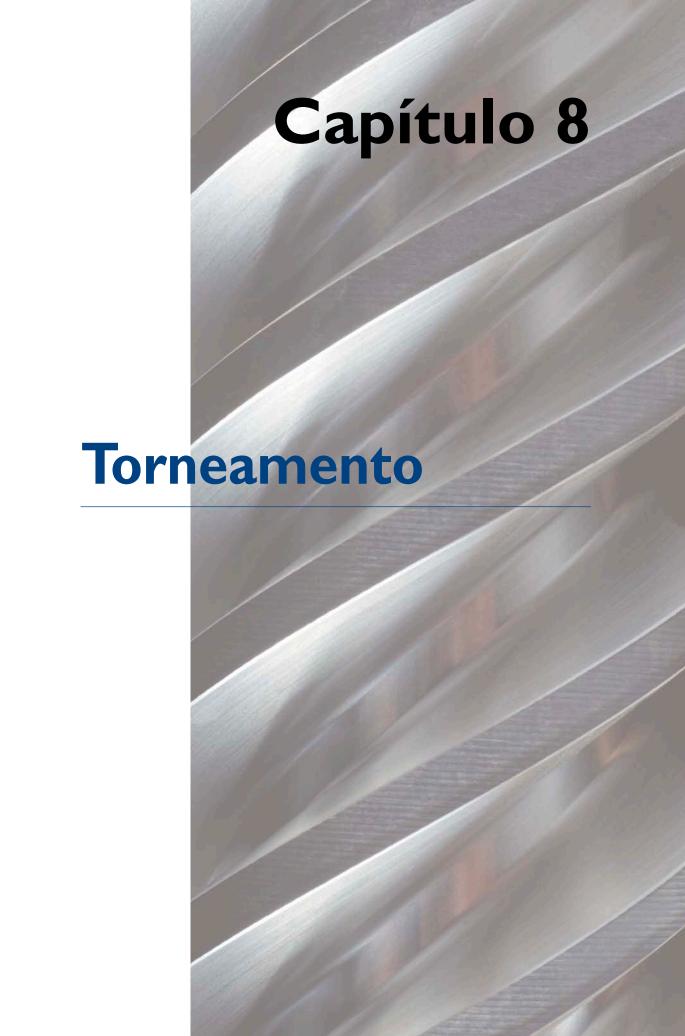
- "desenho de produto detalhado com dimensões e respectivas tolerâncias dimensionais e geométricas;
- indicação da rugosidade superficial das superfícies;
- tipo e especificações do material;
- quantidade de peças a serem produzidas;
- outras especificações tratamento térmico, dureza, camada de proteção, balanceamento, entre outros" (AGOSTINHO, 2004).

Com relação ao ambiente fabril, acrescentam-se a essas informações os dados necessários de características técnicas das máquinas-ferramenta disponíveis, ferramentas existentes, possibilidade de utilização de dispositivos padrão ou necessidade de dispositivos especiais, condições de trabalho, precisão. Pode-se definir por meio de um processo lógico a sucessão de passos que transformem o material bruto em produto acabado.

O profissional da área de Engenharia de Processos deverá ter conhecimentos técnicos e de aplicação das diversas operações de usinagem, por exemplo, o torneamento, o fresamento, a furação e a retificação. Deve atender à rotina de atividade da empresa em que estiver trabalhando e de acordo com o modo como elas ocorrem.

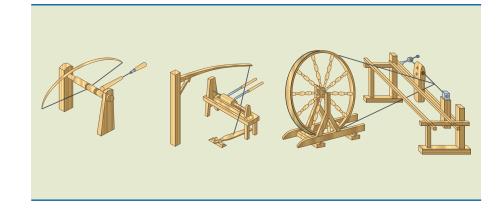






humanidade já aplicava os princípios dos processos de fabricação desde o momento em que começou a produzir suas ferramentas e utensílios. O torneamento baseia-se em um princípio da mais remota Antiguidade, quando o homem fabricava as vasilhas de cerâmica rotacionando a peça sobre seu próprio eixo e produzindo superfícies cilíndricas, perfiladas ou cônicas. A figura 8.1 mostra exemplos de tornos mais antigos.

Figura 8.1
Exemplos de tornos de arco, de vara e de fuso – do Império Romano até o início do ano 1600.



Apesar de antigo, esse princípio foi efetivamente usado para o trabalho de metais a partir da Revolução Industrial, na Inglaterra, no final do século XIX. Foi impulsionado pela invenção das máquinas a vapor e a criação do suporte para ferramenta e do avanço do carro transversal. A partir desse momento, o torno, que era operado por mais de uma pessoa, passou a ter apenas um operador. Pode-se dizer que já visava à colocação de um operador menos especializado como forma de redução de custos, pois a manufatura tornou-se mais mecânica e empregou mão de obra mais barata.

As melhorias de condições de operação ficaram possíveis com o avanço e a evolução das partes componentes do torno, e as principais são citadas na evolução histórica ilustrada na figura 8.2, em que se apontam as partes do torno e o ano de implantação.

As melhorias para o operador vieram oferecer maior segurança de uso, ao introduzir componentes nas máquinas como as proteções e sensores e, mais recentemente, os equipamentos de proteção individual (EPI): óculos de segurança e protetores auriculares.

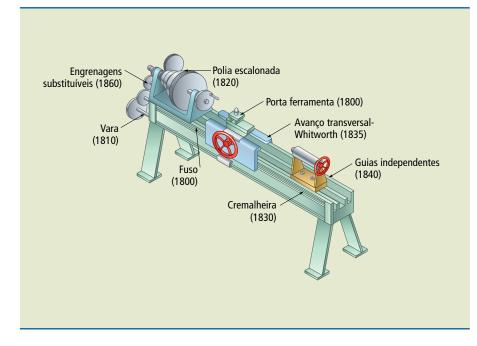


Figura 8.2Evolução histórica do torno.

No torneamento, atualmente, o metal é removido em altas velocidades, buscando-se ferramental e parâmetros de corte controlados nos processos. A intenção é atingir, na operação de torneamento de uma peça, um formato, dimensão e rugosidade superficial específicos, seguindo orientações definidas no desenho da peça ou no desenho da folha de processo. Ao mesmo tempo procura-se obter cavaco que obedeça a uma forma controlada e aceitável para determinada aplicação e com dados de corte o mais elevados possível com a melhor condição de vida da ferramenta, aproveitando as características da nova geração de ferramentas de corte utilizadas em máquinas convencionais ou em máquinas CNC (comando numérico computadorizado).

O torneamento estabeleceu-se como um dos processos mais completos de fabricação mecânica, uma vez que permite conseguir a maioria dos perfis cilíndricos necessários aos produtos da indústria mecânica. Em grau de importância, quando comparado a outros modelos de máquinas-ferramenta, o torno é seguramente o tipo de máquina mais vendido e adquirido em número de unidades, pela maior ocorrência do torneamento nas empresas.

8.1 Definições em torneamento

O torneamento é um processo mecânico de usinagem em superfícies de revolução, com o uso de ferramentas monocortantes. Para realizar a operação, a peça rotaciona em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta faz a translação ao mesmo tempo. É um processo em geral aplicado na fabricação de peças simétricas de revolução. Necessita que a ferramenta esteja na altura exata do eixo de centro da peça e da máquina, para se efetuar corretamente o corte e distribuir os esforços.

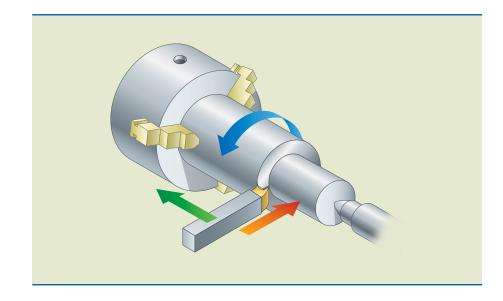
Quanto à trajetória da ferramenta, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.





Figura 8.3

A figura mostra os movimentos de avanço e giratório da peça contra o corte da ferramenta.



8.1.1 Tipos de torneamento

A tabela 8.1 mostra os tipos de operações de torneamento externo e interno.

Tabela 8.1Operações de torneamento externo e interno.



Torneamento retilíneo

É o processo em que a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea. A seguir, os tipos de torneamento retilíneo, com referência numérica das figuras demonstrativas da tabela 8.1:

- torneamento cilíndrico a ferramenta se desloca na trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (nº 1) ou interno (nº 10). Para obter um entalhe circular deslocando paralelamente ao eixo da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial (nº 5).
- torneamento cônico a ferramenta se desloca em uma trajetória inclinada com o eixo da máquina. Pode ser interno (nº 11) ou externo (nº 3) e ocorre de duas maneiras no torno convencional: inclinando o carro espera/manual ou deslocando o cabeçote móvel para inclinações pequenas. Nos tornos CNC, o sincronismo de movimentação dos eixos permite realizar torneamentos cônicos sem necessidade de inclinação da ferramenta, executando-os por meio de uma programação na inclinação desejada.
- torneamento radial a ferramenta se desloca em trajetória perpendicular ao eixo de rotação da máquina obtendo uma superfície plana. O processo é denominado faceamento (nº 2). A face gerada é referência para as medidas que derivam dela.

As ferramentas de tornear precisam estar na altura do centro do eixo principal (figura 8.4). O ajuste é feito colocando calços abaixo da ferramenta ou trocando o tamanho do suporte da ferramenta. Os tornos geralmente são projetados para receber determinado tamanho de suporte externo e interno porta inserto intercambiável (pastilha de metal duro), por exemplo, cabo 20 × 20 mm, de modo que a ferramenta automaticamente deverá estar na altura de centro e, em geral, não necessitará de calços para ajuste de altura.

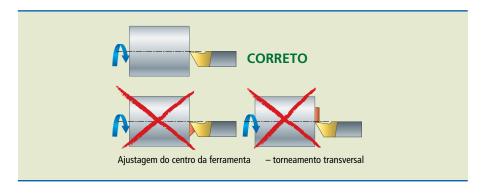


Figura 8.4Ajustagem do centro da ferramenta.

Se a ferramenta estiver fora da altura de centro, pode ser danificada, aumentar esforços e até causar acidentes. Durante o faceamento, percebemos a real necessidade de as ferramentas de corte estarem na altura de centro do eixo da peça para não ocorrer imperfeição na face.

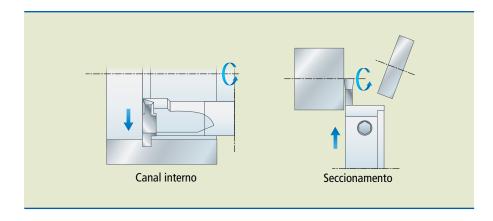
O sangramento radial (nº 4) tem o objetivo de realizar na peça um entalhe circular perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, podendo ser interno ou externo.





O sangramento radial externo também pode ser prolongado, a fim de realizar o seccionamento ou corte, separando parte da peça (figura 8.5). Essa operação é comum em trabalhos de torneamento em que o material é fornecido laminado ou trefilado em barras maciças ou tubos, e não em pedaços serrados. A barra ou tubo é fixada na máquina, usina-se o perfil da peça e, em seguida, a ferramenta de sangrar faz o seccionamento ou corte.

Figura 8.5Operações de torneamento.



- **perfilamento** a ferramenta possui um perfil reproduzido da forma final da peça e se desloca em trajetória retilínea radial (nº 7) ou axial (nº 8). Esse processo é muito utilizado em tornos de cabeçote múltiplo.
- torneamento curvilíneo a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea, sem referência fixa ao eixo de rotação da máquina (nº 6).

Por causa do movimento da ferramenta, é possível executar operações de **roscamento** externo (cilíndrico, cônico ou radial) ou interno (cilíndrico ou cônico), com uma ferramenta afiada segundo a geometria do tipo de rosca.

As operações de torneamento podem ser de desbaste e de acabamento. A operação de desbaste faz a maior remoção e arranque de material, objetivando a forma e as dimensões próximas das finais, com maiores avanços e profundidade de corte (ap) para maior remoção possível visando baixos custos. A operação de acabamento visa obter na peça as dimensões finais com as tolerâncias recomendadas e a rugosidade superficial especificada, com baixa profundidade de corte (ap) e avanço coerente para conseguir a rugosidade superficial e manter a precisão de usinagem. A realização de torneamentos em menores faixas de tolerâncias dimensionais depende das variáveis:

- forma e material da peça e da ferramenta;
- condições de usinagem;
- rigidez da máquina, da ferramenta, dos dispositivos de fixação;
- geometria da ferramenta e condições de sua aresta de corte;
- uso ou não de fluido de corte.

Para obter maior precisão na peça, deixa-se sobremetal na operação de torneamento, seguida por uma operação de retificação cilíndrica para executar a dimensão e a rugosidade desejadas. Quando é necessário o tratamento térmico nas peças, a operação final de acabamento nas tolerâncias e rugosidade pode ser feita nos tornos (chamada torneamento duro), com o uso de ferramentas de CBN, ou em retificadoras, dependendo do grau de precisão requerido e da avaliação de custos de fabricação. Em várias aplicações de produção seriada, o torneamento duro tem sido mais vantajoso do que a retificação.

8.2 Características e tipos de máquinas em torneamento

Os tornos possuem características que orientam os profissionais de mecânica na seleção e indicação de uso, em relação à capacidade para os diferentes trabalhos. As características técnicas principais a serem observadas nos tornos são:

- o comprimento entre pontas é a distância máxima entre a ponta do cabeçote fixo e a ponta do cabeçote móvel todo recuado, que define o comprimento máximo de peça que se pode fixar para usinar;
- a altura das pontas em relação ao barramento é a distância do centro das pontas à face superior do barramento, que define o diâmetro de usinagem das peças fixadas em placas (diâmetro sobre o barramento);
- a altura da ponta em relação à mesa do carro transversal é a distância do centro da ponta (ou centro do eixo árvore) à face superior do carro transversal, que define o diâmetro máximo de torneamento para peças fixadas entre pontas (diâmetro sobre o carro).

Outras características importantes são: o perfil do eixo-árvore e diâmetro do furo do eixo-árvore (define o diâmetro máximo de barras que se pode trabalhar passando dentro do eixo), intervalos de rotações e máxima rotação do eixo-árvore, a potência do motor e outras, dependendo do tipo de torno. As figuras 8.6 e 8.7 mostram dois tipos de tornos, ilustrando a evolução dessa importante máquina-ferramenta.

8.2.1 Torno mecânico universal paralelo horizontal

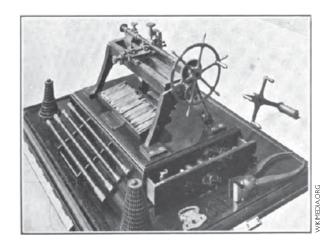


Figura 8.6
Torno do ano 1800.





Figura 8.7 Torno – ano 2010.



Desde seu surgimento, o torno teve a característica visual similar ao torno mecânico universal paralelo horizontal que ainda é utilizado, com as melhorias de formatos visando rigidez e segurança, entre outros.

A denominação dessa máquina-ferramenta deve-se ao fato de ser de acionamento mecânico, faz operações universais de torneamento, possui guias de barramento paralelas na horizontal para o movimento da ferramenta e o posicionamento da peça na horizontal. As partes principais do torno mecânico são descritas abaixo, e algumas delas são comuns em muitos modelos de tornos.

- Barramento apoiado nas colunas, o barramento forma o corpo principal
 do torno. Ele apoia o cabeçote fixo. O carro principal e o cabeçote móvel se
 movem segundo as guias prismáticas do barramento (é sua parte superior).
 Esse perfil prismático tem a função de resistir melhor à pressão do trabalho, compensar o desgaste das partes em atrito e proporcionar precisão. É
 construído de ferro fundido especial, e as guias prismáticas são endurecidas
 por têmpera superficial e, posteriormente, retificadas. A figura 8.8 mostra
 a distribuição de esforços no processo de torneamento e a altura de centro.
- Cabeçote móvel (também chamado contraponta) apoia as peças longas com a ponta rotativa, para dar suporte e estabilização ao torneamento. É útil também para fixar diretamente no mangote (peça que desliza dentro do cabeçote móvel na mesma altura de centro do eixo-árvore) as brocas nas operações de furação.
- Carro existem o longitudinal, o transversal e o manual (espera). Nesse conjunto é montada a torre porta-ferramentas. Os carros realizam os movimentos de translação das ferramentas de corte durante a usinagem.
- Caixa de roscas e avanços mecanismo no qual se ajusta e define, por alavancas, o avanço em revoluções por minuto (rpm) em que serão feitas as operações de tornear em automático e o passo da rosca para o qual será executada a operação de roscar.

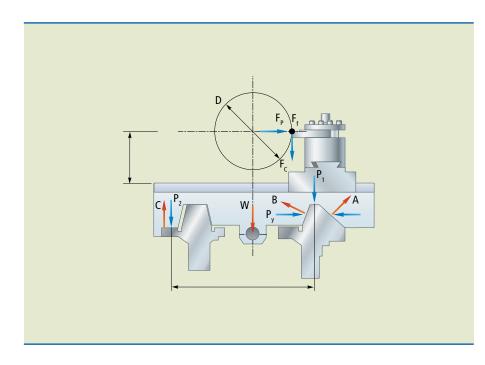


Figura 8.8Distribuição de esforços e altura de centro.

 Avental – é montado abaixo do carro principal, e nele ficam os volantes e as alavancas para acionar os carros manual ou automaticamente nos torneamentos e roscamentos.

Os anéis graduados do carro longitudinal e do transversal, da espera e do cabeçote móvel orientam o operador em relação a quanto avançar ou retroceder as ferramentas, em milímetros. A graduação acompanha uma indicação gravada do valor de cada divisão. Cada menor divisão de cada anel graduado é calculada dividindo-se o passo da rosca (PR) que movimenta a ferramenta nesses carros pelo número de divisões do anel (ND).

div = PR/ND

Os tornos convencionais são adquiridos por escolas e por oficinas em geral, para operações de torneamento em departamentos de manutenção, ferramentaria, produção e montagem. Têm baixo grau de automação e grande dependência do operador, trabalham com baixas velocidades e avanços e são usados na fabricação de pequenos lotes.

8.2.2 Tornos verticais

Possuem essa denominação porque as peças são dispostas na posição vertical, e as guias obrigam a ferramenta a fazer a trajetória vertical para a usinagem. São utilizados para usinar peças pesadas de grandes dimensões, como volantes, polias e válvulas, que ficam mais bem apoiadas em placas geralmente de 1 a 10 metros de diâmetro, podendo exceder essas medidas em casos especiais e dependendo do tamanho da máquina. Trabalham em baixas e médias velocidades e avanços, para a fabricação de pequenos e médios lotes de produção, com dependência do operador.





As versões com CNC (comando numérico computadorizado) possuem alto grau de automação mecânica e eletrônica, com menor dependência do operador. Existem, ainda, modelos atuais que acrescentam as operações de fresa e furação, como se fosse um centro de usinagem horizontal de cabeçote universal.

Figura 8.9
Torno CNC.



Existem tornos verticais com um sistema chamado *pickup*, para inverter o posicionamento do eixo-árvore e da peça, caso em que a ferramenta fica parada e o eixo-árvore faz os movimentos vertical e horizontal de posicionamento, além da rotação, para que a usinagem seja realizada. São utilizados em médias a altas séries de usinagem de peças, por exemplo, discos e tambores de freios, engrenagens e componentes de transmissão automotiva. As peças ficam posicionadas em uma esteira, são coletadas pela placa que está no eixo-árvore e devolvidas para a esteira após usinagem.

8.2.3 Torno revólver

Tipo de torno que trabalha em baixas velocidades e avanços, com grande dependência do operador. Possui torre na forma de castelo ou revólver para fixar as ferramentas, que se movimentam pelo acionamento de comandos mecânicos rápidos contra o material, realizando diversas operações de torneamento. Os tornos revólveres foram desenvolvidos para trabalhos em série em peças como parafusos, porcas etc.

8.2.4 Tornos multifusos

São tornos com vários eixos-árvore que fixam várias peças ao mesmo tempo, definindo uma estação de trabalho em cada um deles, conforme figura 8.10. As peças fixadas recebem a ação de uma ferramenta de corte, que faz uma operação igual ou diferente na peça em relação a outras estações, utilizando o mesmo tempo de usinagem. Ao final desse tempo, finda o ciclo, e os eixos-árvore deslocam-se em novo posicionamento para novo ciclo.

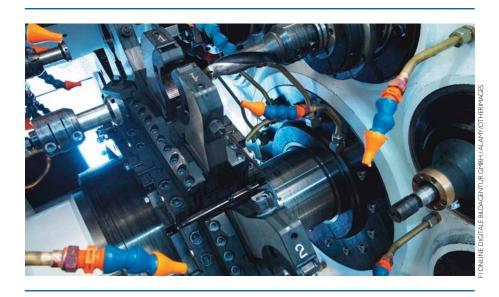


Figura 8.10

Detalhe de torno multifuso.

O tempo de preparação da usinagem é muito grande, em geral feito pelo ajuste da posição da ferramenta e montagem de cames para definir o avanço da ferramenta de corte. Esses tornos são aplicados na produção de peças de altíssima série e de perfil não complexo. Totalmente automatizados, com baixas velocidades e grande dependência do operador na preparação, em geral trabalham com barras em alimentação automática.

8.2.5 Tornos automáticos – numericamente comandados (CNC)

Com as exigências de mercado por maior qualidade, flexibilidade e menores custos de fabricação, surgiram e foram muito difundidas as máquinas de usinagem com CNC (comando numérico computadorizado). A evolução do CNC, desde sua introdução entre os anos 1940 a 1950, nos Estados Unidos, até hoje, gerou máquinas com elevada precisão, alto grau de automação eletrônica, pouca dependência do operador no aspecto físico e maior dependência quanto à concentração (figura 8.11). Essas máquinas trabalham com altas velocidades e avanços.

Nesse tipo de torno podem ser executadas usinagens de pequena, média ou alta série, de peças cortadas de barras ou diretamente com barras e o uso de acessório alimentador de barras, ou previamente forjadas ou fundidas. Hoje, esse tipo de torno é utilizado para trabalhos de ferramentaria em geral, produção e em estabelecimentos de ensino técnico.





Figura 8.11 Vista de um torno CNC.



A introdução do CNC na indústria mudou de forma radical os processos industriais. Os torneamentos cônicos e curvilíneos são facilmente executados em programação manual ou auxiliados por computador (CAM – computador no auxílio à manufatura), e a intervenção de operadores é reduzida. O CNC reduziu também o número de erros humanos, melhorou a qualidade dos produtos, diminuiu o retrabalho e o desperdício e facilitou as linhas de fabricação e montagens, tornando-as mais flexíveis.

Um tipo específico de torno CNC utilizado na indústria é o de cabeçote "tipo suíço". A matéria-prima é fornecida em barras, com o acessório de alimentador automático de barras. As peças são fixadas com pinças. O movimento de comprimento (eixo Z) é feito pela peça, que vai se soltando da pinça. O movimento de diâmetro (eixo X) é realizado pela ferramenta. As peças são em geral de pequenos diâmetros em lotes seriados, com o uso de ferramentas de tamanho apropriado, em altas velocidades. As peças prontas são separadas por ferramentas de sangrar. Esse tipo de torno é comum na produção de peças para implantes dentário ou ortopédico, próteses e outros da indústria em geral e automobilística.

8.2.6 Tornos especiais

Desenvolvidos para atender requisitos específicos na fabricação de grandes lotes de um único tipo de peça, são pouco utilizados na indústria, pois são máquinas de uso especial – linhas transfer em peças de grandes dimensões. A dependência do operador depende do grau de automatização, e as velocidades e avanços ocorrem em função do tipo de peça a que se destinam.

8.3 Fixação da peça e acessórios em torneamento

O torno tem vários acessórios, e os principais deles ajudam a prender e a fixar as peças para tornar as operações executáveis. A fixação deve ser segura, rápida e precisa. A potência do motor requerida para o corte deve ser integralmente transmitida à peça. A força necessária para uma fixação segura depende da geometria e material da peça, da ferramenta e parâmetros de corte, sem deixar marcas nem distorcer a peça. A velocidade requerida para usinar depende do tamanho e da geometria da peça, da forma e acabamento desejado, da rigidez do tipo de fixação ou do tipo de operação e ferramentas.

A escolha da fixação depende da peça, do torno e das ferramentas de corte e deve suportar o torque durante o corte do material. Os sistemas mais comuns de fixação são as placas de castanhas, as pinças, os mandris e os dispositivos especiais.

Os principais acessórios são os seguintes:

• Placa de castanhas — as placas são presas no eixo-árvore com o auxílio de flanges. Podem ser de duas, três ou quatro castanhas autocentrantes (o giro de um parafuso aciona todas as castanhas), geralmente em formatos de fixação regular. Existe uma versão com quatro castanhas independentes, cada parafuso movimentando uma castanha de cada vez, usada em peças de geometria irregular. Podem ter funcionamento de fechar e abrir manual ou automático (pneumático ou hidráulico). Utilizam castanhas integrais ou intercambiáveis. As castanhas podem ser "moles" (sem endurecimento) ou "duras" (endurecidas por têmpera), para fixações pelo interno ou externo das peças. A escolha depende, basicamente, do formato e geometria da peça e do tipo de operação. A placa autocentrante de três castanhas é a mais utilizada (ver figura 8.12). Como existem diversos tipos de placas, pelo tipo de movimento que fazem nas castanhas, eles trazem mais versatilidade nas operações de torneamento.

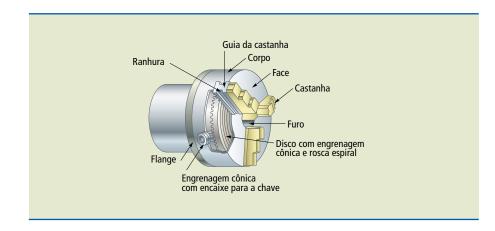
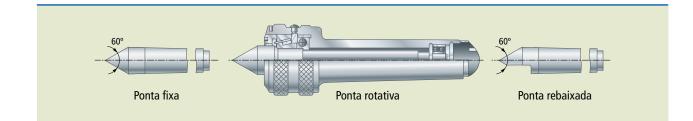


Figura 8.12
Detalhes de uma placa autocentrante.

• Ponta fixa e ponta giratória ou rotativa (figura 8.13) — são acessórios de formato cônico com 60° de abertura, endurecidos e retificados. Utilizados para apoiar peças que ficam distantes da face da placa em fixação placa e ponta, ou para fixação entre pontas. Possibilitam versatilidade na fixação entre pontas. Para seu uso, é necessário que a peça tenha furo de centro para acomodar a ponta cônica. A ponta giratória diminui o atrito com a peça, suportando esforços radiais e axiais.

Figura 8.13
Ponta rotativa.

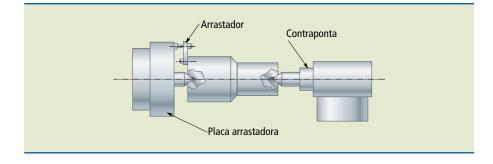






Na fixação entre pontas (figura 8.14), coloca-se a ponta fixa e a placa arrastadora no eixo-árvore. O arrastador (ou grampo de arraste) faz a função de transmitir a rotação e o torque do eixo-árvore para a peça. O esforço de corte é limitado pela rigidez do arrastador. Monta-se a ponta giratória no cabeçote móvel e ajusta-se o posicionamento do cabeçote.

Figura 8.14 Peça entre pontas.



A figura 8.15 ilustra alguns tipos de montagem de arrastadores.

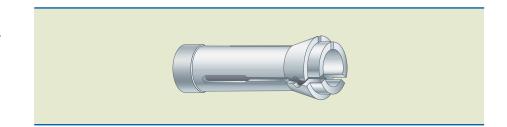
Figura 8.15Placas arrastadoras
e arrastadores.



Em usinagem seriada prefere-se a ponta com arraste (ponta com garras), em vez do arrastador. É uma ponta fixa com garras que trava na face da peça quando acionada a contraponta. O esforço de corte (profundidade de corte e avanço) é limitado pela rigidez da ponta de arraste. Substitui a placa com vantagens de redução de tempo e maior produtividade, permite a usinagem da peça em toda a sua extensão, sem necessidade de virar e fixar de novo para completar a operação.

• Pinças – substituem as placas de castanhas para fixar peças. São úteis para o torneamento de peças pequenas e de precisão, em geral associadas ao uso de material no formato de barras. Permitem a utilização de maiores velocidades de rotação e fornecem baixas deformações na peça. As pinças prendem a peça pelo externo. Para prender pelo interno das peças, é comum o uso de mandris expansivos. Tanto a pinça (figura 8.16) como os mandris expansivos são fabricados de aço mola.

Figura 8.16Pinça estacionária.



• Luneta – é um acessório usado para solucionar a fixação de peças longas (figura 8.17). Em operações executadas na peça, longe da placa de castanhas, utiliza-se a luneta fixa posicionando as pontas de contato apoiadas em porção regular da peça, em geral já torneada, devendo receber aplicação de lubrificante para reduzir o desgaste. Para tornear peças de formato muito fino e delgado, utiliza-se a luneta móvel, que reduz ou elimina a vibração e flexão da peça por causa do grande vão entre os pontos.

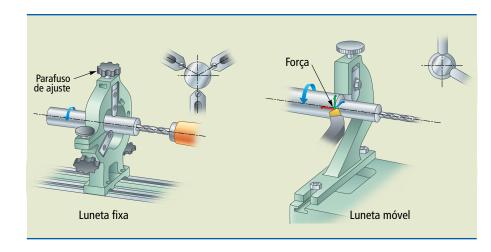


Figura 8.17Tipos de lunetas.

• Mandril porta-brocas e bucha de redução – servem para prender as brocas de haste paralela que serão usadas para furação (figura 8.18). São comprados separadamente e depois adaptados à haste cone Morse que será alojada no cone do mangote. As brocas com haste cone Morse encaixam-se diretamente no mangote. Quando as pontas rotativas, os mandris e as brocas têm haste cone Morse menor do que o cone Morse do mangote, é necessário empregar uma bucha de redução.



Figura 8.18Mandril.

8.4 Furar, roscar e recartilhar no torno

8.4.1 Furar

Em tornos convencionais são possíveis furações apenas no eixo da peça (centro da peça). As operações de furar (figura 8.19) são feitas com brocas em geral de aço rápido, com ponta cônica afiada de acordo com o material da peça. Podem ser feitas também as operações de alargar, roscar com macho e escarear.

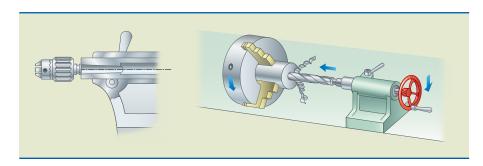




Para a operação, no início é feito o faceamento no topo da peça. Em seguida, realizam-se os seguintes passos:

- fixar a broca diretamente no cone do mangote ou em mandril, verificando se é necessário o uso de bucha de redução, com esforço para fazer pressão da haste da broca ou do mandril no cone do mangote (tomar cuidado com as mãos) ou em mandril;
- acoplar o mandril no mangote do cabeçote móvel;
- selecionar a rpm ideal em função do diâmetro da broca, da V_C recomendada para o material da broca e da peça;
- aproximar e travar o corpo do cabeçote móvel;
- ligar o torno para girar a peça contra o corte da broca, girar o volante do cabeçote móvel para fazer avançar a broca e realizar a furação no formato ideal, guiando a profundidade pelo anel graduado.

Figura 8.19 Operação de furar.

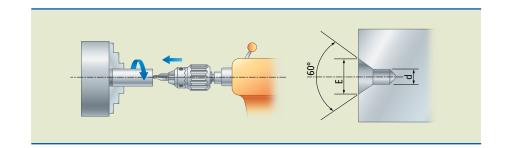


Furar centro – A operação de furar centro tem duas finalidades:

- guiar a broca, que será usada na operação de furação em cheio;
- suportar peças no torneamento externo entre pontas que são longas demais e necessitam do encosto pelo centro para poderem ser torneadas. Nesse caso, operações posteriores eventualmente também utilizarão o centro para fixação e referenciamento, como a retificação e alguns fresamentos, aumentando a responsabilidade do furo de centro quanto à qualidade da peça.

Os furos de centro simples possuem forma cônica de 60° (figura 8.20) para adaptar os cones das pontas rotativas e fixa. Podem ocorrer variações de formato com algum outro furo cilíndrico que alivia o contato das pontas. O furo de centro protegido possui, além das partes cônicas e cilíndricas do furo de centro simples, um alívio a 120° para proteger a parte cônica contra possíveis deformações por choques ou rebarbas capazes de prejudicar a centragem.

Figura 8.20 Furo para centro.



Para fazer furos de centros nas peças são usadas brocas de centrar, ou "brocas de centro". As brocas de centrar comumente utilizadas são feitas de aço rápido em medidas padronizadas. Os furos de centro devem ser proporcionais aos diâmetros das peças. A seguir, a tabela 8.2 mostra valores práticos de medidas das brocas em função do diâmetro da peça a centrar.

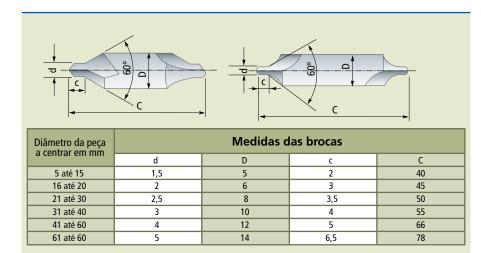


Tabela 8.2

Medidas das brocas em função do diâmetro da peça a centrar.

8.4.2 Roscar no torno

Roscar ou abrir roscas (figura 8.21) é criar sulcos ou filetes com ferramenta de corte monocortante perfilada no formato da rosca desejada (triangular, quadrada ou trapezoidal, no sistema métrico ou polegada), principalmente em superfície cilíndrica interna ou externa, ou ainda na face da peça. É necessário que a ferramenta esteja perpendicular à superfície de corte, selecionar a velocidade em rpm e o passo da rosca na caixa de roscas e avanços. Em tornos CNC esses parâmetros são programáveis, e também é possível roscar superfície externa ou interna cônica.

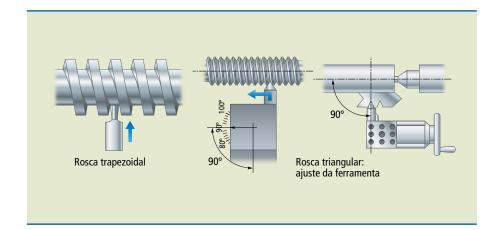


Figura 8.21
Ajuste da posição com o escantilhão.

Após o ajuste com o escantilhão, é preciso fazer uma passada de rosca em pequena profundidade para verificar o passo da rosca usando o pente de rosca.





Havendo a necessidade de fazer roscas com mais de uma entrada, primeiro executa-se uma entrada e depois se desloca no carro secundário (espera) a quantidade necessária, definida pelo passo da rosca.

Além do roscamento convencional no torno, podem ser produzidas superfícies internas roscadas com o uso de machos para roscar, fixados com adaptadores especiais no cabeçote móvel. Os sistemas de roscas são padronizados, definem as tolerâncias e dimensões gerais, como o perfil, os diâmetros, o passo da rosca (em milímetros ou fios por polegada), a altura do filete e demais características. A seguir, um resumo de indicações de roscas.

Normalização europeia

M 10 – rosca métrica de 10 mm de diâmetro nominal, passo normal – se externa, tornear com diâmetro nominal e, se interna, furar seguindo indicações de tabelas de fabricantes de machos, observando se a rosca será feita com macho convencional ou com macho para prensar ou esmagar;

M 10×1 − rosca métrica fina de 10 mm de diâmetro nominal e com 1 mm de passo;

Tr 48×8 – rosca trapezoidal métrica de 30° com 48 mm de diâmetro nominal e 8 mm de passo;

Tr 48×16-2E – rosca trapezoidal métrica, com 48 mm de diâmetro nominal, 16 mm de passo da rosca e de duas entradas à esquerda.

O passo da roscanorte-americana é fornecido em tabelas de fabricantes de ferramentas e em livros de normas.

Normalização americana

3/8" – **16 UNC-2** – rosca norte-americana grossa, diâmetro nominal de 3/8" com 16 fios por polegada (**passo** em mm é 25,4/16), da classe 2 de ajustagem;

1/4" – 20 BSW – rosca sistema Whitworth grossa, com 1/4" de diâmetro nominal e 20 fios por polegada (passo em mm é 25,4/20).

8.4.3 Recartilhar no torno

Algumas peças de constante manuseio, como cabeças dos parafusos de instrumentos de medida, por exemplo, o parafuso existente no paquímetro para travar o cursor, ou corpo de instrumentos como o calibrador de furo, precisam ter pequenos sulcos de geometria regular na superfície, para torná-las mais rugosas e facilitar o uso.

Com a recartilhadora, composta de roletes em aço temperado extremamente duros chamados recartilhas, aplica-se grande pressão no material da peça. Monta-se a recartilhadora no porta-ferramenta da mesma forma que uma ferramenta comum do torno, observando a altura de centro e girando a peça em baixa rotação. Os roletes giram pela rotação da peça e, como estão firmemente pressionados contra ela, imprimem o desenho na superfície. Um comprimento maior do que a largura dos rolos pode ser obtido engatando o automático do carro e

deslocando a quantidade necessária. A execução da operação é feita com muita pressão da ferramenta na peça. Os roletes devem estar inclinados cerca de 3º no contato com a superfície em operação. Alguns cuidados precisam, ainda, ser tomados, como:

- dosar a pressão, executar vários passes para não deformar as peças;
- centralizar a peça corretamente na placa;
- certificar-se de que o furo de centro e a ponta rotativa não estão deformados, para que a peça não gire excentricamente;
- escolher de forma correta a recartilha.

8.5 Seleção da ferramenta e máquina no torneamento

Para selecionar a máquina e as ferramentas no torneamento, é necessário conhecer as informações abaixo:

- Geometria da peça (dimensões ± tolerâncias)
- Material da peça
- Tamanho do lote
- Prazo do lote
- Relação L/D (comprimento pelo diâmetro da peça L/D > 1,5 usar contrapontas)
- Grau de complexidade
- Grau de desbalanceamento
- Quantidade de operações

- Quantidade de ferramentas necessárias
- Dispositivos e acessórios disponíveis
- Qualidade da rugosidade superficial

8.6 Ferramentas para tornear

Há milhares de anos, a humanidade servia-se de instrumentos de punho, usados como armas ou ferramentas, para cortar e trabalhar materiais. Esses instrumentos, empregados para cortar, arrancar ou partir, sempre tiveram forma de cunha.

Quanto mais agudo o ângulo da cunha, menor é o esforço para fazer a cunha penetrar no material trabalhado. Portanto, a abertura do ângulo da cunha tem importância decisiva na eficiência da ferramenta de usinagem.

Analogamente, uma peça, quando é forçada contra uma ferramenta cuja parte ativa tenha forma cônica (cunha), recalca o material contra as faces da cunha, e a penetração da cunha ocorre na direção da mínima resistência oferecida pelo material. Se a cunha se move paralelamente à superfície do trabalho, o material se solta com maior facilidade. A figura 8.22 mostra ferramentas e formatos de cunha.





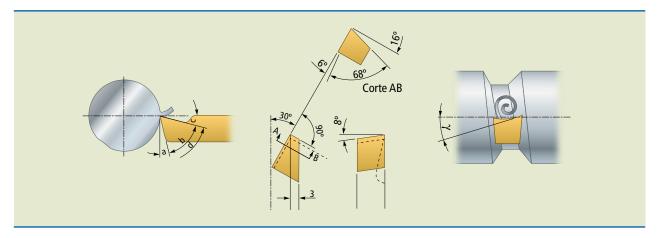
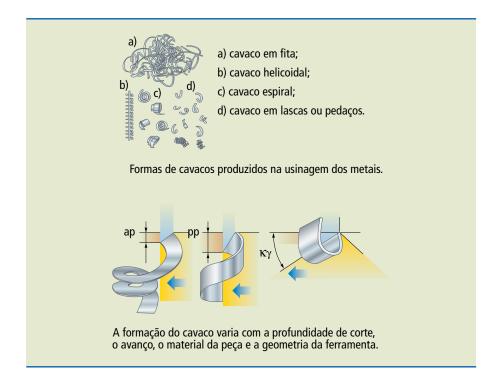


Figura 8.22Ferramentas e formatos de cunha.

O material que se solta é o cavaco, e o tipo de material cortado define o tipo de cavaco para a mesma geometria da ferramenta. Por exemplo, no ferro fundido, não existem ligações entre os cavacos retirados. Nesse caso, formam-se cavacos muito pequenos, porque o material é quebradiço. No trabalho com materiais mais tenazes, por exemplo, o aço de baixo carbono, os cavacos agarram-se uns aos outros, formando verdadeiras fitas de aço. Na figura 8.23 podem ser vistos diferentes tipos de cavacos.

Figura 8.23Diferentes tipos de cavacos.



Para o controle dos cavacos, utilizamos os ajustes dos parâmetros de corte e a tecnologia dos quebra-cavacos nas ferramentas, afiadas nas pontas ou sinterizadas quando são usadas as pastilhas intercambiáveis. A figura 8.24 demonstra os efeitos da profundidade de corte e avanço na forma dos cavacos em usinagem de aço ABNT 1045.

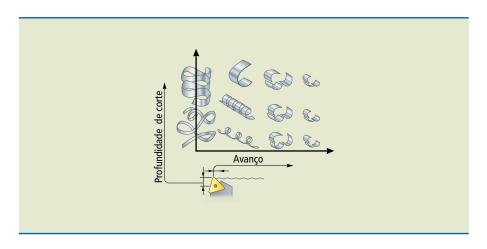


Figura 8.24
Efeito da profundidade de corte e do avanço na forma do cavaco.

Existem diversos tipos de ferramentas de corte para tornear. A ferramenta inteiriça de aço rápido é um pequeno prisma ou uma lâmina, com aproximadamente 10% de cobalto, chamado *bits* (vem de palavra inglesa, que significa "pedaço"). O *bits* é fixado nos suportes reto ou inclinado, e esse suporte por sua vez é preso na torre porta-ferramenta da máquina. Outra ferramenta tem ponta soldada de carboneto (metal duro). Em ambos os casos, se a ferramenta se desgasta, é possível a reafiação. A figura 8.25 ilustra um exemplo de geometria da ferramenta de tornear e mostra os principais ângulos da ferramenta inteiriça.

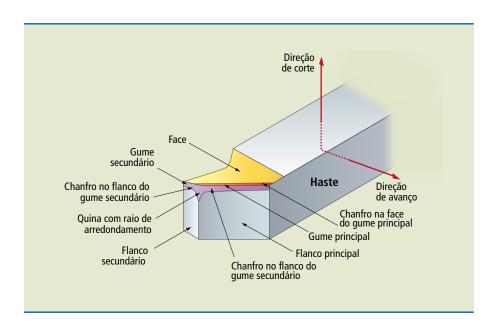


Figura 8.25Geometria da ferramenta de tornear.

Pelo efeito de praticidade e produtividade, são largamente utilizadas as pastilhas, ou insertos intercambiáveis (figura 8.26), que são presas em suportes fixados na torre porta-ferramentas. Existem os insertos fabricados com os materiais metal duro, cermet, cerâmica, CBN, PCD. A seleção e indicação de uso estão descritas no capítulo 6 deste livro. Basicamente, o tipo de material da peça, as condições de dureza e forma geométrica, o tipo de operação a ser executado, nível de exigência e outros definem o tipo de material dos insertos.





Figura 8.26 Inserto intercambiável.

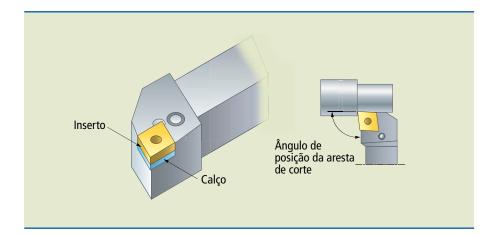
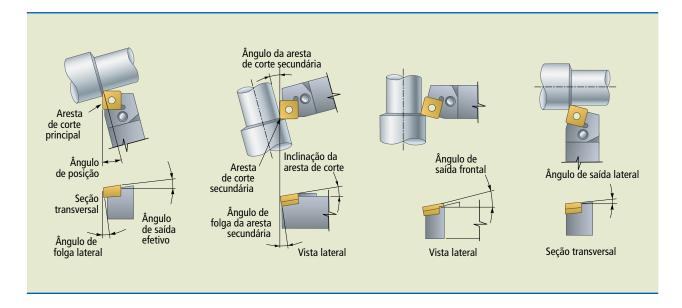


Figura 8.27 Ângulos decorrentes do uso de insertos.

Os ângulos decorrentes do uso de insertos são ilustrados na figura 8.27.



O ângulo de folga é o ângulo entre a superfície usinada e o flanco principal do inserto. Ele impede o contato do flanco principal do inserto com o material.

O ângulo de saída é por onde o material escoa e forma as aparas ou pedaços chamados de cavaco. Ele determina a agudez da ferramenta e é formado entre o plano perpendicular à superfície usinada e a face de saída do inserto. A importância dele está na influência que exerce sobre a resistência ao corte.

O ângulo de saída negativo possui ângulo entre a face de saída e o flanco principal de 90° e permite usar as duas faces ou lados do inserto, definindo insertos negativos. O ângulo de saída positivo possui, entre a face de saída e o flanco principal, ângulo menor que 90° e permite usar apenas uma face ou lado do inserto, definindo insertos positivos. Os insertos positivos são usados em geral em operações de acabamento que requeiram menor esforço de corte para não deformar a peça, caso de usinagens de furos muito precisos (figura 8.28).

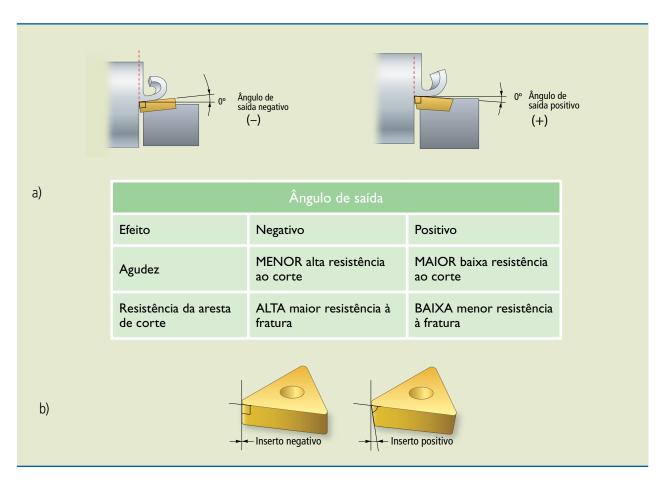


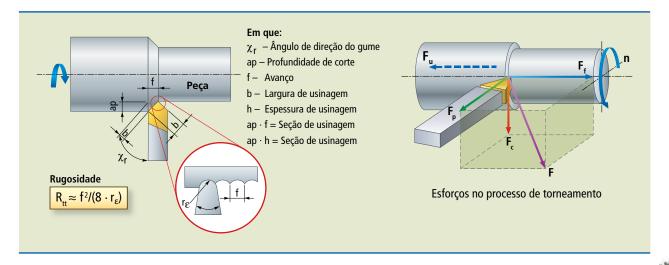
Figura 8.28

- a) Ângulos de saída positivo e negativo e seus efeitos;
- b) inserto positivo e negativo.

8.7 Cinemática do torneamento

A figura 8.29 mostra os esforços que aparecem no processo de torneamento.

Figura 8.29Esforços no processo de torneamento.







Solicitações na cunha de corte – forças na usinagem

A força de usinagem (F_u) depende de condições de corte (f, vc, ap), geometria da ferramenta, desgaste da ferramenta, uso de refrigerantes e outros.

Esforços no processo de torneamento

 F_C = força de corte; F_f = força de avanço; F_D = força passiva.

A força de corte é o principal fator no cálculo da potência necessária de usinagem. Sua magnitude depende principalmente do material a ser usinado, das condições efetivas de usinagem, da seção de usinagem e do processo.

A equação fundamental da força de corte, também denominada de equação Kienzle, relaciona as constantes do processo de usinagem com o material a ser usinado.

8.8 Requisitos de potência para o torneamento

É necessário que a potência de corte seja menor do que a potência disponível no motor da máquina. Caso ela seja igual ou maior, o eixo-árvore da máquina deixará de girar pela sobrecarga, danificando a ferramenta. Dessa forma, calcula-se a potência de corte no torneamento pela expressão a seguir, válida para ângulo de posição de 90°:

$$P_{c} = \frac{K_{s} \cdot av \cdot ap \cdot V_{c}}{4500 \cdot \eta}$$

em que:

 P_C = potência de corte (CV)

 K_S = pressão específica de corte (kgf/mm²)

ap = profundidade de corte (mm)

av = avanço (mm/rpm)

 V_C = velocidade de corte (m/min)

 η = rendimento. Exemplo:

transmissão direta = 0,9

transmissão por correia = 0,75

Os valores de K_S são determinados em laboratório. Existe uma lista extensa para cada tipo de material e, ainda, fatores diversos de correção da força de corte e potência de corte (P_C). A tabela 8.3 mostra alguns valores de K_S para o cálculo da potência de corte (N_C).

8.9 Considerações importantes

A velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte são os parâmetros que afetam a taxa de material removido e a vida da ferramenta. Um aumento deles aumenta a taxa de remoção de material, mas diminui a vida da ferramenta.

Tabela 8.3Valores de K_s para o cálculo da potência de corte.

	Resistên	"K _s " em kg/mm²						
Material	Du	reza BRINELL	Avanço em mm/rotação					
	kg/mm²	НВ	0,1	0,2	0,4	0,8		
SAE 1010 a 1025	Até 50	Até 140	360	260	190	136		
SAE 1030 a 1035	50 a 60	140 a 167	400	290	210	152		
SAE 1040 a 1045	60 a 70	167 a 192	420	300	220	156		
SAE 1065	75 a 85	207 a 235	440	315	230	164		
SAE 1095	85 a 100	235 a 278	460	330	240	172		
Aço fundido mole	30 a 50	96 a 138	320	230	170	124		
Aço fundido médio	50 a 70	138 a 192	360	260	190	136		
Aço fundido duro	Acima de 70	Acima de 192	390	286	205	150		
Aço Mn-Aço Cr-Ni	70 a 85	192 a 235	470	340	245	176		
Aço Cr-Mo	85 a 100	235 a 278	500	360	260	185		
Aço de liga mole	100 a 140	278 a 388	530	380	275	200		
Aço de liga duro	140 a 180	388 a 500	570	410	300	215		
Aço inoxidável	60 a 70	167 a 192	520	375	270	192		
Aço ferramenta (HSS)	150 a 180	415 a 500	570	410	300	215		
Aço manganês duro			660	480	360	262		
Ferro fundido mole		Até 200	190	136	100	72		
Ferro fundido médio		200 a 250	290	208	150	108		
Ferro fundido duro		250 a 400	320	230	170	120		
Fofo maleável (temp)			240	175	125	92		
Alumínio		40	130	90	65	48		
Cobre			210	152	110	80		
Cobre com liga			190	136	100	72		
Latão		80 a 120	160	115	85	60		
Bronze vermelho			140	100	70	62		
Bronze fundido			340	245	180	128		





A **profundidade de corte** (ap) é o parâmetro que menos afeta a vida da ferramenta. Aumentos de 50% na ap reduzem em cerca de 15% a vida da ferramenta. Aumentar a ap é o melhor método para aumentar a taxa de remoção de material. Os fatores limitantes ao aumento da profundidade de corte são:

- quantidade de material a ser removido;
- potência disponível na máquina e rigidez do sistema máquina-peça--ferramenta;
- capacidade da ferramenta;
- acabamento superficial, forma da peça e precisão requerida.

Avanço – tem grande efeito sobre a vida da ferramenta, pois 50% de aumento na taxa de avanço provoca redução de até 60% na vida da ferramenta. Aumentos no avanço são limitados pela máquina-ferramenta, dados técnicos da peça, requisitos de qualidade superficial e rigidez para suportar as forças de corte.

Acabamento superficial – o avanço tem o maior impacto sobre a qualidade superficial. O aumento no raio de quina ou redução no avanço melhora a qualidade da superfície. Selecionar o avanço (produtividade/vida) coerentemente é importante, tanto quanto selecionar o raio de quina corretamente, visando a rugosidade necessária.

Velocidade de corte (V_C) – tem o maior efeito sobre a vida da ferramenta. A seleção da V_C é crítica. No geral, 50% de aumento na velocidade de corte resulta em 90% de perda na vida da ferramenta. Um aumento na V_C é o meio menos desejável para aumentar a produtividade. Materiais de corte como metais duros revestidos, cerâmicas, diamante policristalino e CBN têm boas propriedades a altas velocidades de corte. Uma alta V_C pode gerar problemas de vibração, reduzir a vida de componentes da máquina e colocar em risco a segurança. É recomendável avaliar com o fabricante da ferramenta qual a melhor V_C para a aplicação desejada.

Criteriosas considerações devem ser feitas a respeito de aumentos na produção e custos por peça. Recomenda-se fazer alteração em um parâmetro por vez quando for solicitado mudar as condições de produtividade e vida da ferramenta, para saber qual parâmetro está realmente influenciando no resultado final.

Para o cálculo da rpm, usar:

$$N = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

em que:

 V_C = velocidade de corte (m/min)

D = diâmetro de torneamento (mm)

 $\pi = 3.14$ (constante)

N = rotação do eixo-árvore (rpm)

Para o cálculo da velocidade de avanço (V_A) em torneamento, usar:

 $V_A = f \cdot rpm$, com $V_A = mm/min$; $f \in o$ avanço da ferramenta em mm por rpm.

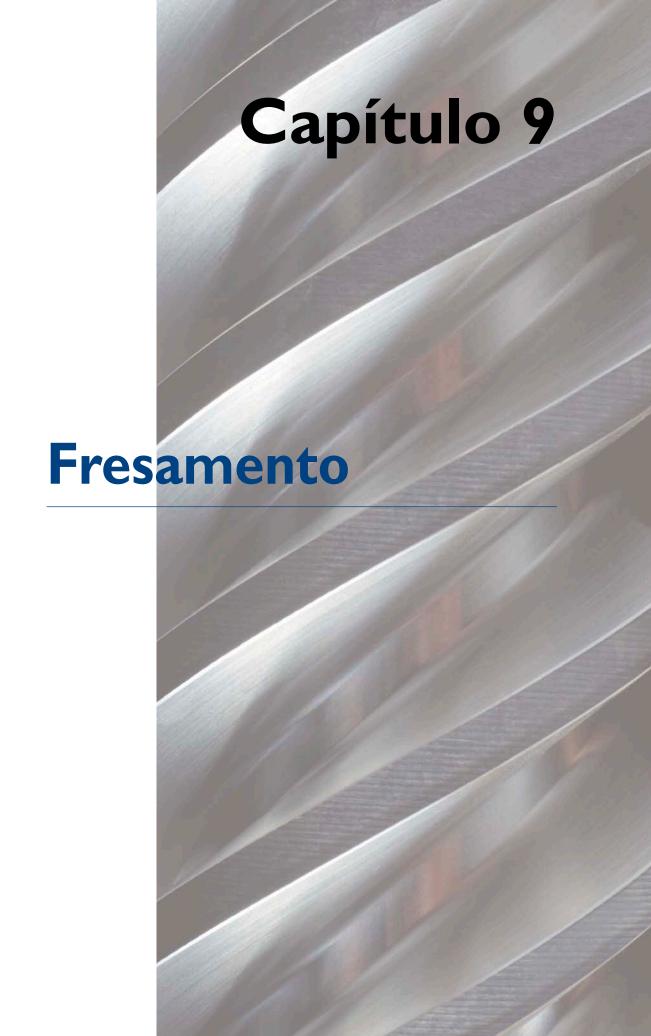
O cálculo do tempo (t) de usinagem, em minutos, é dado pelo espaço percorrido pela ferramenta em milímetros dividido pela velocidade de avanço:

$$t = \frac{\text{espaço (mm)}}{V_A}$$

Ao trabalhar no torno mecânico ou CNC, o operador deve estar plenamente capacitado para trabalhar com a máquina-ferramenta. Precisa usar os EPIs de forma adequada, não manusear os cavacos e verificar as condições de uso em geral, evitando assim acidentes.







a operação de fresamento é a ferramenta que gira para efetuar o corte. O fresamento surgiu após o ano de 1910, com a necessidade de usinar superfícies planas prismáticas. A fresadora, que executa a operação de fresar, é a máquina-ferramenta que permite usinar a peça em dois ou mais eixos (lineares ou giratórios). Permite a execução facilitada de peças prismáticas, enquanto o torno opera principalmente com peças rotacionais, de revolução.

A realização da operação de fresamento é feita por diversos tipos de empresas, como:

- ferramentarias em geral, sobretudo pelo segmento de moldes e matrizes;
- fabricantes de componentes aeroespaciais;
- empresas do setor de autopeças;
- montadoras de veículos automotores diversos, entre outras.

A operação de fresamento é também executada, hoje em dia, em centros de usinagem horizontal e vertical, em máquinas de usinagem cinco eixos, centros de torneamento e em máquinas multitarefas. O fresamento em cinco eixos é aplicado principalmente na produção de componentes complexos, como os componentes de turbinas, e na fabricação de protótipos e ferramentarias.

9.1 Definições em fresamento

Com a máquina fresadora, mais as ferramentas e dispositivos necessários, é possível usinar grande diversidade de produtos, pois ela permite trabalhar com ampla variedade de peças e superfícies.

Na operação de fresamento, a ferramenta de corte multicortante, chamada fresa, faz a retirada do sobremetal da superfície de uma peça, na forma de cavaco. O objetivo é formar superfícies planas, retilíneas ou prismáticas, simples ou complexas, com a forma, dimensão, tolerância e acabamento desejados.

O movimento de corte (figura 9.1) ocorre pela combinação de dois movimentos, realizados ao mesmo tempo. Um, é o de rotação da fresa, em geral no sentido horário, atendendo à condição do corte da ferramenta, de encontro ao material. O outro movimento é o de translação, também chamado velocidade de avanço de usinagem, feito de acordo com a característica de cada máquina. Muitas vezes o avanço é feito pela mesa da máquina onde é fixada a peça a ser usinada, e em outras ocasiões é executado pela própria ferramenta. Resumindo, a rotação da

fresa e o movimento de avanço entre a peça e a fresa tornam possíveis a operação de usinagem, realizando a forma e dimensão desejadas. A fresa remove o material pelo efeito cunha das arestas de corte.

Em programação CNC, considera-se que é sempre a ferramenta que se desloca linearmente ao elaborar o programa de usinagem, embora não seja dessa forma que acontece fisicamente na máquina.

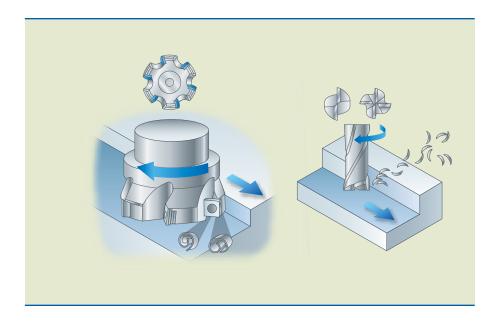


Figura 9.1
Operações de fresamento e detalhe frontal possível das fresas: aqui é demonstrada a rotação em sentido horário e movimento de avanço da peça.

A fresa é uma ferramenta multicortante, e as superfícies de corte estão, em geral, distribuídas simetricamente ao redor de um eixo. Os movimentos de rotação ao redor de seu eixo e o de translação (avanço) permitem que cada uma das arestas cortantes, chamadas dentes ou facas, retire a parte do material que lhe compete nessa combinação de rotação e translação.

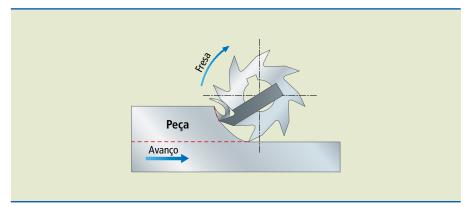


Figura 9.2
Comparativo do fresamento com o torneamento.

Na figura 9.2, a representação mais escura simboliza um comparativo com a ferramenta de torneamento. Nessa ilustração, seriam oito ferramentas de tornear "girando" ao redor do eixo. Porém, em fresamento, são oito dentes ou facas executando a operação. Isso resulta em maior rapidez para gerar as diversas superfícies.





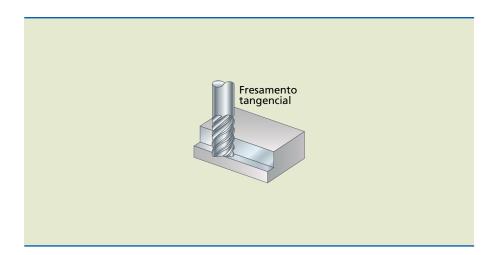
O fresamento é uma operação que consegue expressiva tolerância dimensional e geométrica e acabamento superficial na faixa de Ra = 1,0 a 6,3 μ m. A rugosidade é influenciada por vários motivos, entre eles o estado geral da fresa, da máquina e da fixação, a profundidade de corte, o avanço e a rotação aplicados e, ainda, o sentido de movimento de usinagem. Valores mais restritos de tolerâncias e de rugosidade superficial — até pouco menor do que Ra 1,0 μ m — são conseguidos com certas geometrias de fresas com pastilhas intercambiáveis alisadoras em aplicações de processos bem estáveis, com baixa profundidade de corte e com avanço e rotações adequados.

A operação pode ser classificada segundo a disposição dos dentes da fresa, como segue.

• Fresamento tangencial (figura 9.3) – é a operação em que os dentes da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta; nesse caso, o eixo da fresa é paralelo à superfície gerada. As fresas são chamadas cilíndricas.

Figura 9.3

Fresas de topo inteiriças podem fresar tangencial e frontalmente pelo corte no topo: fresamento tangencial.



• Fresamento frontal – é a operação em que os dentes da fresa estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa está posicionado perpendicular à superfície gerada. Por isso, é comum chamar de fresa de topo ou frontal e, ainda, fresa de facear.

As fresas de topo em geral podem executar o corte tangencial e frontal, segundo a geometria lateral e frontal da fresa. Nas fresas com pastilhas intercambiáveis, é possível utilizar pastilhas tangenciais ou radiais, no caso das fresas cilíndricas.

Levando em consideração o movimento de avanço e de rotação da ferramenta, distinguem-se dois tipos de movimento de usinagem: concordante e discordante entre peça e ferramenta. Eles diferenciam-se no grau de acabamento da superfície produzida, entre outros fatores.

• Fresamento concordante – é o fresamento em que o movimento de avanço da peça e de rotação da fresa estão no mesmo sentido. O cavaco gerado começa no máximo e vai-se reduzindo a zero (figura 9.4).

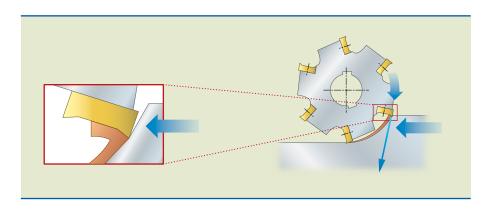


Figura 9.4
Fresamento concordante.

• Fresamento discordante – é o fresamento em que o movimento de avanço da peça é feito contra o movimento de rotação da fresa. O cavaco gerado começa em zero e vai aumentando ao máximo, segundo o valor de avanço (figura 9.5).

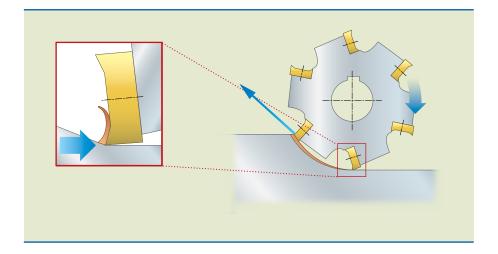


Figura 9.5Fresamento discordante.

É preferível o fresamento concordante por oferecer maior vida útil à ferramenta de corte, sempre que a máquina fresadora, o dispositivo, o formato da peça e a operação permitirem. A restrição da fresadora em realizar movimento concordante é porque, na maioria das máquinas, o avanço da mesa baseia-se em uma porca e um parafuso, que com o tempo de uso se desgastam fazendo surgir uma folga entre eles (figura 9.6).

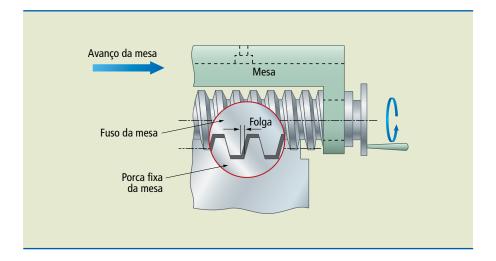
No fresamento concordante, a folga é empurrada pelo dente da fresa no mesmo sentido de deslocamento da mesa e ocorrem movimentos irregulares que prejudicam o acabamento da peça e podem danificar o dente da fresa. No fresamento discordante, a folga não influi no deslocamento da mesa, que tem movimento de avanço mais uniforme, fato que proporciona melhor acabamento da peça.

Nas fresadoras CNC e centros de usinagem praticamente não há problemas em utilizar o movimento concordante, adotado pela vantagem de maior vida da ferramenta. Em fresadoras convencionais, em geral aplica-se o movimento discordante.





Figura 9.6 Folga entre fuso e porca.



9.2 Ferramenta para fresar

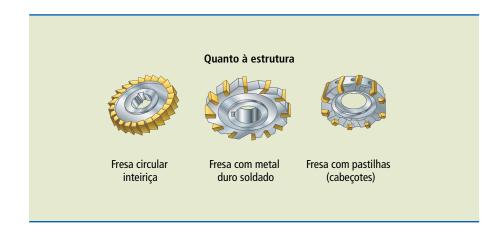
As fresas podem ser classificadas quanto à estrutura ou construção, quanto à forma e quanto à fixação.

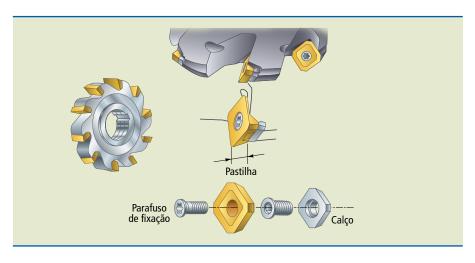
9.2.1 A estrutura das fresas

Quanto à estrutura ou construção, as fresas podem ser **inteiriças**, quando a ferramenta é toda construída de um mesmo material. Os materiais mais empregados são o aço rápido e o metal duro, nos formatos de fresa cilíndrica, de perfil e de topo. Há também a fresa com pontas soldadas, com o corpo da ferramenta construído de um material mais simples, e os gumes de corte soldados ao corpo, geralmente, de metal duro.

Existem também as fresas com **dentes postiços**, conhecidas como cabeçotes de fresamento, nas quais os dentes são pastilhas e insertos reversíveis de metal duro, CBN, diamante ou cerâmicos fixados por parafusos, pinos ou garras de fácil substituição em caso de quebra ou desgaste. A figura 9.7 mostra três tipos de fresas, e a figura 9.8 ilustra uma fresa com dentes postiços (pastilhas), comparada com metal duro soldado.

Figura 9.7 Tipos de fresas.





9.2.2 Tipos de fresas

A escolha do material da pastilha basicamente depende do tipo, dureza e formato do material da peça, da operação a ser executada, das características da máquina e tipo de fixação, das exigências de tolerâncias e rugosidade e das exigências de produtividade.

Nas condições de trabalho atuais, em que são requeridas maiores velocidades, os dentes da fresa que não estão trabalhando após cada corte, quando a fresa rotaciona, estão sendo resfriados com o ar frio. O processo, então, gera alto calor no instante do corte, refrigera logo após, configurando choques térmicos, o que obriga os fabricantes das fresas a introduzir classes que suportem severas condições de trabalho e geometrias que maximizem o desempenho da ferramenta.

Os materiais empregados para o fresamento precisam resistir à severidade das operações quanto a resistências térmica e mecânica a esforços alternantes elevados. Os fabricantes desenvolvem alternativas de novos formatos e ângulos, objetivando principalmente o ângulo mais positivo, mas preocupando-se com a resistência da pastilha aos choques mecânicos e térmicos. Em resumo, os materiais para usinar em fresamento são mostrados na tabela 9.1.

Material da peça	Material da ferramenta
Aço	Aços rápidos e metal duro
Fofo, metais não ferrosos, plásticos e aços temperados	Metal duro
Aços HB < 300	Cermets
Desbaste de fofo	Cerâmicas de Si ₃ N ₄
Fofo cinzento, fofo duro, aços para cementação, aços de beneficiamento, aços temperados	Cerâmicas óxidas mista
Aços para beneficiamento de alta resistência (HRC > 45)	CBN

Figura 9.8
Fresa de dentes
postiços e detalhe da
fixação da pastilha.







9.2.3 A forma das fresas

Quanto à forma, as fresas são cilíndricas, cônicas ou perfiladas (figura 9.9). Os cilindros mais estreitos são chamados fresa de disco, os mais alongados, em geral, fresa de topo.

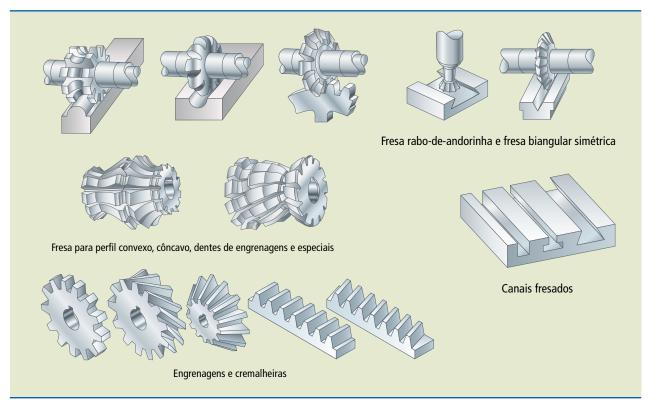
Figura 9.9Tipos de fresas classificadas quanto à forma.



As fresas cônicas são empregadas, por exemplo, para fazer prismas chamados rabos-de-andorinha. Em geral as fresas para rabo-de-andorinha possuem haste incorporada.

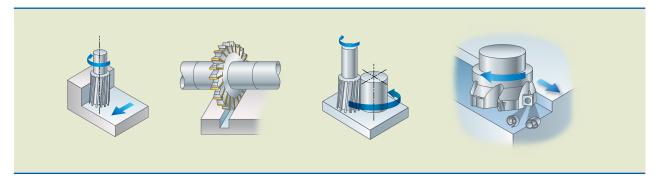
As fresas de forma possuem o perfil de seus dentes preparados para gerar superfícies especiais, como dentes de engrenagens e cremalheira (fresa módulo), superfícies côncavas ou convexas e raios de concordância. São utilizadas também para abrir canais e usinar perfis em ângulo, tais como rasgos prismáticos e encaixes tipo rabo-de-andorinha, para fazer rasgos de chaveta, ranhura reta ou em perfil T para encaixe da porca de mesmo formato e outras formas específicas de cada caso. São denominadas fresas especiais e, em geral, encomendadas em empresas especializadas em ferramentas. O conjunto de desenhos mostrado na figura 9.10 ilustra várias dessas fresas.

Figura 9.10Diferentes tipos de fresas.



Fresas planas – empregadas para gerar superfícies planas, abrir rasgos e canais (figura 9.11).

Figura 9.11
Fresas planas.

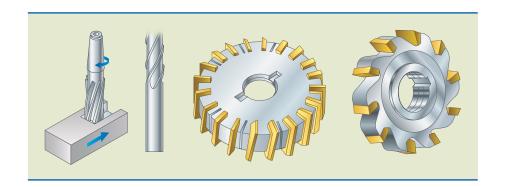


Fresas para materiais mais macios – precisam ter ângulo de cunha menor (positivas) e canais polidos para facilitar a saída de cavacos. O aumento do ângulo de cunha deixa os dentes menos resistentes, colocando-se menos dentes na ferramenta. São utilizadas em ligas de alumínio e outros materiais não ferrosos, empregados na indústria aeroespacial, de autopeças e outros.

Fresas para usinar materiais duros – os dentes devem ser fabricados com ângulo tendendo a negativo, pois cada dente da fresa vai remover pouco desse material mais resistente. São muito utilizadas na usinagem de moldes e matrizes em tecnologia HSC (*high speed cutting*), removendo pouca profundidade de corte com maiores avanços em materiais endurecidos por tratamento térmico. São usadas nas fresadoras copiadoras, nas fresadoras e centros de usinagem com CNC realizando formatos complexos.

9.2.4 A fixação

Quanto à fixação, as fresas possuem haste cônica ou cilíndrica (com ou sem rasgo Weldon), e fresas para mandril com chaveta longitudinal ou transversal, como mostradas na figura 9.12.



Quanto ao **sentido de corte**, observado pelo lado do acionamento das máquinas (de cima para baixo), as fresas mais largamente utilizadas são de corte à direita (sentido horário).







Figura 9.13
Fresas tipo Weldon, de haste e bi-helicoidal.

Os **dentes** podem ser retos, helicoidais ou bi-helicoidais. Os dentes helicoidais causam menor vibração durante a usinagem, pois não atingem a peça de uma só vez, como acontece com os dentes retos, ficando o corte mais suave. Os dentes helicoidais geram uma força axial e, para compensar essa força, recorre-se a uma fresa bi-helicoidal, ou seja, uma ferramenta que possui um dente afiado em um sentido e o dente seguinte afiado no sentido inverso (figura 9.13).



9.3 Tipos e característica de fresadoras

As fresadoras recebem a classificação de acordo com a posição de seu eixo-árvore em relação à mesa de trabalho. A ferramenta é fixada no eixo-árvore e a peça, na mesa de trabalho. A fresadora pode ser horizontal, vertical e universal. É horizontal, por exemplo, quando seu eixo-árvore é paralelo à mesa da máquina.

Uma das principais características da fresadora é usinar superfícies diversas situadas em planos paralelos, perpendiculares, ou formando ângulos diversos: construir ranhuras circulares, elípticas, realizar fresagem em formas esféricas, côncavas e convexas, com rapidez e precisão. Algumas outras características importantes da máquina fresadora:

- comprimento e largura da mesa, possibilidade de troca e giro da mesa;
- máximo deslocamento longitudinal e transversal da mesa, máximo deslocamento vertical do suporte da mesa, máxima altura da superfície da mesa em relação ao eixo principal (essas características definem o máximo tamanho de peça);
- maior e menor número de rpm (velocidade) do eixo principal e potência do motor;
- valor dos avanços da mesa em mm/min;
- peso que a máquina suporta sobre a mesa.

O conhecimento dessas características auxilia na hora de identificar a máquina nos catálogos comerciais, nos quais são explicadas com detalhes. A figura 9.14 mostra dois tipos de fresadoras, uma vertical e outra horizontal.

Fresadora horizontal

Nesse tipo de máquina, o eixo-árvore ocupa a posição horizontal, paralela à superfície da mesa. A peça é presa a um divisor ou a uma morsa e pode se deslocar em direção horizontal, longitudinal ou transversal. O deslocamento na altura pode ser feito pela mesa ou pelo cabeçote, dependendo da máquina.

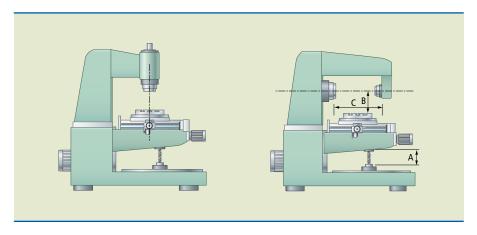


Figura 9.14
Fresadora vertical e
fresadora horizontal

Fresadora vertical

O eixo-árvore ocupa posição vertical, perpendicular à superfície da mesa da máquina. A peça pode se deslocar em direção horizontal, longitudinal ou transversal. O deslocamento na altura é feito pela mesa. Sua fixação também pode ser por meio de um divisor ou de uma morsa.

Fresadora universal

Possui vários acessórios especiais: eixo porta-fresas, cabeçote universal, cabeçote divisor e contraponta, mesa circular e mesa inclinável. Os movimentos da peça podem ser: na direção dos três eixos, rotacionais nos dois sentidos ou simultâneos. Permite gerar diversos formatos na peça. É considerada uma máquina muito versátil e pode ser também vertical ou horizontal. A figura 9.15 mostra uma fresadora universal.

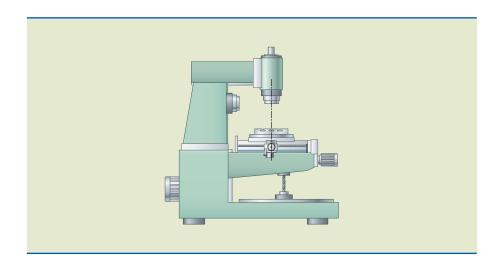


Figura 9.15
Fresadora universal

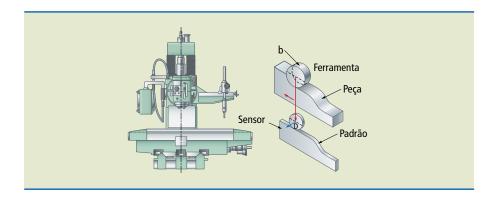
Outras fresadoras

Há outros tipos de fresadoras, por exemplo, copiadora, cortadora de rodas dentadas e engrenagens, ferramenteira, pantográfica, portal etc. A figura 9.16 mostra uma fresadora copiadora.





Figura 9.16 Fresadora copiadora.



A **fresadora copiadora** realiza o fresamento, enquanto um dispositivo percorre um modelo para fresar copiando seu formato. A fresadora **pantográfica** também usina com base em um modelo, a diferença é que realiza detalhes que a copiadora não consegue.

9.3.1 Fresadora ferramenteira e fresadora portal

A fresadora ferramenteira (figura 9.17) destaca-se pela versatilidade, precisão e rendimento com auxílio de régua e indicador digital. Pode ser usada como fresadora vertical, com alguns recursos de movimento em seu cabeçote vertical girando no sentido dos eixos X, Y e Z. Em alguns momentos, pode ser operada como fresadora horizontal, montando-se nela um cabeçote especial que aciona o eixo horizontal. É possível montar em seu cabeçote: mandril porta-pinça, mandril universal ou de aperto rápido. A fresadora portal destaca-se por permitir fixar peças longas, por causa do maior comprimento da mesa, e altas, pela característica de fixação da ferramenta. Como exemplo de uso, são as usinagens de pequenas e médias séries, em ferramentarias de moldes de para-choque e outras matrizes de forjamento.

A fresadora CNC realiza os movimentos programados em três eixos: X, y e Z. É muito utilizada na fabricação de moldes e necessita de programação com auxílio de computação CAM – computador no auxílio a manufatura.

Figura 9.17 Fresadora ferramenteira.



Existem ainda os centros de usinagem horizontal, os centros de usinagem vertical e máquinas transfer, que realizam operações de fresamento.

A figura 9.18 mostra um centro de usinagem horizontal, com o operador atuando na carga e descarga de peças de um pallet, enquanto o outro pallet está em operação de usinagem.



Figura 9.18
Centro de usinagem horizontal.

9.4 Parâmetros de corte no fresamento – cálculos

Os principais parâmetros de corte no fresamento são:

 V_C = velocidade de corte (m/min); f_z = avanço por dente (mm/z) (figura 9.19);

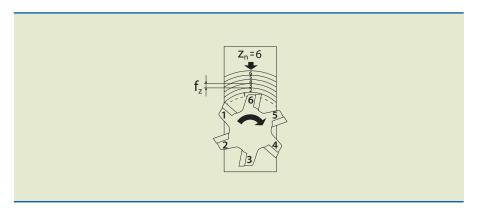


Figura 9.19 Avanço por dente (f_z) .





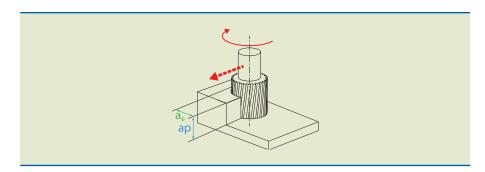
 V_f = avanço da mesa (mm/min);

f_n = avanço por rotação (mm/rpm);

a_e = profundidade de corte radial (mm) (figura 9.20);

ap = profundidade de corte axial (mm) (figura 9.20);

Figura 9.20
Profundidades de corte
radial (a_e) e axial (ap).

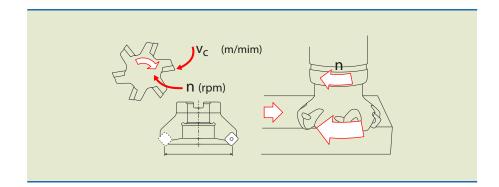


D_C = diâmetro da fresa;

n = rotação da ferramenta (rpm) (figura 9.21);

Q = taxa da remoção de cavacos (cm³/min).

Figura 9.21
Velocidade de corte
(V_C [m/min]) e da
ferramenta (n [rpm]).



Por exemplo, para os cálculos em fresamento:

Dados: $V_c = 225 \text{ m/min}$; $D_c = 125 \text{ mm}$.

Cálculo:

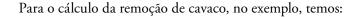
$$h = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} = \frac{225 \cdot 1000}{3,14 \cdot 125}$$

 $\eta \cong 575 \text{ rpm}$

Ainda, se $f_z = 0.21$ mm; $Z_N = 5$; ap = 4 mm; $a_e = 85$ mm

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n$$

 $V_f = 0.21 \cdot 5.575 = 603 \rightarrow O$ valor de V_f é aproximadamente 600 mm/min.



$$Q = \frac{ap \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$Q = \frac{4 \cdot 85 \cdot 600}{1000} = 204 \, \text{cm}^3 \, / \, \text{min}$$

Para o cálculo da potência de corte (P_C), sabendo que o ângulo de posição da fresa é 45°, que o material da peça é aço de médio conteúdo de carbono (0,4% a 0,5% C) e o rendimento η aproximadamente 85%, temos:

$$P_{c} = \frac{a_{e} \cdot ap \cdot v_{f} \cdot K}{100\ 000 \cdot \eta}$$

em que K é valor experimental obtido em laboratório. É a constante para o tipo de material a ser usinado, em função da relação a_e/D_C e do avanço da fresa f_z . Abaixo, parte da tabela 9.2 do catálogo da empresa Sandvik Coromant:

Tabela 9.2

Ass	a ₁ /D ₁ = 0,8			a ₂ / D ₂ = 0,4			$a_4 / D_4 = 0.2$		
Aço	$f_1 = 0, I$ $f_2 = 0, 2$ $f_4 = 0, 4$			$f_1 = 0, I$ $f_2 = 0, 2$ $f_4 = 0, 4$			$f_1 = 0.1$ $f_2 = 0.2$ $f_4 = 0.4$		
C = 0,10 - 0,25%	5,7	4,8	4,0	6,2	5,2	4,4	6,8	5,7	4,8
C = 0,25 - 0,55%	6,1	5,1	4,3	6,6	5,6	4,7	7,2	6, l	5,1
C = 0,55 - 0,80%	6,5	5,4	4,6	7,1	5,9	5,0	7,7	6,5	5,4
	6,9	5,8	4,8	7,7	6,3	5,3	8,2	6,9	5,8

Para a_e = 85 e D_C = 125 temos: $a_e/D_C \cong 0.7$.

Pode ser usada a coluna 0,8. O avanço f_z selecionado foi 0,21 inicialmente; pode ser usado, então, o valor de 0,2 na tabela 9.2. Para o material, seleciona-se entre 0,25 e 0,55% C, obtendo o valor K = 5,14.

O valor da potência consumida no fresamento com os dados considerados é dado por:

$$P_c = \frac{85 \cdot 4 \cdot 600 \cdot 5,1}{100000 \cdot 0,85}$$





$P_{\rm C}$ = 12,24 kW

A potência do motor tem de ser maior do que 12,24 kW, com 575 rpm (avaliar a curva conjugado rpm·potência), para que a usinagem se realize.

Influência dos parâmetros

- A V_C é o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta por causa, principalmente, das altas temperaturas geradas. Um aumento da V_C tende a reduzir a vida da ferramenta.
- Em fresamento de topo reto, com Q constante, podemos aumentar a vida da ferramenta diminuindo a V_C e aumentando f_z .
- Para Q constante, a influência da redução de V_C na vida da ferramenta é maior do que a da redução de f_z.
- Os efeitos de ap, a_e e da aplicação de fluido de corte sobre a qualidade superficial devem ser avaliados.

Origem de vibrações no fresamento

O quadro a seguir mostra as possíveis causas de vibrações no fresamento, assim como a solução proposta.

Possíveis causas	Soluções			
Força surgida entre ferramenta e peça.	Colocar massas adicionais na máquina.			
Frequência de contato do dente da fresa.	Alterar V_C , a_p ou n Deslocar o centro da fresa da posição frontal com a peça, em fresamento de face, se possível.			
Ressonâncias surgidas no processo.	Mudar estratégia (concordante/discordante).			
Folgas indevidas na fixação da peça.	Melhorar a fixação.			

9.5 Tipos de fresamento e influências da operação

Figura 9.22 Tipos de fresamento.

Basicamente, os tipos de fresamento são resumidos na figura 9.22, de acordo com a cinemática do processo.



de face





de topo

Lateral



corte de metal

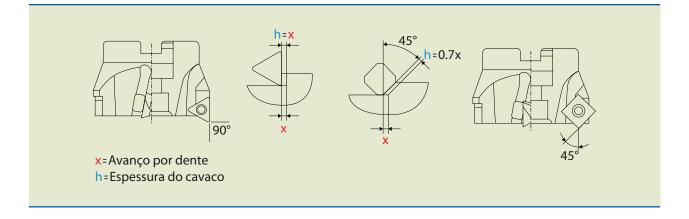




de chanfro em rasgo T

A figura 9.23 mostra exemplo de fresamento de face.

Figura 9.23 Fresamento de face



- Processo utilizado para usinagem de superfícies grandes e planas. Usar cabeçotes de fresar com insertos reversíveis com a consideravelmente maior que ap.
- O ângulo de posição do gume tem grande influência sobre as forças ativas e passivas e, consequentemente, sobre a estabilidade do processo. Usam-se fresas com ângulo de posição de 90° apenas se forem exigidos cantos a 90°. Do contrário, utiliza-se ângulo de saída de faceamento, em geral a 45°.
- Selecionam-se tamanho e número de dentes do cabeçote de acordo com as dimensões da superfície e da potência de acionamento da máquina.

Alguns exemplos de passos são ilustrados na figura 9.24.

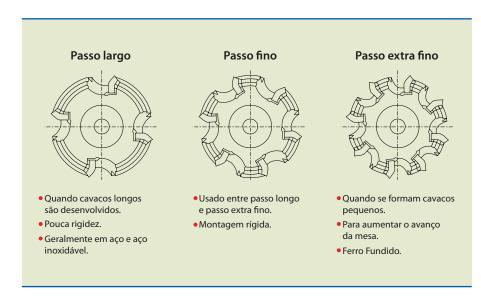


Figura 9.24 Escolha do tipo de passo.

- Para a usinagem de rasgos de chavetas e seções retangulares, usam-se fresas inteiriças ou com insertos reversíveis, adequando as características da ferramenta com os requisitos de produto.
- O fresamento de acabamento tem ganhado importância pela possibilidade crescente do trabalho completo em apenas uma máquina.





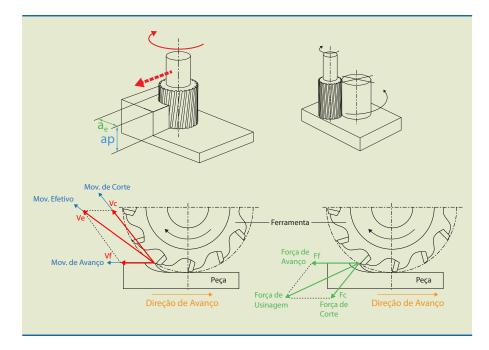
9.5.1 Ferramentas de acabamento

No fresamento com ferramentas de acabamento com grande número de insertos, usam-se ap e f_z de pequenos valores. Para evitar vibrações regenerativas do sistema, deve-se procurar utilizar cabeçotes providos de uma divisão não regular dos dentes (passo diferencial).

• Fresamento tangencial (figura 9.25)

Processo em que **ap** é bem maior do que **a**_e. Utiliza-se geralmente fresamento discordante. As ferramentas podem ser de aço rápido ou com insertos de metal duro. É preferível com dentes helicoidais, por existir menor solicitação dinâmica. Ocorre força axial, que pode levar ao deslocamento da peça e/ou da ferramenta. Para obtenção de perfis com cantos vivos, selecionar a geometria da ferramenta.

Figura 9.25 Fresamento tangencial.



• Fresamento de perfil

As ferramentas para fresamento de perfil são adequadas à forma do perfil que deve ser executado, podendo ser maciças (fresas de forma em aço rápido) ou compostas. São utilizadas na usinagem de rasgos, raios, engrenagens e cremalheiras e em guias de máquinas-ferramenta.

• Fresamento de topo

É o processo de fresamento contínuo frontal e periférico, na usinagem de formas complexas, com o topo das fresas afiadas 90° ou com raio total no topo, por exemplo, em matrizes e moldes. Selecionam-se geometrias e ferramentas antivibratórias, em caso de grandes profundidades. Em situação normal, as vibrações

indicam desgaste acentuado, lascamentos do gume, erros de forma e dimensionais. A figura 9.26 mostra exemplos de fresas de topo.



Figura 9.26Exemplos de fresas de topo.

• Fresamento de geração – altas séries de produção

O fresamento de geração (figura 9.27) é comumente empregado por empresas especialistas em fabricação de engrenagens diversas. O perfil evolvente do dente é obtido pelo movimento entre a ferramenta e a peça. Os dentes da engrenagem podem ser cortados com uma fresa de forma, conforme o espaço entre os dentes. Em geral, usa-se a ferramenta chamada caracol (figura 9.28), e cada dente do caracol retira cavacos sempre com a mesma forma geométrica. Pode ser utilizado, ainda, o cortador (*shapping*). A seleção é feita em função da atividade a ser executada, que define também o tipo de máquina utilizada.

Cortador (shapping)

Cortador para gerar dentes de engrenagem em que há dificuldades ou não existe espaço suficiente para a movimentação da ferramenta no início e final do ciclo de fresamento dos dentes, se for usado outro processo. O movimento do cortador é alternado na vertical e, após uma rotação da peça, a engrenagem está pronta.

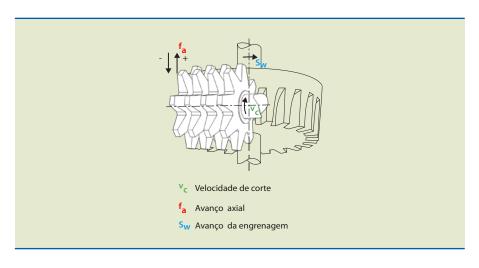


Figura 9.27
Geração por fresamento.





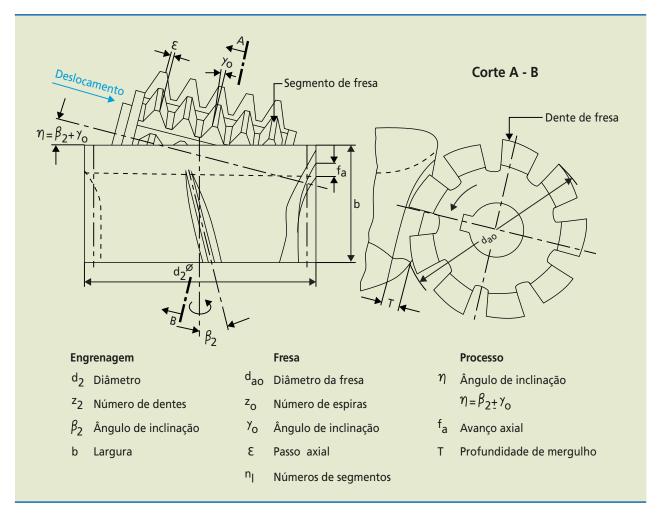


Figura 9.28

Fresa caracol.

Fresa caracol

Utiliza um cortador denominado fresa caracol, que tem dentes em uma hélice como um parafuso sem-fim. Possui perfil detalonado na parte posterior das arestas de corte.

Figura 9.29
Cortador (shapping).



Na figura 9.30 é possível observar uma foto da geração de uma engrenagem de grande porte.



Figura 9.30 Exemplo de geração de engrenagem de grande porte.

Após o fresamento, é feito o acabamento dos dentes da engrenagem. As operações de acabamento são necessárias para engrenagens que funcionam com altas velocidades, têm grande capacidade de carga, alta durabilidade e baixo ruído no funcionamento. São aplicados quatro métodos de acabamento de dentes:

- rasqueteamento rotativo (shaving);
- acabamento por rolamento (roll-finishing);
- retificação;
- lapidação.

9.6 Usinagem de carcaças

Na usinagem de carcaças, os desvios de forma e posição precisam ser previstos, dentro dos limites estabelecidos no projeto da peça. Dentre eles, citamos:

- paralelismo e perpendicularismo dos eixos de simetria dos furos de precisão, entre si e entre as superfícies planas, e desvios de forma dos furos;
- alinhamento de furos de assento de rolamentos e distâncias entre centros especificadas;
- perpendicularismo entre as faces de referência com as linhas de centro dos furos de precisão;
- planicidade das superfícies planas de contato, sem marcas de saliência comuns no encontro de passes de fresamento.

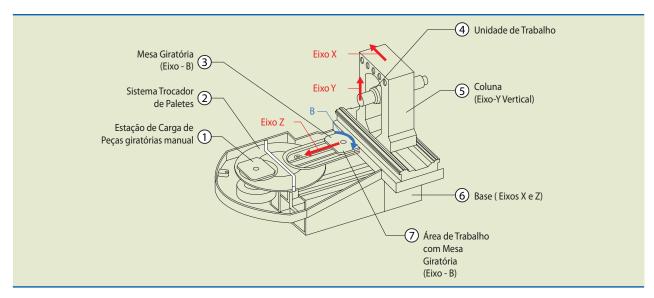
As operações de usinagem de carcaças mais comuns são: fresamento frontal ou faceamento, mandrilamento, furação, alargamento e roscamento.





Essas operações são cada vez mais executadas em máquinas-ferramenta chamadas centro de usinagem, principalmente horizontal. São máquinas de uso múltiplo, que substituem as fresadoras, furadeiras e outras máquinas. São utilizadas na usinagem de peças de porte em geral, como carcaças de transmissões, carcaças de válvulas, carcaças de motores automotivos (bloco e cabeçote). As informações técnicas das operações de usinagem são as mesmas quando são usados os centros de usinagem, com a facilidade de executar operações de forma mais versátil e adequada às necessidades da indústria. A figura 9.31 ilustra o arranjo típico de um centro de usinagem.

Figura 9.3 l Arranjo típico do centro de usinagem horizontal.



A unidade de trabalho (eixo-árvore) fixa as ferramentas automaticamente, em ciclo, a partir de um magazine de ferramentas. A mesa giratória (eixo B) possibilita a usinagem em múltiplas faces. Enquanto a peça está sendo usinada na área de trabalho, o operador retira a peça que foi usinada anteriormente e coloca uma nova peça, com o uso de dispositivos de fixação manual ou hidráulico, podendo ser mais de uma peça. O sistema automático trocador de paletes realiza a inversão de posicionamento dos paletes ao final do ciclo de usinagem daquele que está na área de trabalho, reduzindo tempos de parada de máquina.

Em versões de máquinas de cinco eixos, a unidade de trabalho posiciona angularmente ou faz movimentos combinados típicos em três dimensões (3D).

Operações comuns na usinagem de carcaças

- Faceamento em geral é a operação inicial, que visa realizar uma superfície de referência para todas as operações posteriores. As operações de fresamento de desbaste e de acabamento são executadas para garantir planicidade e acabamento superficial necessários.
- Furação, alargamento e roscamento são as operações posteriores ao faceamento, mas a furação ocorre sempre preliminarmente ao alargamento e roscamento, ou para executar um furo simples sem operação posterior. Os roscamentos são feitos para fixar componentes na montagem do conjunto.

O alargamento é executado após a furação. É uma atividade de maior precisão dimensional e que merece cuidado extremo, em que serão montados pinos, rolamentos e outros componentes de precisão.

9.7 Principais acessórios

Os principais acessórios utilizados em operações de fresamento são necessários para a fixação da peça na mesa de trabalho e para a fixação das ferramentas.

9.7.1 Acessórios para a fixação da peça

Parafusos e grampos de fixação, calços e cantoneiras de ângulo fixo ou ajustável são acessórios comuns para fixação da peça (figura 9.32).

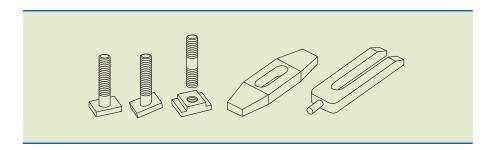


Figura 9.32Elementos de fixação da peça.

A instalação de acessórios na mesa de trabalho da fresadora deve ser realizada com muita atenção, para evitar erros dimensionais na usinagem. Por exemplo, ao instalar a morsa, é preciso fazer seu alinhamento com auxílio de um relógio comparador, apalpando seu mordente fixo, que deverá ficar paralelo ao movimento da mesa.

Verificar se não há elementos entre a face da morsa e a mesa da máquina, como cavacos, que mantenham a morsa ligeiramente inclinada no plano paralelo da mesa. Verificar o curso dos eixos, o peso máximo admissível sobre a mesa, entre outros. Atentar para a segurança de operação. A figura 9.33 mostra um tipo de morsa manual.



Figura 9.33
Morsa manual.





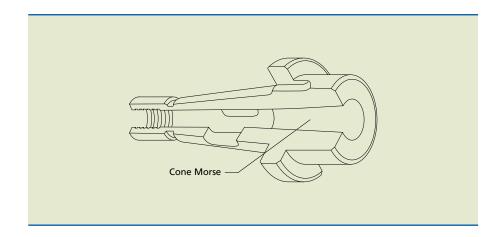
As mesas de seno são utilizadas para poder usinar faces em qualquer ângulo, necessitando ser ajustado o ângulo pelo operador.

9.7.2 Acessórios para a fixação das ferramentas

O eixo-árvore das fresadoras possui um cone interno e chavetas na face, para o alojamento dos acessórios de fixação de ferramentas. A chaveta faz a transmissão quando o eixo-árvore inicia a rotação. Para garantir a fixação, nas máquinas convencionais, é utilizada uma haste roscada que atravessa a árvore e, em máquinas CNC, pelo recurso da troca automática, é utilizado um sistema hidráulico. Um mandril adaptador, como o mostrado na figura 9.34, tem uso frequente.

Figura 9.34

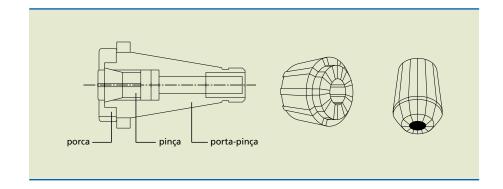
Mandril adaptador para ferramentas de haste cônica – na ponta do mandril, a rosca onde se fixa a haste roscada.



Podem ser usados três tipos de mandril: universal (Jacobs), porta-pinça e portaferramenta. O mandril universal é empregado em fresadoras, com as restrições de fixar ferramentas de haste cilíndrica e com pressão de corte pequena, no sentido axial (uso de brocas, por exemplo).

Com o mandril porta-pinça (figura 9.35), a ferramenta fica mais rígida pela maior força de fixação desse adaptador. A pinça possui cortes longitudinais que lhe dão flexibilidade de fechar o furo central e travar a haste da ferramenta ao rosquear uma porca externa. Com esse sistema, podem ser realizados pequenos a médios esforços radiais na usinagem, como fresamentos tangenciais com fresa topo.

Figura 9.35 Mandril porta-pinça e dois modelos de pinças.



Na figura 9.36 são ilustrados mandris porta-ferramenta para fresamentos que requerem grandes esforços radiais: curto com chaveta longitudinal e com chaveta transversal para arraste.

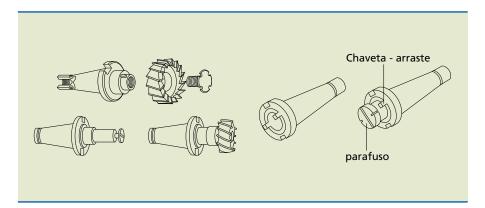


Figura 9.36Mandris porta-ferramenta para fresamentos.

9.8 Fresamentos com aparelho divisor

O aparelho divisor é um acessório utilizado nas fresadoras para fazer posicionamentos angulares diversos da peça rotacionando-a. É possível usinar múltiplas faces e gerar polígonos diversos como sextavados e quadrados, fresar dentes de engrenagens e outros perfis. A peça é fixada na placa do cabeçote divisor. Se o comprimento da peça (L) for maior que uma vez e meia o diâmetro da peça (D), é necessário usar uma contraponta na outra extremidade, apoiada em um furo de centro, como mostrado na figura 9.37.

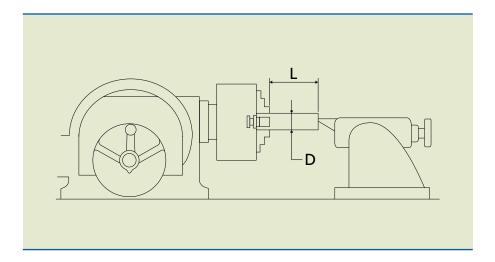


Figura 9.37Emprego de contraponta.

9.8.1 Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos

A geração de dentes de engrenagens pode ser feita alternativamente para lotes pequenos ou unitários, de peças sem grande exigência de tolerância dimensional, com fresas de perfil constante, chamadas fresas módulo. A peça é fixada no divisor e é usinada uma ranhura de cada vez, sendo posicionado entre elas o divisor na nova posição de fresamento, com grande dependência do operador.

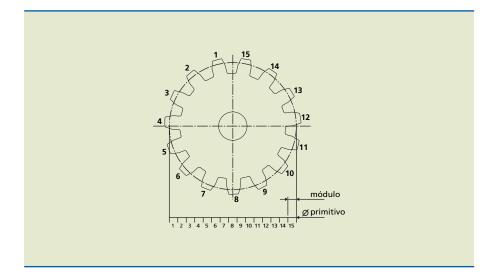




Procedimento para fresar engrenagem de dentes retos

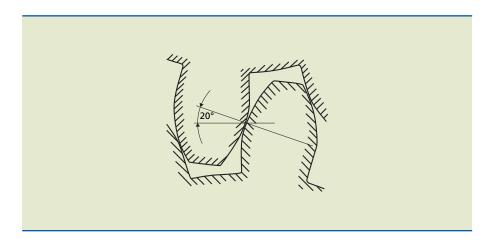
O módulo de uma engrenagem (m) é o quociente entre o diâmetro primitivo (d_P) e o número de dentes (Z), já que $d_P = m \cdot Z$. Na figura 9.38, na engrenagem, m = 1 mm; $d_P = 15 \text{ mm}$ e Z = 15 dentes.

Figura 9.38
Engrenagem mostrando o módulo, diâmetro primitivo e número de dentes.



O módulo define as dimensões de uma engrenagem. No contato da transmissão do par de engrenagens, é definido o diâmetro primitivo das engrenagens. Nesse ponto localiza-se o chamado ângulo de pressão, que em geral é de 20° (ver figura 9.39).

Figura 9.39 Ângulo de pressão da engrenagem.



O desenho de fabricação da peça informa o valor do módulo e o número de dentes da engrenagem. Nas engrenagens cilíndricas de dentes retos, os dentes são paralelos ao cubo da engrenagem. A figura 9.40 mostra um esquema de partes de um divisor. Os parâmetros para conferir se o diâmetro externo da peça usinada está correto são os seguintes:

 $d_P = m \cdot Z$ d_P : diâmetro primitivo $d_E = d_p + 2 \cdot m$ d_E : diâmetro externo

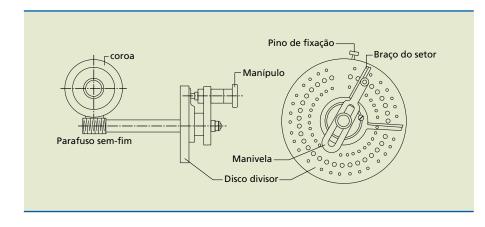


Figura 9.40
Esquema de partes
de um divisor.

Calcula-se agora a movimentação a fazer no divisor, para posicionar e executar cada vão, formando os dentes. A equação a seguir determina a divisão indireta, verificando a possibilidade de maior número de divisões:

$$n = (R_D/Z);$$

 $R_D = relação do divisor;$
 $Z = número de divisões a efetuar.$

A relação do divisor é de 40:1-60:1-80:1-120:1. A mais utilizada é 40:1, $R_D=40$, ou seja, a cada volta da coroa (e da peça) serão necessárias 40 voltas do parafuso sem-fim através da manivela. Como acessório, os divisores são fornecidos com discos furados. Em geral, um aparelho divisor é fornecido com discos contendo quantidades diferentes de furos, igualmente espaçados entre si. Um exemplo de fornecimento de discos é mostrado no quadro seguinte:

Discos	Furos								
Disco I	15	18	20	23	27	31	37	41	47
Disco 2	16	17	19	21	29	33	39	43	49

Em um disco de 27 furos, executa-se o cálculo:

$$n = \frac{RD}{Z} \qquad n = \frac{40}{27} \qquad 40 \quad 27$$
furos
$$\frac{13}{\sqrt{100}} \qquad 1$$

Como resultado, sabemos que é preciso girar uma volta e mais 13 furos em um disco de 27 furos para fresar cada vão de dente.

Para saber quanto a ferramenta deve penetrar, fazemos o cálculo:

h: altura do dente \rightarrow h = 2,166·m (usado para Diametral Pich; para módulo em mm, usamos 2,2·m – conforme DIN 867 e 862).

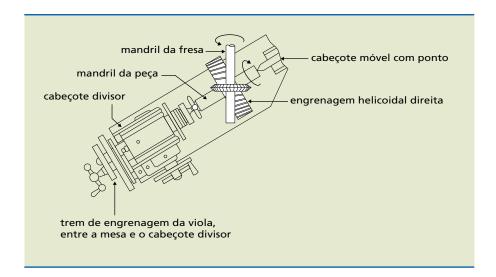




9.8.2 Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais

O fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais obedece às informações geométricas de uma hélice, montando-se a mesa para fabricação da hélice e o recâmbio.

Figura 9.41 Inclinação da mesa.



Ao operar fresadoras e centros de usinagem, é preciso conhecer todos os movimentos e formas de operar. É necessário utilizar os EPIs de forma adequada, não manusear cavacos, verificando sempre as condições de uso em geral, a fim de evitar acidentes.





furação é um dos processos de usinagem mais antigos e mais empregados na indústria. Os egípcios já utilizavam os recursos da época para fazer furos. As primeiras publicações sobre a furação de metais são do início do século XIX.

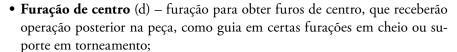
A furação é um método de usinagem eficiente e econômico. Muitas vezes, é realizada em conjunto com outras operações de usinagem. A ferramenta usada é a broca, que gira contra a peça, ocorrendo, ainda, um movimento de corte axial e a remoção de cavacos. A máquina em que a broca é montada para executar o processo é a furadeira. A furação pode ser feita também em fresadoras convencionais ou CNC e em centros de usinagem. Nos tornos, o processo é um pouco diferente, pois é a peça que gira.

A broca helicoidal é largamente utilizada na furação, com diversas variações de geometria de corte. Existem outros tipos de brocas, para diversas aplicações. Atualmente há brocas inteiriças ou integrais em aço rápido ou metal duro, com insertos intercambiáveis, canais de refrigeração interna e de materiais muito resistentes.

10.1 Definições em furação

A furação é um "processo mecânico de usinagem para obter um furo em geral cilíndrico em uma peça, com o uso da broca, normalmente multicortante. A ferramenta ou a peça giram, e tanto a ferramenta como a peça podem se deslocar segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina, dependendo do tipo de máquina" (FERRARESI, 1977). A subdivisão das operações de furação (mostrada na figura 10.1) é descrita a seguir.

- Furação em cheio (item *a* da figura 10.1) "processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco" (FERRARESI, 1977). Em furações de grandes profundidades (item *e*), é utilizada ferramenta para furação profunda (e);
- Furação escalonada (c) usinagem de um furo para obter dois ou mais diâmetros ao mesmo tempo, com a vantagem do ganho de tempo de troca de ferramentas;
- Furação com pré-furo ou escareamento (b) "reabre" um furo cilíndrico em uma peça já pré-furada ou executa o chanframento do furo;



• Trepanação (f) – "processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço" (FERRARESI, 1977), que pode ser aproveitado como matéria-prima de confecção de outras peças.

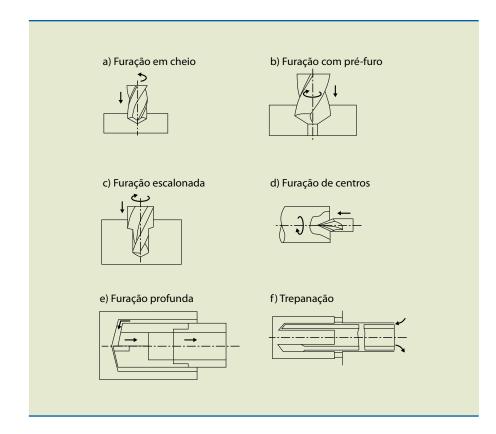


Figura 10.1 Subdivisão das operações de furação.

10.2 Broca helicoidal

As brocas helicoidais são as ferramentas de corte mais utilizadas na abertura de furos. Possuem de duas até quatro arestas de corte e canais no formato de sulcos helicoidais por onde escoa o cavaco. O ângulo da ponta varia de acordo com a dureza do material a furar. Os elementos de uma broca estão destacados na figura 10.2.

As características de uma broca, além de sua forma, são a dimensão nominal (diâmetro), o material e os ângulos (de hélice, de folga, de saída e de ponta). O gume transversal empurra o material na direção do gume principal. O gume principal é formado pelos ângulos de ponta, de quina e de incidência, além do raio de quina. O ângulo de hélice da broca define o ângulo de saída γ. Todos esses ângulos são ilustrados na figura 10.3.

Quando necessário, esse tipo de broca possui canal interno para alimentação do fluido refrigerante.





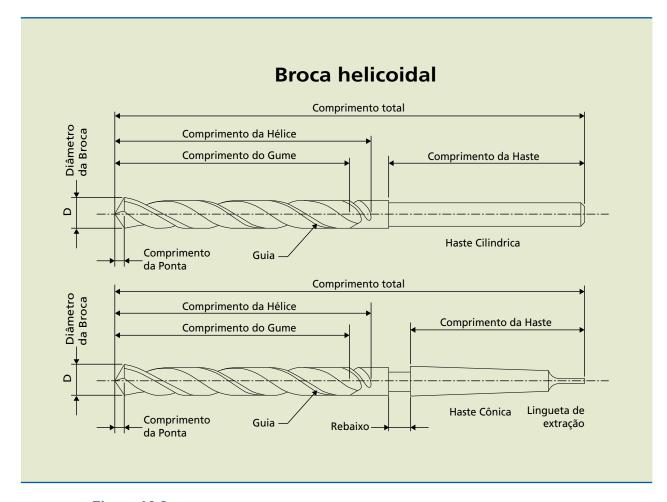


Figura 10.2
Elementos de uma broca helicoidal.

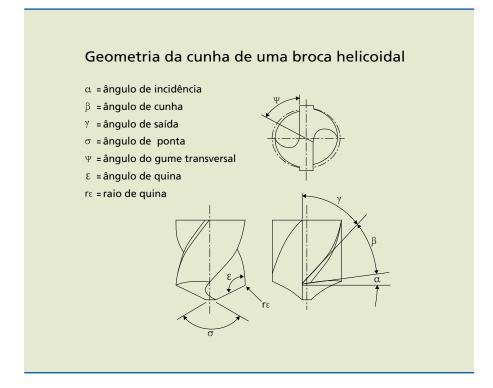


Figura 10.3 Ângulos principais em uma broca.

10.2.1 Forma construtiva das brocas helicoidais

As partes principais de uma broca helicoidal são:

- haste pode ser cilíndrica ou cônica, para a fixação da broca na máquina.
 As brocas de diâmetros maiores possuem haste de formato cone Morse, com a fixação diretamente na máquina, ou por meio de buchas de redução e mandril porta-ferramenta cônico, que possibilitam maior força de fixação;
- diâmetro (D) é o valor gerado em uma rotação da broca. Nas brocas convencionais de dois cortes, a distância entre as guias da broca é medida diretamente;
- **núcleo** confere rigidez às brocas; é a parte interior cujo diâmetro é igual a 0,16 D;
- **guias** reduzem o atrito com as paredes do furo e direcionam a broca; são em geral cônicas negativas, de aproximadamente 0,01 mm a cada 100 mm. Superfícies externas da broca helicoidal, uma em cada aresta de corte;
- canais helicoidais são as superfícies por onde escoam os cavacos; são úteis para o acesso do fluido de corte à ponta da broca, em refrigeração externa. Na aplicação geral, o ângulo de hélice é de 28° e, para materiais com cavaco curto, de 15°. O comprimento do canal helicoidal também pode variar, dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar. Na prática, a sobra de canal helicoidal é de 1,5 · D a profundidade do furo;
- arestas de corte o chamado ângulo de ponta (σ), normalmente igual a 118°, para furar com brocas de aço rápido que precisam de furo de centro para guiar a broca. Em brocas de metal duro, o ângulo de ponta é de 140° e, em geral, não precisam de centros guiados, furando a partir da face plana.

A tabela 10.1 mostra os valores do ângulo da broca em função do material a ser furado.

Material a ser furado	Ângulo da broca aço rápido	Espiral	
Aço de 110 a 140 kgf/mm²	115 a 120°	normal	
Alumínio e metais leves tenazes	130 a 140°	curta	
Cobre	125°	curta	
Ferro fundido cinzento	115 a 120°	normal	
Latão tenaz	115 a 120°	normal	
Ligas de magnésio	90 a 100°	longa	
Plástico – ebonite	50 a 60°	longa	
Plástico – baquelite	80 a 90°	longa	

Tabela 10.1 Ângulo da ponta da broca (σ) em função do material a furar (CUNHA, 1982)



A broca helicoidal é uma ferramenta muito fabricada e difundida para usinagem. Existem muitas formas de afiação e de perfis específicos, escolhidos de acordo com a aplicação. Os problemas a solucionar no uso das brocas, em geral, são:

- velocidade de corte (V_C): na broca, a velocidade de corte oscila de zero, no centro, a um valor máximo na periferia da broca. É recomendado selecionar os parâmetros de corte e ajustar a aplicação, para melhor distribuição de calor no gume de corte;
- dificuldades na remoção dos cavacos;
- desgaste acentuado da aresta de corte, nas quinas com canto vivo;
- ocorrência de atrito das guias com as paredes do furo.

Existe campo para a utilização de brocas de canal reto na indústria; são usadas, especialmente, para furar alumínio, em brocas calibradoras com dupla guia e brocas canhão. Para uso e seleção da broca, levamos em conta a seleção da velocidade de corte e avanço, o material da peça, o material da broca, as características da máquina e a exigência do projeto da peça, entre outros.

A rotação a ser aplicada é definida na equação:

$$N = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

em que:

 V_C = velocidade de corte (m/min)

D = diâmetro da broca (mm)

 $\pi = 3.14$ (constante)

N = rotação do eixo-árvore (rpm)

A furação com broca helicoidal não gera bom acabamento nas paredes dos furos, nem boas tolerâncias dimensionais. Frequentemente é necessária a realização de uma operação de acabamento do furo, como o alargamento ou o mandrilamento, por exemplo.

10.2.2 Materiais para brocas

Os principais materiais são o aço rápido e o metal duro. As ferramentas em geral são revestidas com uma microcamada superficial para maior durabilidade.

- Aço rápido é largamente empregado na fabricação de brocas pela fácil reafiação.
- Metal duro é selecionado pela elevada dureza e resistência ao desgaste a quente. As velocidades de corte são até três vezes maiores do que as realizadas com ferramentas de aço rápido e requerem máquinas com características adequadas de velocidade, potência, refrigeração e rigidez. As brocas podem ser integrais a partir de barras de metal duro, ter insertos intercambiáveis (figura 10.4), ambas com ou sem revestimento, selecionadas de acordo com a aplicação.

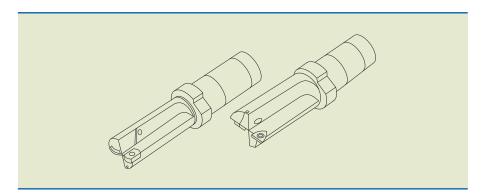


Figura 10.4
Broca com insertos.

10.3 Furação profunda

Furos com relação de comprimento do furo (L) e diâmetro da broca (D) maior do que 10 consideram-se furação profunda. Com frequência, na indústria, a relação L/D pouco menor que 8 já é considerada e tratada como furação profunda. A recomendação do uso dos tipos de brocas a partir *dessa* relação é a seguinte:

- 3 < L/D < 5: uso de brocas helicoidais convencionais com furação contínua;
- L/D > 5: uso de brocas helicoidais convencionais, com furação em ciclos ou com refrigeração interna a alta pressão;
- L/D > 8: processos específicos, empregando brocas de canais retos, brocas canhão, brocas de gume único e Ejektor, em furação profunda.

As aplicações iniciais da furação profunda ocorreram nos equipamentos bélicos. As aplicações atuais são na indústria de autopeças, em aplicações nucleares, na indústria de motores e componentes agrícolas, para furar materiais endurecidos com cerca de 50 HRC.

A utilização requer maior controle, por causa da assimetria na posição dos gumes, a garantia de máquinas com fluido de corte, alimentação interna, com pressões elevadas, da ordem de 50 bar ou maiores, para o transporte e retirada de cavacos.

10.3.1 Requisitos, fatores limitantes e ferramentas utilizadas nos processos de furação profunda

São requisitos para furação profunda:

- máquinas-ferramenta maior rigidez e estabilidade dinâmica;
- fluido necessita de alta pressão para extração de cavaco e refrigeração do gume;
- brocas são necessárias brocas específicas para grandes relações L/D.

Para executar furação profunda, é necessária a correta adequação de exigências. São limitantes no processo: a usinabilidade do material da peça, a estabilidade da ferramenta e da máquina, a precisão da máquina-ferramenta, a composição do fluido de corte e o material da ferramenta.





Principais ferramentas utilizadas na furação profunda

Utiliza-se principalmente a broca de canal reto, a broca canhão ou de gume único e a broca Ejektor. A broca helicoidal com canais de refrigeração interna com altíssima pressão também pode ser empregada.

Figura 10.5Brocas para furação profunda.

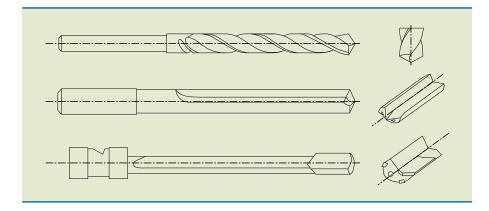
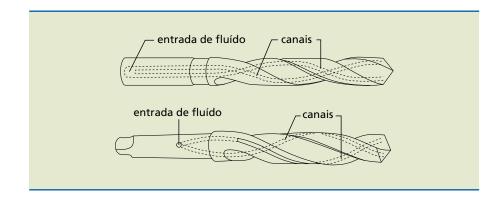
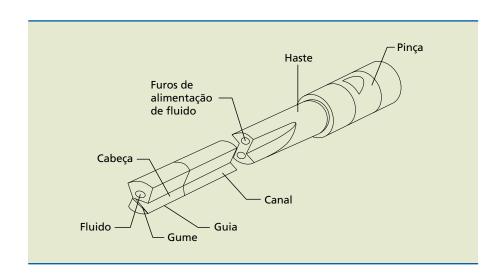


Figura 10.6
Broca para furação profunda com canais internos.



 Broca de canais retos (figura 10.7) – possibilita alta resistência à torção em furos com relação L/D > 7; é aplicada em ligas de Al-Si e ferros fundidos GG e GGG.

Figura 10.7Broca com canais retos.



• **Broca canhão** – é uma broca com alimentação de fluido a alta pressão desde a haste até a ponta de corte por orifícios internos. A remoção dos cavacos é feita pela ranhura V, e necessita de máquinas especiais com bucha-guia, podendo a peça e a broca girarem ao mesmo tempo em rotações diferentes. São utilizadas para furação em cheio de materiais diversos. A figura 10.8 mostra a broca canhão.

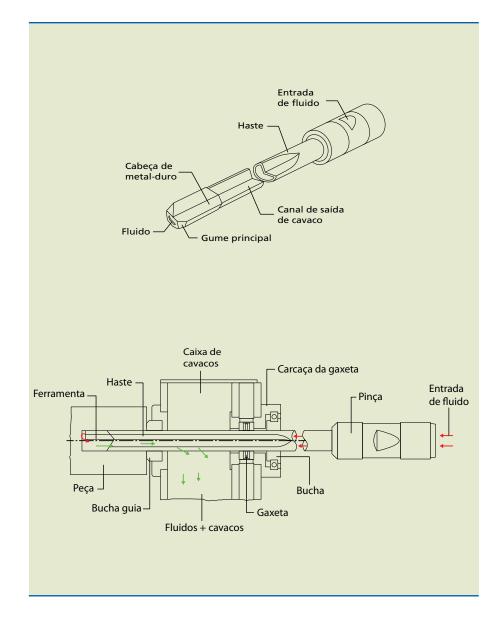


Figura 10.8 Broca canhão.

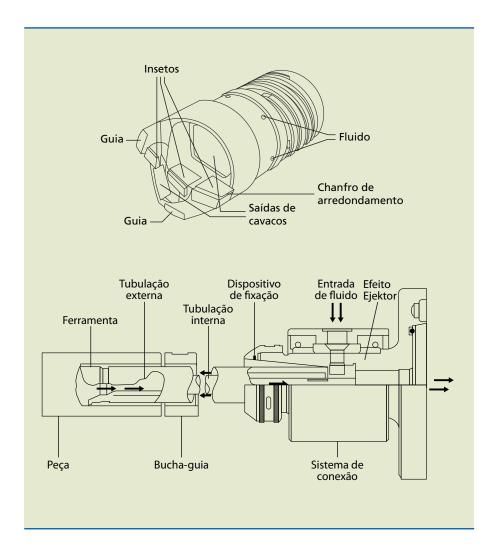
Quando usada fora de máquinas especiais, a broca canhão requer um pré-furo com dimensões controladas, em função do diâmetro da broca canhão a ser utilizada.

• **Broca Ejektor** (figura 10.9) – usada na furação profunda em máquinasferramenta simples, com alimentação de fluido por haste tubular duploconcêntrica, expulsão de fluido e sucção de cavaco. O gume dividido diminui o atrito, os esforços laterais, o calor e o desgaste.





Figura 10.9 Broca Ejektor.

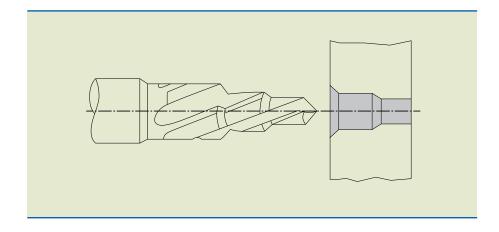


10.4 Variações no processo de furação

10.4.1 Furos combinados e rebaixamento

É comum a usinagem combinada de diâmetros e chanfros em produção seriada, pois ganha-se tempo ao evitar as trocas constantes de ferramenta.

Figura 10.10Usinagem combinada de diâmetros e chanfros.



10.4.2 Alargamento

É o processo de usinagem destinado a produzir furos com alta precisão geométrica e dimensional, com excelente qualidade da superfície. Podem ser usadas ferramentas de múltiplos gumes e de gume único. Os alargadores são utilizados diretamente, depois de feito o furo com brocas de metal helicoidal ou de canal reto. De acordo com a aplicação, as brocas são dimensionadas para deixar o mínimo sobremetal necessário ao uso dos alargadores.

Os alargadores classificam-se quanto:

- à regulagem, em fixos e ajustáveis ou expansíveis, nos quais o diâmetro pode variar mediante regulagem;
- à geometria do furo, em cônicos e paralelos;
- ao número de dentes, como de cortes múltiplos ou gume único (figura 10.11).

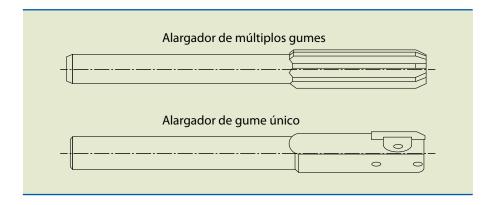


Figura 10.11 Alargadores.

Os alargadores são selecionados, de acordo com a aplicação, para acionamento manual ou mecânico; pelas características do furo, como profundidade, furo passante ou cego, superfície interrompida no furo, estado do pré-furo; espessura da parede da peça; dimensões e grau de acabamento ou precisão; assim como pela resistência e usinabilidade do material.

O tipo de alargador define a quantidade de sobremetal a ser deixado pela furação. Alargadores de gume único regulável melhoram a qualidade dos furos, possibilitam redução substancial nos tempos de fabricação, por usarem maior velocidade de corte, e, mesmo assim, a vida das ferramentas é longa. O processo geralmente é executado em centros de usinagem. O corte é realizado por um inserto intercambiável, em que o gume é concebido para a usinagem. As réguas-guias conduzem rigidamente a ferramenta e absorvem as componentes da força de usinagem.

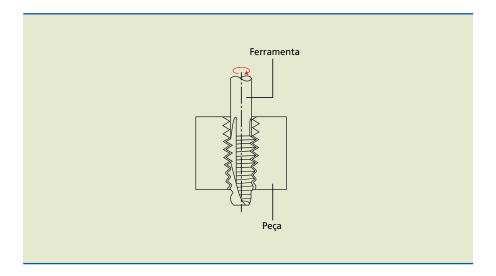
10.4.3 Roscamento com machos

Os machos (figura 10.12) são ferramentas que podem ser utilizadas na máquina ou manualmente. Os machos manuais são fornecidos em jogos, e os machos para serem utilizados em máquina são únicos, podendo ser de corte ou de conformação/esmagamento para roscas laminadas.





Figura 10.12 Macho usinando uma peça.



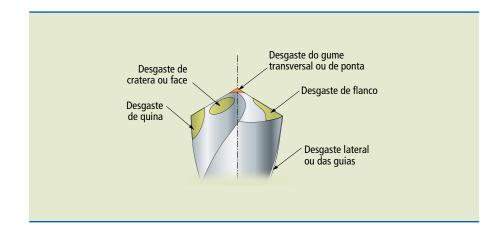
Os machos podem ser helicoidais ou de canais retos, fabricados em aço rápido ou metal duro. Podem ser usados em furos cegos (helicoidais, pois forçam o cavaco ser removido do furo) ou furos passantes (canais retos), com sincronismo da rotação da máquina com o avanço. As velocidades excessivas causam maior desgaste, acabamento ruim, rebarbas, má qualidade da rosca, entre outros danos.

A dimensão nominal do furo roscado no desenho de produto define o diâmetro do pré-furo a ser feito com a broca. A seleção do macho é realizada em função do tipo de rosca a ser executada, em geral apresentado em tabelas de fornecedores de machos e de brocas.

10.5 Critério de fim de vida na furação

Basicamente é a perda da exatidão dimensional e geométrica, do controle sobre os cavacos, da mudança da textura superficial ou da iminência de uma quebra rápida. Na prática, na definição de seleção da broca são usados os critérios de tempo de máquina, tempo efetivo de corte, volume de metal a ser removido, número de peças usinadas e comprimento usinado equivalente em metros (profundidade de furação multiplicada pelo número de furos realizados). A figura 10.13 ilustra as regiões onde a broca sofre desgaste durante o tempo de serviço.

Figura 10.13
Regiões de desgaste
em uma broca.



Na figura:

- desgaste de flanco (V_b) provoca baixa qualidade, imprecisões e aumento do atrito;
- desgaste nas guias prejudica o torque e a potência durante o corte;
- desgaste de cratera prejudica a remoção de material por abrasão e difusão;
- gume postiço provoca a adesão do material da peça encruado na ferramenta;
- desgaste do gume transversal leva ao arredondamento e possível lascamento das zonas de transição.

10.6 Erros comuns na geometria do furo

A seguir são descritos brevemente os erros mais comuns encontrados na geometria do furo, representados na figura 10.14:

- erros de forma diâmetro não uniforme;
- erros de posicionamento deslocamento do centro do furo;
- erros de circularidade seção circular distorcida;
- erros de dimensão diâmetro resultante diferente da broca.

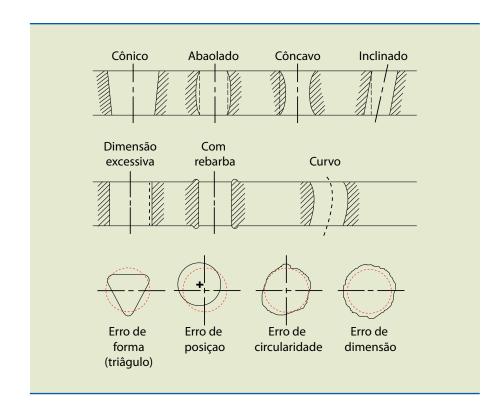


Figura 10.14
Erros encontrados na geometria do furo.

10.7 Escolha da furadeira

A escolha da furadeira leva em consideração, primeiramente, a forma, as dimensões e tolerâncias requeridas para a peça. Posteriormente, são analisadas as variáveis: quantidade de furos a serem abertos, quantidade de peças a serem produzidas e diversidade no diâmetro dos furos para uma mesma peça.

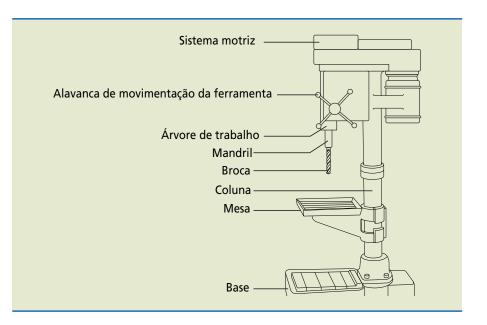




10.7.1 Partes de uma furadeira

As furadeiras consistem basicamente de um eixo-árvore, que gira com velocidades selecionadas, em que a broca é fixada. O movimento de avanço pode ser da ferramenta ou da mesa onde a peça está presa. As partes da furadeira variam de acordo com sua estrutura. Na furadeira de coluna são destacadas as partes mostradas na figura 10.15:

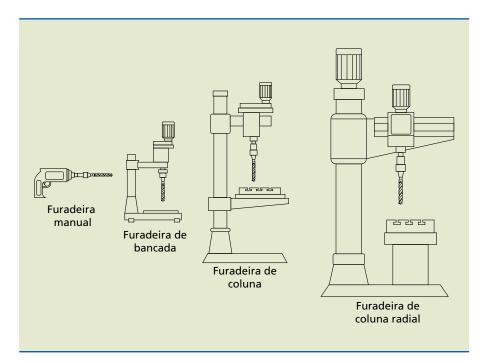
Figura 10.15
Partes fundamentais de uma furadeira de coluna.



10.7.2 Tipos de furadeiras

Nas figuras 10.16 e 10.17 são mostrados diferentes tipos de furadeiras.

Figura 10.16Tipos de furadeiras.



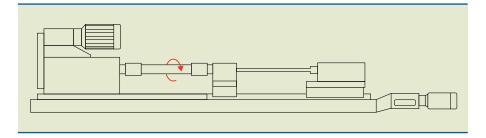


Figura 10.17
Furadeira para
furação profunda.

10.8 Dispositivos e acessórios

Os dispositivos e acessórios usados nas furadeiras são similares e, muitas vezes, os mesmos das fresadoras. São utilizados: cantoneiras, morsas, grampos, blocos e gabaritos. No caso de furadeiras, destacamos o uso comum de gabaritos de furação, que têm a finalidade de guiar a broca e garantir a precisão/repetibilidade das coordenadas dos furos. Os gabaritos possuem buchas-guia de aço endurecido e podem ser substituídos quando desgastados.

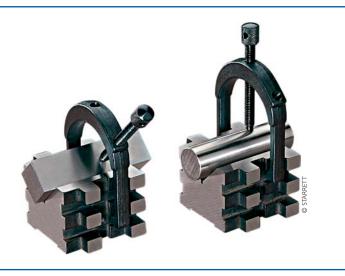


Figura 10.18 Exemplo de grampos.

Os cabeçotes múltiplos são empregados na produção seriada, com a regulagem linear da posição das brocas, em operações sem grandes exigências de posicionamento do centro da broca. Por exemplo, em furação do disco de freio.

10.9 Segurança no processo de furação

Destacamos aqui algumas recomendações que devem ser seguidas no processo de furação:

- Usar óculos de proteção.
- Fixar corretamente a ferramenta, a morsa e a peça e não manusear a morsa com a máquina em movimento.
- Antes de ligar a máquina e começar a trabalhar, certificar-se de que a peça e a ferramenta estejam bem presas.





- Não segurar a peça manualmente enquanto perfura.
- Não usar o ar comprimido ou as mãos para fazer a limpeza da máquina; utilizar uma escova ou um instrumento apropriado.
- Girar a broca no sentido de corte correto e assegurar-se de que esteja bem afiada
- Não usar roupas folgadas, cabelos compridos ou joias, pois podem se enrolar e se prender nas peças rotativas.
- Operar as furadeiras com velocidades dentro das especificações do fabricante para os materiais que estiverem sendo furados.
- Manter a mesa livre de ferramentas e de outros itens que não estejam em uso.





e maneira geral, a retificação é aplicada em processos de acabamento. As muitas vantagens do processo, que garantem a excelência no acabamento de peças, tornam a retificação indispensável quando o assunto é qualidade e atenção às tolerâncias. Esse processo atende, assim, aos requisitos da indústria metal-mecânica, que exige precisão cada vez maior, e é inevitável que os processos de acabamento acompanhem essa demanda. Outros fatores, atualmente, são a redução do tempo de processamento e do número de máquinas necessárias no processo, que resultam em aumento na produtividade.

Como exemplos de aplicações da retificação na indústria, podem ser citadas as operações de acabamento em virabrequins, comandos de válvula, ferramentas de corte etc.

A retificação nem sempre teve a importância atual. As retíficas foram as últimas máquinas a receber o comando numérico que hoje define critérios de estratégia, condições de ciclo, taxas de remoção, condições de preparação dos rebolos e das ferramentas, entre outros. As máquinas funcionavam com sistemas de acionamento hidráulico ou eletromecânico. As demandas de qualidade cada vez maiores e os gargalos das máquinas de produção passaram a ser relacionados a esse tipo de processo. A necessidade de aumentar a flexibilidade nas indústrias foi outro fator que fez com que os tempos de preparação fossem mais valorizados.

II.I Definições em retificação

Retificar, em Mecânica, significa corrigir irregularidades, fissuras, poros e corpos estranhos de superfícies de peças, para poder atingir níveis de acabamento e tolerâncias superiores. Retificação é um processo de usinagem por abrasão que utiliza ferramentas de múltiplas arestas (multicortantes), a fim de assegurar as dimensões finais, os desvios de posição, a rugosidade superficial etc., com a remoção do sobremetal previsto.

A retificação é uma operação bastante precisa e cuidadosa, que tem por objetivo:

- dar à superfície de peças a exatidão de medidas que permita serem substituídas umas pelas outras, no conceito de intercambialidade;
- retificar peças que tenham sido deformadas durante um processo de tratamento térmico;
- realizar referência de usinagens posteriores, antes de a peça ser tratada termicamente. São operações conhecidas como retificação "mole".

A ferramenta de corte no processo de retificação é chamada **rebolo**. O rebolo possui formato circular, geralmente em forma de disco, e deve estar balanceado. É fabricado com abrasivos ligados entre si por elementos aglomerantes.



Figura 11.1 Rebolos.

O rebolo possui inúmeras arestas de corte. Rotaciona e entra em contato com a peça, que pode estar girando ou não de acordo com o tipo de retificação, com avanço de corte controlado, retirando cavacos bem pequenos.

A retificação é usualmente aplicada após o tratamento térmico. Remove o sobremetal intermediário deixado por outros processos, como o torneamento e o fresamento, de apenas 0,2 a 0,5 mm de espessura, dependendo das dimensões da peça ou da superfície a ser retificada. Essa pequena remoção ocorre em função do custo elevado da retificadora e seu uso torna o produto mais caro.

A retificação, em geral, consiste em diversas etapas de trabalho. Na retificação cilíndrica, um tipo de retificação tangencial, por exemplo, podem ser citadas as fases de aproximação, desbaste, dressagem, semiacabamento, acabamento e afastamento.

II.2 Tipos de retificação

11.2.1 Retificação tangencial

Processo executado com a superfície de revolução da ferramenta. A retificação tangencial pode ser:

- cilíndrica a superfície usinada é cilíndrica. Essa superfície pode ser externa ou interna, de revolução ou não. Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cilíndrica pode ser com avanço longitudinal da peça ou com avanço radial, circular ou longitudinal do rebolo;
- cônica a superfície usinada é cônica. Essa superfície pode ser interna ou externa. Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cônica pode ser com avanço longitudinal da peça ou com avanço radial, circular ou longitudinal do rebolo.
- de perfis a superfície usinada é uma superfície qualquer gerada pelo perfil do rebolo.





MECÂNICA 5

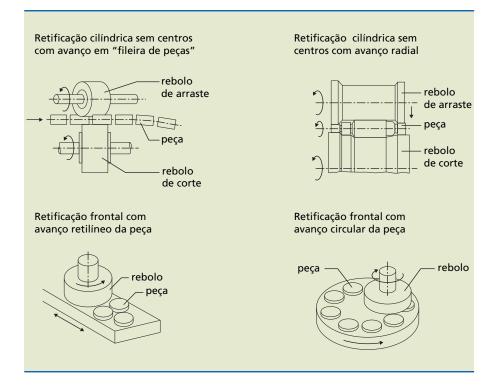
- plana a superfície usinada é uma superfície plana.
- cilíndrica sem centros processo de retificação cilíndrica no qual a peça sem fixação axial é usinada por ferramentas abrasivas de revolução, com ou sem movimento longitudinal da peça. A retificação sem centros pode ser com avanço longitudinal da peça (retificação de passagem) ou com avanço radial do rebolo (retificação em mergulho).

11.2.2 Retificação frontal

Processo de retificação executado com a face do rebolo. É, em geral, executada na superfície plana da peça, perpendicularmente ao eixo do rebolo. A retificação frontal pode ser com avanço retilíneo ou com avanço circular da peça.

As figuras 11.2 e 11.3 mostram os diferentes tipos de retificação.

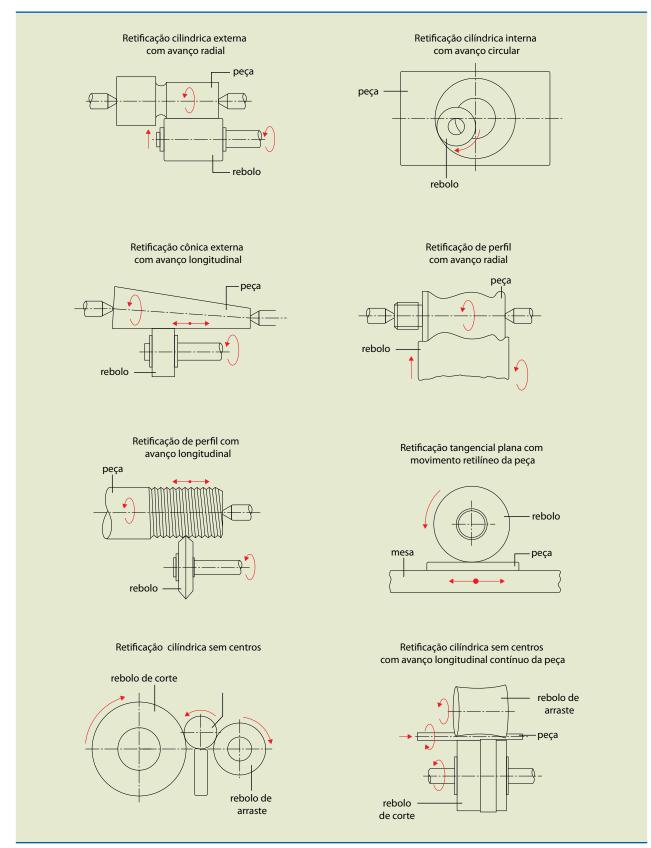
Figura 11.2 Tipos de retificação.



Mesmo sendo um processo muito conhecido, a retificação ainda é considerada uma operação complexa, pela variedade de fatores que influenciam o processo, entre eles:

- peça forma, material, usinabilidade;
- máquina-ferramenta estabilidade, rigidez, capacidade de fixação, acessórios, qualidade, instalação;
- ferramenta diâmetro, material abrasivo, tamanho do grão abrasivo, densidade de grãos, ligante, condicionamento;
- parâmetros de corte taxa de retificação, velocidade de corte, avanço, rotação da peça, profundidade de corte e comprimento de corte;
- periféricos fluido de corte, filtragem, ambiente etc.

Figura 11.3Tipos de retificação.







II.3 Retificadora

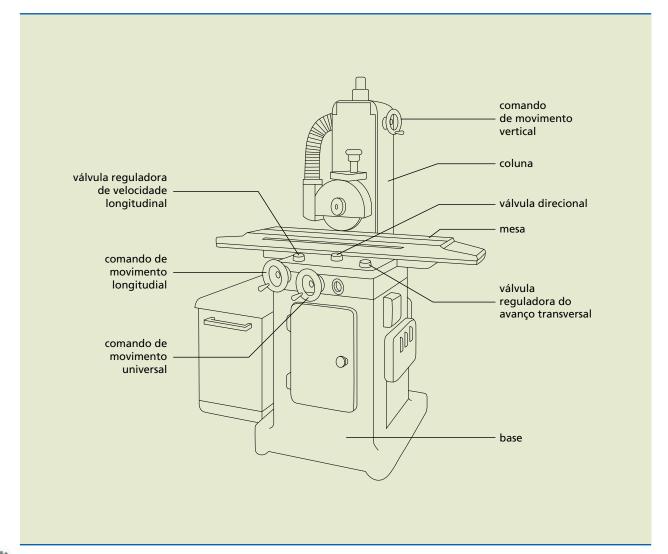
Os tipos mais comuns de retificadora são: a plana, a cilíndrica universal e a cilíndrica sem centros, também chamada *centerless*. Podem ser manuais, semiautomáticas e automáticas. A *centerless* é apenas automática, pois se trata de máquina utilizada para a produção em série.

11.3.1 Retificadora plana

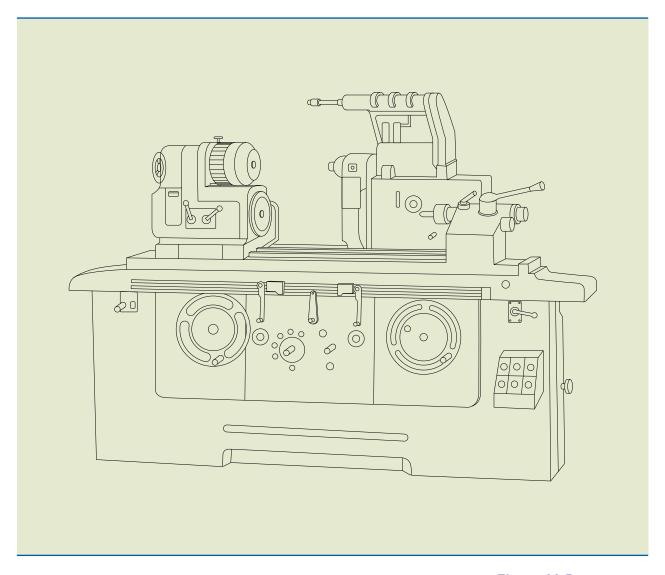
Essa máquina (figura 11.4) é utilizada para retificar faces planas diversas. A mesa executa movimento retilíneo alternado na longitudinal e avanço na transversal para trabalhar faces e superfícies paralelas, perpendiculares ou inclinadas (nesse caso com o auxílio de acessórios). A peça é fixada na mesa da máquina geralmente com auxílio de uma mesa magnética. Após a operação, aplica-se um desmagnetizador na peça.

Figura 11.4Retificadora plana tangencial.

A retificadora plana pode ser tangencial, de eixo horizontal, e de topo, de eixo vertical.



11.3.2 Retificadora cilíndrica universal



A máquina mostrada acima é usada nas retificações de peças cilíndricas em geral. O rebolo gira, entra em contato com a superfície da peça em rotação e remove o material. Em geral é a máquina utilizada para retificação externa e faces de eixos rebaixados. Com rebolo de formato e dimensões apropriadas, possibilita a retificação da face da peça e de superfícies internas. A peça é geralmente fixada entre pontas para retificação externa, usando contrapontas, grampo arrastador e arrastador, como no torneamento. Algumas vezes usa-se luneta fixa (como no torneamento) ou dispositivo especial para fixação, dependendo do tipo de peça a retificar.

Na retificação interna, a peça é fixada em placas universais de castanhas. É a de maior custo, principalmente na retificação de diâmetros pequenos, pois o rebolo precisa entrar no furo, o que limita o espaço de uso do refrigerante. Além disso, o controle torna-se mais difícil pelo reduzido campo de visão da ferramenta e pelas dificuldades de medição interna em faixas de tolerância apertadas.

Figura 11.5Retificadora cilíndrica universal.



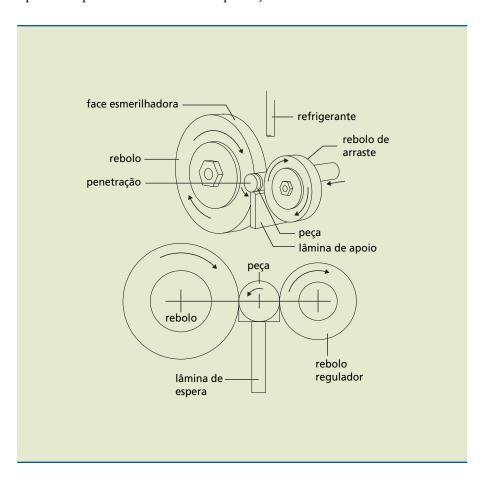


MECÂNICA 5 CAPÍTULO II

11.3.3 Retificadora sem centros (centerless)

É um tipo de máquina diferenciada, pois nela se executa a retificação externa em peças cilíndricas (sem rebaixos), sem fixar a peça. Possui um disco de arraste, ligeiramente inclinado e girando em baixa rotação, com regulagem para ajustar a distância ao rebolo e realizar o avanço da peça nesse espaço entre eles. É um tipo de máquina muito utilizado na produção seriada.

Figura 11.6 Retificadora sem centros.



II.4 Especificação, seleção e tipos de rebolos

Nos rebolos, é descrita sua especificação para garantir ao usuário os parâmetros de segurança de utilização. As características de um rebolo são definidas por cinco elementos importantes (STOETERAU, 2004):

- o material que compõe os grãos do rebolo tipo de **abrasivo**;
- o tamanho dos grãos abrasivos **granulação**;
- o material que une os grãos abrasivos **aglomerante**;
- a resistência do aglomerante define o **grau de dureza**;
- a porosidade do disco abrasivo informa como é a estrutura.

Na figura 11.7 são ilustradas as sugestões para a seleção do rebolo quanto à natureza, ao tipo e formato do material a ser retificado.

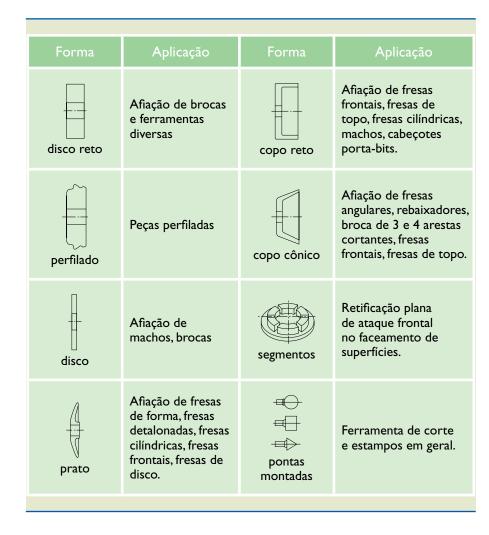


Figura 11.7 Sugestões para a seleção

do tipo de rebolo.

Como a retificação é uma operação final na grande maioria dos roteiros de processo, é necessário garantir a exatidão dimensional e o bom acabamento. Para isso, deve-se levar em conta o tipo de material a usinar, o tipo de granulação, o aglomerante do rebolo e o tipo de trabalho a ser feito. Na tabela 11.1 e nos quadros seguintes mostra-se um exemplo para a retificação de aço não temperado.

Tipo de trabalho	Tipo de granulação	Tipo de aglomerante
Desbaste	Grossa	Vitrificado
Semiacabamento	Média	Vitrificado
Retificação fina	Fina	Resinoide, borracha, goma laca, vitrificado

O aglomerante vitrificado, utilizado na maioria dos rebolos fabricados, representa 70% e 80% do total. Quanto à velocidade da mesa, existem as seguintes relações:



Características do rebolo para a retificação de aço não temperado.





Material mole – Maior velocidade da mesa Material duro – Menor velocidade da mesa

Rebolo de liga vitrificada – Baixa velocidade (até 33 m/s) Rebolo de liga resinoide – Alta velocidade (até 45 m/s)

Quanto ao material

Quanto à estrutura

Material mole – rebolo duro	Desbaste – estrutura aberta
Material duro – rebolo mole	Acabamento – estrutura fechada

11.4.1 Tamanho de grão

É uma importante característica do rebolo. A classificação do tamanho do grão é baseada em uma peneira (polegadas lineares). Os rebolos fabricados com granulometria grande (menor número na escala) são empregados para trabalhos de desbaste, e os finos (maior número na escala), para acabamentos. É fácil identificar o tamanho do grão, pois ele vem marcado no rebolo.

O tamanho do grão pode ser uma das causas de problemas com rugosidade superficial da peça na operação de retificação. Outras causas de problemas de acabamento podem ser o desbalanceamento do rebolo, folgas na máquina, parâmetros de corte incorretos, entre outros. Existe relação de aplicação da rugosidade (Ra) com a granulação do abrasivo e a profundidade de corte do rebolo (tabela 11.2).

Tabela 11.2Relação entre rugosidade,
granulometria e
profundidade de corte

Rugosidade	Granulometria	Profundidade
12,5	Granulação Profundidade	40 a 60 10 a 30 μm
6,3	Granulação Profundidade	80 a 100 5 a 15 μm
0,8	Granulação Profundidade	200 a 300 I a 8 μm

11.4.2 Materiais abrasivos

Os materiais abrasivos precisam ter elevada dureza, estabilidade térmica e estabilidade química. Os materiais podem ser naturais (quartzo, coríndon e diamante natural) ou sintéticos, mas os abrasivos naturais têm pouca importância por serem de baixa resistência. Os **materiais abrasivos sintéticos** utilizados são (STOETERAU, 2004):

- diamante sintético é o material de maior dureza entre todos os materiais; possui custo elevado;
- carboneto de silício de elevada dureza, possui boas características térmicas e estabilidade química, é recomendado para retificar ferro fundido cinzento, ferro fundido coquilhado, materiais não ferrosos e não metálicos. Caracteriza-se pelas cores verde e preta, conforme o grau de impurezas;
- nitreto de boro cúbico (CBN) material de elevada dureza; somente o diamante é mais duro. De elevada resistência à temperatura, é usado para materiais duros como aços rápidos e aços-liga temperados.

Tabela 11.3Características e aplicações dos abrasivos

		acterísticas e usos rais dos abrasivos	Aplicação		Abrasivo	Tamanho do grão	Dureza	Porosi- dade	Liga		
	A Rebolo cinza opaco azulado Uso: Em ferro e aço (rebolo comum)		Des	sbaste muito sso		A ou C	14	R	5	В	
	AA	Rebolo branco ou vermelho ferrugem Uso: Aços temperados,		Des	sbaste grosso		A ou C	24	0	6	BouV
Óxido de alumínio	DA	dureza forte Rebolo cinza esbranquiçado (pouco usado) Uso: Aços temperados de	Uso geral	Desbaste leve		A ou C	36	0	6	BouV	
Óxido de	RA	dureza branda Rebolo rosado Uso: Afiação e usinagem de ferramentas especiais de	Uso	Semiacabamento		A ou C	46	0	6	BouV	
	aço rápido e aços duros RB Rebolo cor morango Uso: Afiação de precisão, onde o rebolo deve manter o perfil (broxas, filetes, estrias etc.)		Acabamento e afiação		А	60	Ν	6	٧		
			Acabamento fino		Α	80	М	6	٧		
	GC	Rebolo verde Uso: Metal duro (Widia)		Desbaste Acabamento e afiação Acabamento fino		Š	DA - AA RA RB	46	J ou K	6	٧
cio	С	Rebolo cinza chumbo brilhante Uso: Ferro fundido, materiais não ferrosos e	Ferramentaria			cos temperado		60	J ou K	6	٧
Carboneto de silício		não metálicos (latão, bronze, mármore etc.)					80	J ou K	6	٧	
Carbo	B V	9	Fen	0	Desbaste	GC	80	J ou K	6	٧	
	NB Na liga B resinoide	Na liga B resinoide predomina a cor marrom		Afiação	Acabamento	Widia	GC	120	J ou K	6	٧





11.5 Operações nos rebolos

São duas as operações nos rebolos: o dressamento e o perfilamento.

- O dressamento é a operação executada nos rebolos durante a retificação. É
 uma espécie de reafiação, que consiste em remover o ligante entre os abrasivos ou remover grãos arredondados (caracterizado por rebolo espelhado),
 assim como limpar rebolos carregados de cavacos (rebolo empastado) para
 criar novos espaços entre os grãos. Geralmente o dressamento é feito ao ser
 colocado o rebolo na máquina e entre passes de retificação.
- O perfilamento visa dar o formato requerido ao rebolo. É feito muitas vezes durante o dressamento, ajustando a forma do rebolo. Algumas aplicações já são fornecidas no perfil da peça, como rebolos para retificar barramentos de tornos mecânicos e CNC.

II.6 Cuidados na utilização e montagem dos rebolos

Como os rebolos podem ser causas de acidentes sérios, antes do uso devem ser observados diversos cuidados em sua utilização e montagem. Precisam ser inspecionados visualmente, para prever possível dano de fabricação ou de armazenamento e transporte, e testados com prova de som quanto à existência de trincas. O armazenamento deve garantir o posicionamento correto para cada tipo de rebolo e que eles estejam isentos de umidade excessiva e da incidência da luz solar direta.

Os rebolos devem ser balanceados antes de serem colocados na máquina. É preciso observar a rotação máxima, especificada no rótulo, assim como fazer a montagem correta.

11.7 Fluidos de corte

Os fluidos de corte em retificação têm as funções de:

- refrigeração na zona de retificação para evitar marcas de superaquecimento e até possíveis trincas, melhorando o acabamento e aumentando a vida do rebolo;
- lavação dos cavacos na máquina em geral, não permitindo a formação de pós que podem ser abrasivos e nocivos à saúde.

Os fluidos são selecionados em função do material da peça e do tipo de abrasivo utilizado. A seguir são descritos alguns exemplos de aplicação.

- Os rebolos de CBN requerem fluidos não miscíveis em água, para reduzir o desgaste do rebolo e a afinidade do óxido bórico com o vapor-d'água.
- Em retificação cilíndrica, plana e sem centros, que são operações leves, aplica-se fluido miscível em água com aditivos para evitar corrosão, reduzir o atrito, o empastamento e o desgaste do rebolo.

 Na retificação de ranhuras, roscas, engrenagens etc., com rebolos perfilados, gera-se muito calor por atrito. O rebolo costuma ser bastante exigido para manter a forma e medidas precisas, buscando excelente acabamento superficial. Nesses casos, preferencialmente, usam-se óleos com aditivos redutores de atrito.

A utilização de fluidos pode gerar problemas ambientais. Os fluidos de corte precisam ser filtrados, pois a retificação remove cavacos em forma de partículas minúsculas, que se acumulam no tanque do fluido.

11.7.1 Forma de aplicação dos fluidos de corte

O sistema de alimentação do fluido é muito importante na operação eficiente de retificação. As variáveis de aplicação que mais se destacam são: o volume, a pressão, a velocidade dos jatos, o ângulo de impacto e a forma e número de bocais. O fluido deve ser dirigido com abundância, sem interrupção por qualquer motivo, na posição antes do ponto em que está ocorrendo o processo. As pressões aumentam com a potência da máquina e atingem 0,6 MPa.

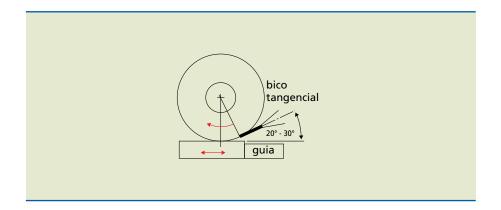


Figura 11.8
Aplicação de jato lubrificante na retificação plana.

A figura 11.9 ilustra exemplo de jato lubrificante para retificação interna, e na figura 11.10 há exemplo de jato lubrificante para retificação cilíndrica externa.

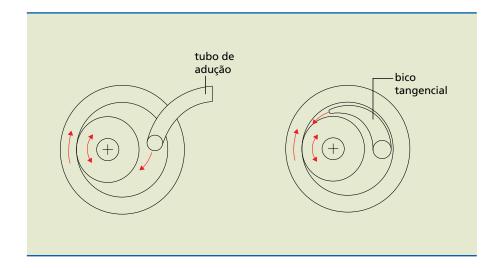


Figura 11.9
Aplicação de jato
lubrificante na
retificação interna.





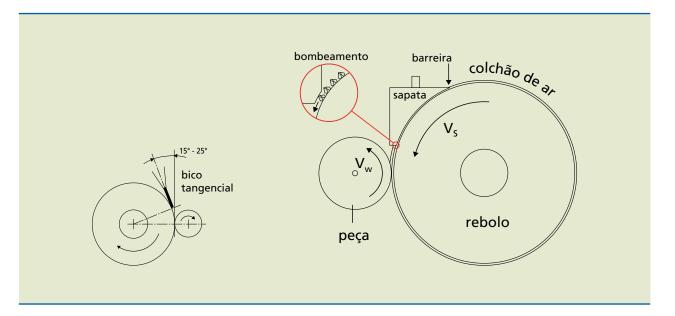


Figura 11.10 Aplicação de jato lubrificante na retificação cilíndrica externa.

11.8 Retificação versus torneamento duro em peças cilíndricas

A substituição do processo de retificação pelo de torneamento duro tem sido objeto de estudos. O torneamento é possível em materiais temperados, cementados ou nitretados com mais de 50 HRC, especialmente na área de acabamento de peças cilíndricas usinadas. As ferramentas utilizadas no torneamento duro deixaram de ser frágeis, e as vibrações que aparecem no corte interrompido no torneamento de aço endurecido, por exemplo, já não são as limitadoras da escolha por esse processo.

A análise financeira deve sempre ser levada em consideração. Uma retífica pode custar de três a dez vezes mais que o preço de um torno, o que torna o tamanho do lote e sua regularidade fatores importantes. Algumas operações de retificação são extremamente rápidas, por exemplo, a retificação cilíndrica sem centro (centerless), que, além de mais versátil, garante menos deformações. Quanto à precisão dimensional, tolerâncias na ordem de 20 mícrons podem ser obtidas por ambos os processos. Entretanto, quando o assunto é tolerância geométrica e variabilidade muito pequenas, ao redor de 5 mícrons, a retificação torna-se mais indicada.

É difícil equacionar uma máquina com baixo custo, que permita elevados avanços na fase de desbaste e alta precisão na fase de acabamento, por longo período de duração do equipamento. Isso faz as empresas adotarem tornos especificamente destinados a operações de torneamento duro.

Quanto à questão ambiental, o torneamento duro pode ser feito sem refrigerante, enquanto a retificação exige fluidos de corte, o que gera gastos. A complexidade dessa relação é muito grande, e cada caso precisa ser analisado individualmente.

Pelo fator tamanho do lote, a adoção do torneamento duro é maior nas empresas cuja produção é seriada. O torneamento de peças duras leva, ainda, vantagens, como:

- maior produtividade em função de tempos reduzidos de ciclo;
- maior flexibilidade de produção e maior capacidade operacional do torneamento, proporcionando superfícies diversas de boa qualidade com a mesma ferramenta, com o uso de tornos CNC;
- menores custos de usinagem com poucas máquinas, que também são menos caras.

O torneamento duro necessita de um bom torno, com alta capacidade e que tenha, entre outros requisitos:

- contrapontas de alta pressão, sistema de fixação bom o suficiente para promover a estabilidade e que tenha centro rígido e não móvel, para a fixação de peças entre pontas ou entre placa e ponta;
- a garantia de que o nível de qualidade das peças endurecidas seja consistente em tamanho, formato, dureza, batimento radial etc., pois a variação de pressão de corte pode mudar a tolerância dimensional;
- as mais recentes ferramentas disponíveis para a aplicação, mais caras do que as convencionais, necessitam de assistência qualificada e métodos corretos de usinagem;
- dados de corte bem definidos para melhor combinação de produtividade e segurança, com baixa vibração e menor deformação geométrica da peça usinada.

11.9 Cuidados recomendados na hora de retificar

A operação de retífica requer vários cuidados, como:

- escolha da máquina e características técnicas, cuidados na instalação e manutenção, rigidez, sistema de guias e mancais;
- escolha do tipo de rebolo, dos parâmetros de corte e da especificação;
- determinação correta do momento de dressagem do rebolo. Nunca deixar esse momento ser ultrapassado sem que a dressagem seja realizada;
- escolha do tipo de fluido refrigerante e forma de aplicação;
- forma da peça, tipo de material e sobremetal existente.

Esses itens estão relacionados entre si e são importantes em cada análise. Um bom planejamento das operações pode proporcionar garantia de qualidade, menor tempo de preparação, menores custos e flexibilidade na produção de vários modelos de peças.

O operador deve utilizar EPIs, principalmente óculos de proteção, estar treinado sobre os movimentos da máquina, entre outros motivos, para prever riscos de acidente.





Capítulo 12

Tecnologia CNC –
tornos e centros
de usinagem

a usinagem, busca-se atender às especificações definidas em projetos ou desenhos de folhas de processo. A máquina é o equipamento que atua com sua força e potência, com a ferramenta de corte, na remoção do cavaco. Por causa das exigências do mercado em busca de flexibilidade, menores custos e maior qualidade, novas teorias, máquinas e ferramentas de usinagem têm surgido. Dentro dessa nova realidade existem as máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC), comandadas por computadores.

Antes do CNC, a produção era feita de duas formas: ou por operações manuais de baixa velocidade de produção e grande variedade de peças, ou pelo uso de máquinas automáticas especialmente elaboradas para alta produção de apenas um item ou poucos itens diferentes. Essa forma de produção estendeuse por muito tempo após a criação do CNC, e atualmente ainda existem algumas aplicações.

O comando numérico surgiu nos Estados Unidos por volta de 1950. Em uma fresadora usada, de três eixos, foi introduzida uma adaptação eletrônica e mecânica para usinagem de peças com geometrias complicadas, empregadas em aviões e helicópteros. O controlador eletrônico montado na máquina era muito diferente dos pequenos e atuais controladores numéricos. Era quase maior do que a própria máquina e precisava de muita energia elétrica. Além das constantes falhas, tinha capacidade de cálculo bastante limitada, mas para a época era um grande avanço.

Essa nova tecnologia foi inserida aos poucos nas indústrias dos EUA e da Europa até início dos anos 1960. Houve uma barreira natural colocada pelos usuários, porque, como ocorre com toda nova tecnologia, os equipamentos eram bem mais caros e a tecnologia duvidosa, além de que não havia registros de eficiência comprovada. Apenas algumas indústrias do ramo aeroespacial e automobilístico tiveram condições financeiras para adquirir essa nova tecnologia.

Com a redução dos custos e a evolução dos componentes eletrônicos, esses novos equipamentos, que no início eram apenas CN, passaram a ser adquiridos também pelas médias empresas e em outros países. No Brasil, chegaram mais efetivamente no final dos anos 1960. Por volta de 1980, as máquinas tornaram-se computadorizadas, com unidades eletrônicas cada vez mais compactas, maior capacidade e mais possibilidades de aplicação. Atualmente, as máquinas CNC

estão presentes em todo tipo de indústria, pois a nova tecnologia se faz presente em diversos tipos de máquinas-ferramenta e processos. Além do torno e da fresadora/centro de usinagem, utiliza-se hoje o CNC em retificadoras, prensas, mandriladoras, máquinas de eletroerosão entre outras.

12.1 Benefícios pelo uso de máquinas CNC e influências

Entre os benefícios obtidos pelo uso de máquinas-ferramenta CNC, podem ser citados:

- fabricação de peças de geometria variada mais rápidas, com precisão e com melhoria do acabamento superficial;
- execução de usinagens com tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas;
- redução de custos e do inventário em processo;
- melhor repetibilidade na geometria e dimensões das peças produzidas, em lotes pequeno, médio ou seriados, possibilitando incremento na intercambialidade e facilidades de montagem e desmontagem.

A adoção de máquinas CNC permite melhor gerenciamento da produção. Os dados de produção são mais bem apresentados, possibilitam monitoramento remoto do *status* de cada máquina em qualquer lugar que tenha conexão com a internet.

Algumas influências que podem ser citadas no uso das máquinas CNC:

- investimentos maiores para a aquisição de equipamentos de produção;
- necessidade de mão de obra treinada e capacitada;
- adoção de estrutura na empresa para reduzir tempos de máquina parada e utilizar todo o potencial tecnológico das máquinas e, ao mesmo tempo, evitar que elas tenham vida reduzida.

O modelo de máquina difusor da tecnologia CNC entre os fabricantes nacionais foi o torno. Depois vieram as fresadoras e os centros de usinagem. Atualmente, os fabricantes dos equipamentos oferecem cursos de programação e operação de três a cinco dias, mas, no início da difusão do CNC, os cursos eram, no mínimo, de dez dias úteis. Esse é um dos indicadores da dificuldade enfrentada para a qualificação da mão de obra.

Nas escolas, houve uma demora em colocar o CNC como disciplina e, quando se iniciou, foi apenas de forma teórica. Hoje, é possível lecionar o componente CNC com o uso de *softwares* simuladores em um microcomputador. A utilização de máquina industrial ou o emprego de módulos didáticos permitem melhor assimilação pelo aluno.

No início da aplicação da máquina CN e depois com o CNC, as empresas estabeleceram como regra que essa tecnologia deveria ser empregada apenas



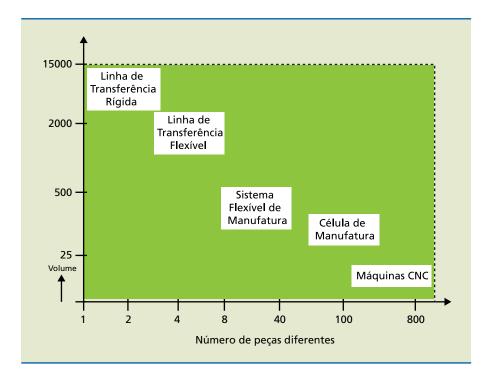


em produção de alta série, por causa de problemas estruturais. Dizia-se que a máquina chegava a ficar sem produzir 75% do tempo total, a fim de realizar preparações e controles. A utilização da máquina CNC permite, atualmente, a fabricação econômica de lotes unitários. A empresa bem estruturada em flexibilidade consegue atender à demanda de seus clientes e oferecer produtos a serem fabricados e entregues com bom prazo de entrega.

As empresas se obrigam a trabalhar com a mínima quantidade de estoque, mudando o sistema de produção por previsão para produção por encomenda. Precisam ter a maior flexibilidade possível, com redução do tempo de preparação (setup) entre as mudanças de um lote de produção para outro. É necessário organizar-se e estruturar-se em células e sistemas flexíveis de produção (FMS), utilizar as tecnologias CAD/CAM/CNC, as folhas de processo e outras metodologias para conseguir melhor gerenciamento.

O gráfico da figura 12.1 mostra a abrangência geral da máquina CNC na produção de quantidade de peças por lote (volume) *versus* número de peças/lotes diferentes. Aplicam-se à máquina CNC desde lotes unitários a lotes maiores de poucas peças diferentes em sistemas rígidos, como as linhas de transferência.

Figura 12.1Uso de máquinas CNC em função de peças diferentes.

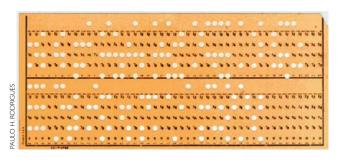


12.2 Componentes de uma máquina CNC, dados de máquina e funcionamento

No processo CNC, como nos computadores, as informações são controladas por uma unidade de processamento central (CPU). A entrada de dados pode ser feita pelo teclado, via cabo através de um computador remoto, ou por outros

periféricos de entrada e saída como o *pendrive*. Em suas origens, os sistemas CNC dependiam de cartões e fitas perfuradas (figura 12.2) como elementos de entrada e saída e para a execução das atividades. Hoje, um mesmo CNC pode ser usado em diferentes máquinas, pois são projetados para atender a uma ampla variedade de máquinas e equipamentos, com processamento específico para o tipo de operação realizada.

Figura 12.2 Exemplos de fitas e cartões perfurados.





A maioria dos comandos numéricos computadorizados utiliza linguagem de programação, de acordo com os códigos normalizados da ISO (International Organization for Standardization – Organização Internacional de Padronização). O programa CNC coloca esses códigos em sequência correta e ordenada, fazendo a máquina realizar os movimentos automaticamente, entre a peça e a ferramenta, com lógica operacional simples.

As maneiras de construção de programas CNC são de forma direta (CND – comando numérico direto), sistemas CAM (computador em auxílio à manufatura), por meio de dados do CAD, ou ainda pela linguagem interativa na própria máquina, partindo de blocos prontos em que o operador pode programar e simular no vídeo do CNC da própria máquina. A linguagem ISO na programação CNC não é considerada de muita complexidade, e em sistemas de informação diz-se que é uma linguagem de programação de baixo nível. Essa linguagem de programação fica mais "perto" do código de máquina, por esse motivo a maioria dos usuários de computador apresenta maior dificuldade para lidar com elas.

A máquina CNC é a junção da mecânica com a eletrônica necessária. Os componentes de uma máquina CNC, na parte mecânica, são similares aos componentes de máquinas convencionais. Coloca-se um sistema composto por fusos e porcas de esferas recirculantes (chamado *ball screw system*), que garante melhor precisão e menores folgas na movimentação dos carros, em lugar dos fusos de rosca trapezoidal. Alguns modelos de máquinas trabalham sem os fusos, empregando os motores lineares para o acionamento dos eixos, por repulsão magnética, mas isso ainda não é largamente utilizado por causa do alto custo e outras dificuldades que apareceram. O contato no deslocamento dos carros ocorre, na

-Linguagem de programação de baixo nível: é uma linguagem mais próxima da linguagem de máquina, como o Assembly.





maioria, por guias lineares, que permitem maiores velocidades. Nas máquinas de grande porte e altas capacidades de fixação de peças, predominam as guias com elemento autolubrificante e redução de atrito por causa das baixas velocidades empregadas. O sistema é chamado contato de barramento, que torna essas máquinas indicadas para altas remoções de material.

O sistema de lubrificação nas máquinas CNC é realizado automaticamente por distribuidores localizados nos pontos requeridos, partindo de uma unidade central na própria máquina. A refrigeração do corte é programável, com tipos de jatos diversos e sistema de filtragem acoplado. A retirada de cavacos é motorizada por transportadores que devem ser escolhidos pelo tipo de cavaco gerado na usinagem. As máquinas são fechadas por carenagens contra o lançamento de cavacos e respingos durante a usinagem e para a segurança de operação automática, sendo adotados sensores de segurança nas portas que dão acesso até mesmo ao painel elétrico das máquinas. O posicionamento das ferramentas ocorre de acordo com seu armazenamento em suportes tipo torre elétrica ou hidráulica na forma de disco, para tornos CNC, ou em magazines porta-ferramentas para até mais de 300 ferramentas em centros de usinagem e máquinas multitarefa.

Os itens eletrônicos mais importantes de uma máquina CNC são:

- o CNC propriamente dito, constituído de sua unidade central, teclado, visor e armário para acondicionamento das partes;
- os acionamentos de eixos e demais componentes eletrônicos dispostos no armário elétrico;
- os motores de cada eixo de movimentação acoplados diretamente aos fusos de esferas e alimentados pelo motor principal;
- o sistema de leitura de posicionamento de cada eixo, que pode ser direto por régua óptica, ou indireto por *encoder* e motor de passo.

Existem diversos fabricantes de CNC. Para cada aplicação de cada tipo ou modelo de CNC, é necessária a introdução dos dados de máquina, o que é realizado na etapa de fabricação das máquinas. Duas máquinas de mesmo modelo e mesmo CNC dificilmente têm os mesmos dados de máquina, portanto alguns deles serão diferentes. Os principais dados armazenados são divididos de acordo com os seguintes critérios:

- quanto às grandezas da máquina valor das coordenadas do ponto de referência; rotação máxima do fuso principal (eixo-árvore); velocidade máxima de deslocamento dos eixos; coordenadas de fim de curso por hardware e por software etc.;
- quanto ao comportamento do CNC nome dos eixos; resoluções de medição dos eixos; sentido de movimento na operação de referenciar os eixos; ativação de recursos opcionais no CNC.

Essas informações e dados são o registro de nascimento da máquina CNC e precisam ficar armazenados em diversas cópias pelo número de série da máquina para, se necessário, serem usadas em eventuais perdas de dados.

A máquina CNC é uma forma de automação programável, baseada em *softwares* e linguagem próprios. O processamento é feito no envio e retorno de informações, em malha fechada. As instruções são descarregadas pelo sistema operacional na memória RAM, após gerenciamento da unidade central de processamento. A figura 12.3 mostra um esquema de funcionamento de uma máquina CNC.

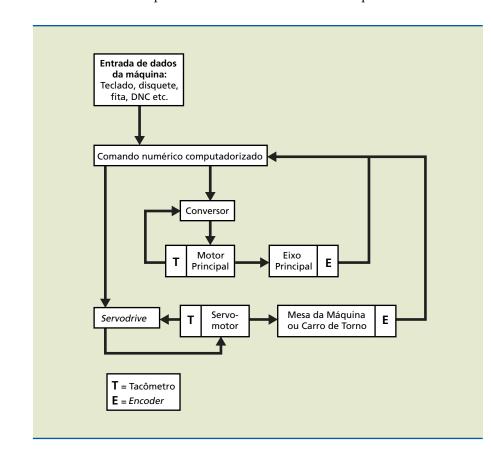


Figura 12.3
Esquema de funcionamento de máquina CNC.

As informações inseridas no CNC são processadas pela CPU. Esta envia as informações ao controlador da movimentação (motores) da máquina e as gerencia. Após a conclusão da atividade, é retornado um sinal de alerta à CPU de que a atividade foi concluída e a máquina está apta para receber novas instruções. Esse ciclo se repete até a finalização das atividades programadas. Na figura 12.3 podem ser observados:

- comando (CNC) recebe as informações e faz a compilação de dados;
- conversor faz o trabalho de conversão dos impulsos eletrônicos em impulsos elétricos, para realizar o acionamento do motor principal;
- tacômetro monitora, por medição de valores, o avanço e a rotação dos eixos da máquina. Fornece informação para o conversor ou servodrive da necessidade ou não de realimentação de seus respectivos motores;
- *servodrive* converte os sinais eletrônicos emitidos pelo comando da máquina em impulsos elétricos que acionam o servomotor;
- servomotor motor de velocidade variável, responsável pelo movimento dos eixos de programação que executam a usinagem. Por exemplo, nos tornos, o servomotor aciona os eixos de movimento da ferramenta de corte;





MECÂNICA 5

• *encoder* – chamado transdutor, é o responsável pela medição de posição dos eixos. Mede a posição linear ou a posição angular do eixo e fornece os dados de posição dos eixos para o comando da máquina. Para obter maiores precisões de medição do posicionamento linear, utiliza-se régua óptica, de cristal, e um cursor para a leitura da posição.

12.3 Programação CNC

A elaboração do programa de usinagem para máquinas CNC é exclusiva para cada modelo de máquina. As máquinas são diferenciadas pelo tipo e quantidade de operações que executam. O programador utiliza o sistema de coordenadas cartesiano para o direcionamento dos movimentos do carro ou da mesa, segundo a norma DIN. Em tornos, são dois eixos lineares a 90°. Em fresadoras e centros de usinagem, são três eixos lineares também a 90° entre si. Para ambos os casos, tornos ou centros de usinagem, podem ser mostrados os eixos pelo emprego dos dedos da mão direita, recurso conhecido como a regra da mão direita (figura 12.4). Existem ainda, os eixos rotativos associados a cada eixo linear, totalizando seis eixos de programação. O programador avalia e define diversas informações, como o tipo de fixação para o formato da peça e do processo, a geometria e as dimensões da ferramenta, entre outras. Há também máquinas com mais de seis eixos de programação, mas geralmente eles não são eixos que interpolam ao mesmo tempo.

Figura 12.4 Exemplo da regra da mão direita em centros de usinagem horizontal.

Sigla de Deutsches-

e.V. (DIN) (em

Alemão para

padronização,

representante

da Organização

na Alemanha.

Internacional para

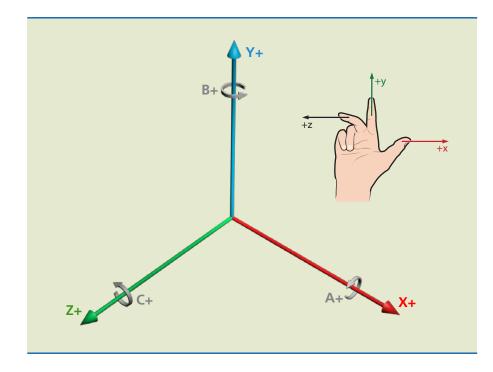
Padronização (ISO)

Institut für Normung

português, Instituto

Normatização). É a

organização nacional na Alemanha para



A figura 12.4 mostra os eixos lineares e rotativos de uma máquina CNC, e que, em torno CNC com dois eixos, a ferramenta estaria na mesma posição da ferramenta de fresamento da figura, adotando o plano formado pelos eixos X, Z. Por convenção internacional, o eixo Z é direcionado no sentido paralelo ao eixo-árvore principal da máquina, o que define, geralmente, profundidade em usinagem.

O posicionamento e a movimentação da máquina durante a usinagem são definidos com base no sistema de referência, ou origem, para a definição do valor e o sinal das coordenadas de cada eixo. As coordenadas são funções de programação (lineares X, Y, Z e rotativas A, B, C, acompanhadas de valores numéricos) que definem o posicionamento na usinagem CNC. São obtidas na geometria do desenho da peça, orientando o programador. O sinal da coordenada depende da referência adotada pelo programador, do sistema de coordenadas absoluto ou incremental e do posicionamento e movimentação que serão executados. A movimentação da máquina será na ordem sequencial programada dessas coordenadas.

O programador analisa o desenho da peça (figura 12.5), escolhe o sistema de coordenadas (as coordenadas absolutas são largamente utilizadas), atribuindo uma origem que coincida com um ponto ou eixo geométrico da peça de onde partirão as medidas para escrever o programa CNC. O programador identifica todas as medidas necessárias para a fabricação e estabelece a estratégia ou sequência de usinagem.

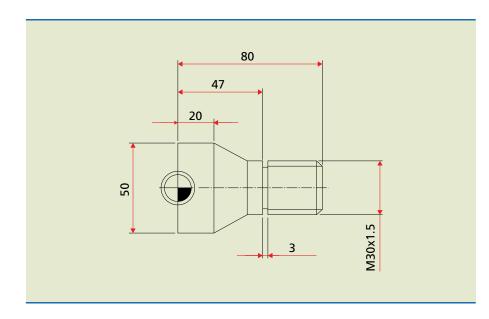


Figura 12.5
Desenho de peça a ser feita por CNC.

É necessário conhecer os dados técnicos e a forma de movimentação da máquina e, ainda, ter experiência anterior com usinagem. Em programação assistida, define-se a origem, informam-se ao computador a geometria da peça, os dados da máquina e estratégia da usinagem em geral incluindo o tipo e características da ferramenta, para que o computador execute a programação CNC da usinagem requerida.

12.3.1 Sistema de coordenadas na máquina CNC

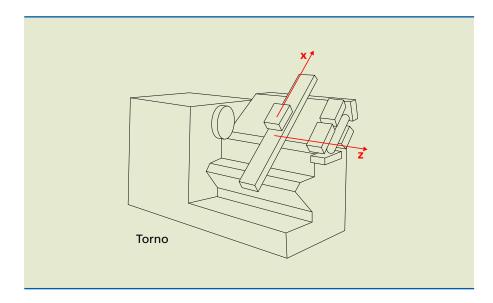
O sistema de coordenadas pode variar de posição em função do tipo de máquina, mas sempre segue a regra da mão direita, apontando o sentido positivo dos eixos imaginários. O eixo Z geralmente define profundidades, pois é coincidente ou paralelo ao eixo-árvore principal (ver exemplo na figura 12.6).





CAPÍTULO 12

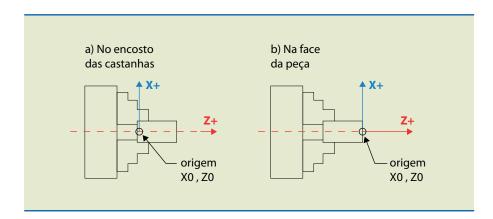
Figura 12.6Exemplo de definição de sistema de coordenadas em tornos CNC.



Nos tornos, existem dois eixos imaginários, designados pelas letras X e Z:

- o eixo X relaciona-se com o diâmetro da peça;
- o eixo Z, coincidente com o eixo-árvore, relaciona-se com as dimensões longitudinais da peça (comprimentos). Na figura 12.7 é mostrada a disposição dos eixos no encosto das castanhas (a) e na face da peça (b), como sendo o ponto zero peça. O sentido de X+ depende da disposição da torre principal porta-ferramenta, se é dianteira ou traseira, já que o eixo X positivo é direcionado da linha de centro do eixo-árvore para a torre.

Figura 12.7
Disposição dos eixos:
a) no encosto das castanhas;
b) na face da peça.



12.3.2 Ponto zero e pontos de referência

Em uma máquina CNC existem pontos referenciais. São posicionados na fabricação da máquina e auxiliam na operação e programação. Os valores numéricos ficam armazenados nas páginas de dados das máquinas como parâmetros.

Para a programação CNC e para o preparador e o operador da máquina é importante a localização do ponto zero peça. Os movimentos das ferramentas na usinagem são realizados com o auxílio do sistema de coordenadas.

A figura 12.8 mostra os pontos referenciais em um torno CNC.

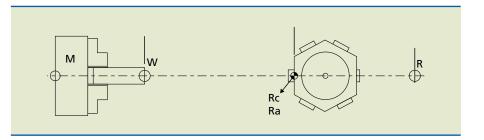


Figura 12.8
Pontos referenciais em um torno CNC.

Na figura:

• M = ponto zero máquina

A partir desse ponto são definidos todos os outros pontos de referência. É fixado pelo fabricante e geralmente determina, para o torno, o centro do eixo-árvore e a superfície de encosto da placa no eixo-árvore (atrás da placa).

• R = ponto de referência da máquina

A posição exata desse ponto, para cada eixo de movimento, é definida quando a máquina está em fase final de montagem. É o ponto de controle de medição dos movimentos dos carros e das ferramentas. A figura 12.9 ilustra outro exemplo.

Ao ser desligado, ou na eventual falta de energia elétrica, o comando perde a referência, isto é, perde o valor da coordenada da posição dos eixos comandados. Ao ligarmos a máquina, costumamos deslocar os carros até esse local, antes de iniciar a usinagem, a menos que a máquina possua um opcional de "zero absoluto".

Com isso, a posição das coordenadas do ponto de referência em relação ao ponto zero da máquina possui sempre o mesmo valor conhecido e geralmente fora do campo de trabalho.

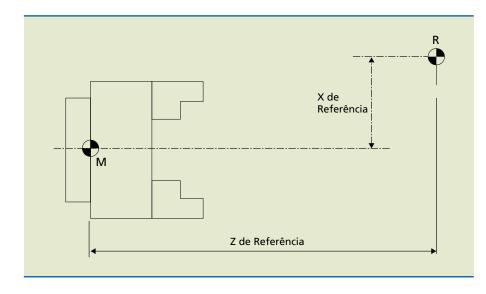


Figura 12.9Pontos de referência.





MECÂNICA 5

• RC e Ra = pontos de referência da ferramenta

O ponto de referência da ferramenta em geral encontra-se na face de encosto da ferramenta no dispositivo (torre porta-ferramenta), onde o ponto de contato da ferramenta RC coincide com o ponto de assento da ferramenta Ra. Nos centros de usinagem, está no contato da ferramenta com o eixo-árvore.

As cotas X e Z são importantes, pois definem o campo de trabalho da ferramenta e são ajustadas na etapa de preparação da máquina. As ferramentas, por possuírem diferentes perfis, apresentam medidas diferentes de X e de Z na preparação e *preset*. Elas devem ser tomadas e acondicionadas na página de dados da ferramenta ou de corretor. Quando o programa CNC indicar que dada ferramenta deve ser posicionada para realizar a usinagem, com o número da ferramenta é informada a posição desse corretor, fazendo a máquina reconhecer as diferenças de X e de Z entre as ferramentas. A figura 12.10 mostra um exemplo com os pontos de referência da ferramenta.

Figura 12.10
Pontos de referência
da ferramenta.

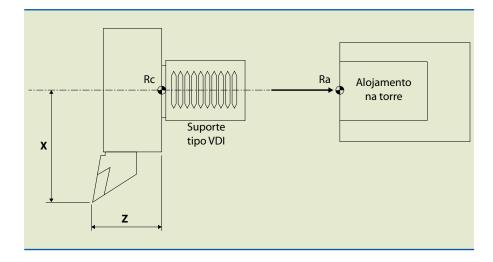
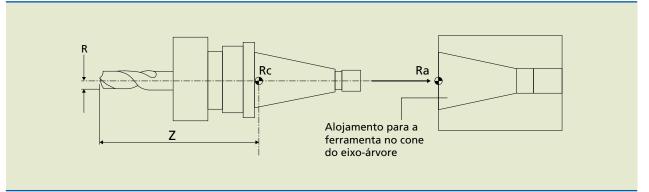


Figura 12.11
Alojamento para a ferramenta no cone do eixo-árvore.

Ao fazer o *preset* das ferramentas na atividade de preparação na própria máquina, automaticamente estão sendo apuradas essas dimensões, tanto a transversal X como a de comprimento Z. A figura 12.11 ilustra um esquema em que é mostrado o alojamento para a ferramenta no cone do eixo-árvore. Na própria figura podem ser observados os pontos de referência para a ferramenta.



No caso de ferramentas rotativas, verifica-se que existem diferenças de comprimento Z quando são fixadas nos adaptadores.

Quando a usinagem da peça é do tipo fresamento tangencial, indica-se também o raio da ferramenta (R). Na programação CNC, os valores das coordenadas são programados nas medidas do desenho, e na usinagem com ferramentas de usinagem rotativas o posicionamento nessas coordenadas é dado pelo centro do eixo-árvore.

A adoção correta de compensação ou correção do raio da ferramenta faz com que sejam programados os valores da peça e o posicionamento da ferramenta na tangente à trajetória programada. A sequência a ser seguida para memorizar os dados das ferramentas varia de acordo com a máquina e o CNC. Havendo necessidade de corrigir a medida usinada por estar utilizando uma ferramenta de raio pouco maior ou pouco menor do que o cadastrado, realiza-se a correção do valor do raio da ferramenta na página de dados da ferramenta.

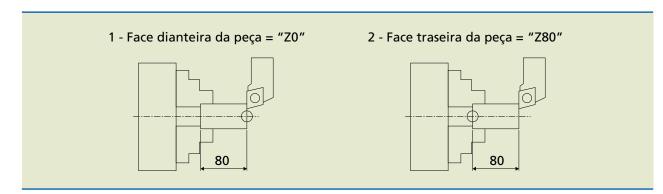
No processo de programação para usinar furos com brocas, programam-se as coordenadas do centro do furo, que geralmente são fornecidas nos desenhos. Nesse caso, o posicionamento da ferramenta não precisa de correção de raio da ferramenta.

• W = ponto zero peça

O ponto zero peça é o mais importante em programação CNC. É determinado pelo programador como uma das medidas preliminares na execução do programa CNC. É recomendável que a definição do ponto zero peça seja feita em um ponto que facilite transformar as medidas do desenho em valores de coordenadas para programação.

Em torneamento, em geral o ponto zero é determinado no cruzamento a 90° da linha de centro do eixo-árvore com uma das faces da peça acabada (figura 12.12). Os valores das coordenadas desse ponto ao zero da máquina são memorizados no comando durante a preparação da máquina, em página específica, utilizando procedimentos definidos. No início do programa CNC, coloca-se uma função preparatória G54 (até G59), que orienta a disposição a adotar esse mesmo número de ponto zero na preparação. A máquina lê a função no programa CNC e busca o valor de deslocamento do zero peça, compila e executa o posicionamento da ferramenta corretamente. É válido também se for necessário ter mais de um ponto zero na peça.

Figura 12.12
Determinação do ponto zero.



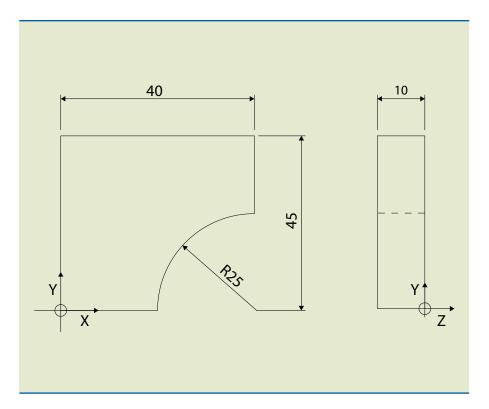




CAPÍTULO 12

Em centros de usinagem, o ponto zero é definido no cruzamento dos eixos X, Y e Z perpendiculares entre si (figura 12.13), ocorrendo a programação e a operação conforme foi descrito para o torneamento. Usam-se uma das ferramentas de geometria e dimensões X e Z conhecidas ou um dispositivo auxiliar tipo apalpador eletrônico na operação de definição do zero peça.

Figura 12.13Localização do ponto zero da peça para fresamento.



Para programar em todos os tipos de máquinas CNC é importante lembrar que, uma vez posicionada a origem do sistema de referência para a programação, de maneira geral, é a ferramenta que se desloca, independentemente do fato de a peça estar se movimentando. O posicionamento que a ferramenta vai atingir, ou seja, a meta ou ponto a ser alcançado ao final da trajetória da ferramenta é determinado pelas coordenadas programadas, que o CNC lê, processa e faz a máquina executar. As coordenadas podem ser programadas em valor absoluto ou incremental. Sua definição é a mesma para qualquer tipo de máquina.

12.3.3 Sistema de coordenadas absolutas

É o mais utilizado. É aquele em que todos os pontos são definidos por meio de um sistema de coordenadas ortogonal, a partir da intersecção dos eixos, chamado origem (ver figura 12.14 e tabela 12.1). Ou seja, todos os pontos a serem atingidos são programados por coordenadas medidas em relação à origem (origem fixa), chamada zero peça. O sinal da coordenada é definido em função dessa origem, ou seja, o sinal é positivo ou negativo se a meta (ou o objetivo a atingir) programada está no campo positivo ou negativo do eixo. Nos valores com sinal positivo não é necessário colocar o sinal.

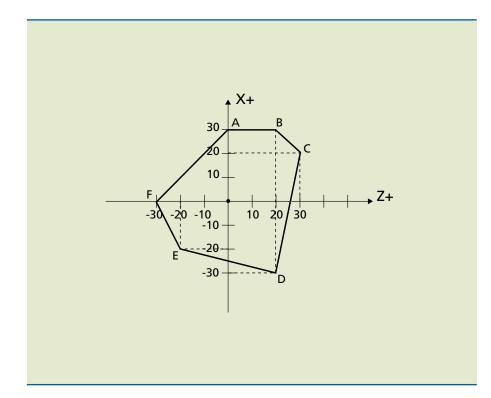


Figura 12.14
Sistema de coordenadas ortogonal, a partir da intersecção dos eixos.

Ponto	Valor em X	Valor em Z	Comentário
Α	+30	0	A ferramenta parte de onde ela estiver para atingir a meta programada que é o ponto A.
В	+30	+20	A ferramenta se desloca de A e atinge o ponto B.
С	+20	+30	A ferramenta se desloca de B e atinge o ponto C.
D	-30	+20	A ferramenta se desloca de C e atinge o ponto D.
E	-20	-20	A ferramenta se desloca de D e atinge o ponto E.
F	0	-30	A ferramenta se desloca de E e atinge o ponto F.
Α	30	0	A ferramenta se desloca de F e atinge o ponto A.

Tabela 12.1
Coordenadas dos pontos
observados na figura 12.14

12.3.4 Sistema de coordenadas incrementais

É o sistema em que todos os pontos são definidos no plano por meio de um sistema de coordenadas ortogonais, porém o ponto anterior atingido é chamado origem para efetuar o próximo movimento (origem flutuante) (ver figura 12.15 e tabelas 12.2 e 12.3.). O sinal da coordenada é definido em função da direção do movimento, ou seja, se o movimento é contrário ao sentido positivo do eixo, a coordenada tem sinal negativo.





Figura 12.15Sistema de coordenadas

incrementais.

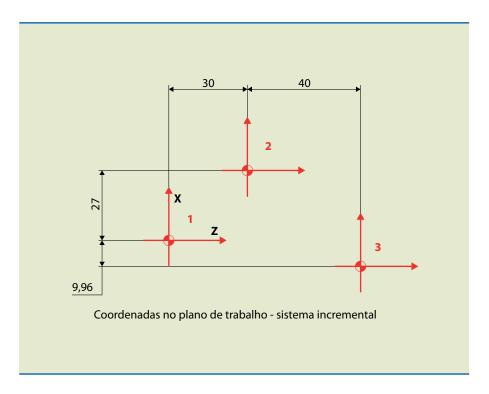


Tabela 12.2

Sistema de coordenadas incrementais (movimentos de I a 3, coordenadas a serem programadas)

Ponto	Valor em X	Valor em Z	Comentário
I	-	-	A ferramenta está no ponto I pelo deslocamento anterior.
2	+27	+30	A ferramenta se desloca de 1 e atinge o ponto 2.
3	-36,96	+40	A ferramenta se desloca de 2 e atinge o ponto 3.

Tabela 12.3

Sistema de coordenadas incrementais (movimentos de 3 a 1, coordenadas a serem programadas)

Ponto	Valor em X	Valor em Z	Comentário
3	-	-	A ferramenta está no ponto 3 pelo deslocamento anterior.
2	+36,96	-4 0	A ferramenta se desloca de 3 e atinge o ponto 2.
- 1	-27	-30	A ferramenta se desloca de 2 e atinge o ponto 1.

Sabemos que valores com sinal positivo dispensam os sinais.

O sistema de coordenadas incremental é pouco utilizado. Como exemplo, é empregado visando facilitar a programação, em coordenadas colocadas dentro de rotinas de ciclos fixos.

12.4 Programação verbal – códigos, funções e caracteres para a programação

O programador deve conhecer a tecnologia do processo de usinagem para fazer um programa CNC. O objetivo é garantir a confecção da peça, a segurança do operador e a preservação do sistema (máquina, ferramenta, dispositivos). O desenho, o material, os dispositivos e as ferramentas que serão utilizados são fatores determinantes para que o programador realize da melhor forma a estratégia e o programa CNC.

Inicialmente, conhecendo a operação que será executada dentro das fases ou etapas de fabricação e analisando a geometria do desenho e tolerâncias, o programador identifica o formato e o tipo de material da peça para selecionar o ferramental necessário e a fixação adequada. É importante possuir domínio em interpretação de desenho técnico, sabendo identificar as tolerâncias, rugosidades e demais informações.

É necessário que o programador conheça os mecanismos da máquina utilizada no processo a partir da definição de qual seria a mais indicada para atender as exigências da usinagem. Ele deve conhecer também as características técnicas, recursos de programação do CNC da máquina que está programando e como estão sendo aplicados os dispositivos de fixação e as ferramentas de corte.

As ferramentas devem ser escolhidas com base no tipo de processo e as exigências da usinagem (desbaste, acabamento, rugosidade etc.) e, ainda, pelo tipo e formato do material.

Ao produzirem as peças no menor tempo possível, as ferramentas devem garantir, por meio da adoção de parâmetros de corte ideais, a confecção das peças na geometria e tolerâncias requeridas oferecendo segurança ao operador da máquina e a preservação do equipamento e da ferramenta.

Os parâmetros são indicados pelos fabricantes das ferramentas em manuais e tabelas técnicas, ordenados pelo tipo de processo, tipo de material da peça, além da forma, geometria e material da ferramenta. Os parâmetros de corte e a sequência programada podem ser ajustados ao longo da fabricação do(s) lote(s) de peça(s), para melhor otimização do processo.

A partir desta análise, deve-se definir a estratégia e a sequência de operações. O programa CNC é uma sequência de códigos para executar ações automáticas nos equipamentos (item 12.4.2). Como estamos abordando a programação verbal e não a programação assistida, deve-se ter muita cautela para evitar colisões, acidentes e refugos das peças ao fazer a simulação da sequência programada. Em programação assistida, a simulação pode ser feita antes de inserir o programa CNC na máquina.





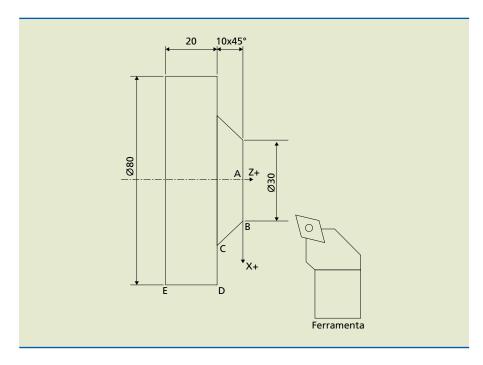
12.4.1 Exemplos de programação – geometrias com descrição

No torneamento em geral são usados dois eixos lineares:

- o eixo X referente ao diâmetro;
- o eixo Z referente ao comprimento.

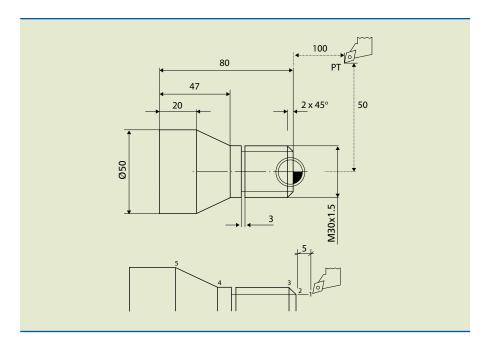
Exemplo I

Figura 12.16
Exemplo | de torneamento usando CNC.



Exemplo 2

Figura 12.17 Exemplo 2 de torneamento usando CNC.



De acordo com a origem ou ponto zero da peça, são adotadas as coordenadas dos pontos necessários para a ferramenta usinar a peça na geometria do desenho da figura 12.17 – em coordenadas absolutas, sendo PT o ponto de troca da ferramenta, afastado nas coordenadas X100 (a cota 50 é no raio) Z100 – esses pontos têm as coordenadas mostradas na tabela abaixo:

Ponto	PT	PI	P2	P3	P4	P5
X	100	26	26	30	30	50
Z	100	5	0	-2	-33	-60

Tabela 12.4Coordenadas dos
pontos da figura 12.17

Pode ser ordenada a sequência de usinagem, sendo N o número de sequência, como mostra a tabela 12.5:

Tabela 12.5Sequência de usinagem

De/Para	Nº	Trajetória	Tipo de avanço	Ponto final	Observação
PT a PI	NI	Linear	Rápido	X26 Z5	Aproximação em rápido
PI a P2	N2	Linear	Usinagem	X26 Z0	Início do chanfro
P2 a P3	N3	Linear	Usinagem	X30 Z-2	Final do chanfro
P3 a P4	N4	Linear	Usinagem	X30 Z-33	
P4 a P5	N5	Linear	Usinagem	X50 Z-60	
P5 a PT	NI4	Linear	Rápido	X100 Z100	Retorno ao ponto de troca

Exemplo 3

Seja uma fresa de topo com diâmetro 32 mm a usinar na profundidade 2 mm no eixo Z e o ponto de troca da ferramenta PT dado por parâmetro de máquina, pois o centro de usinagem possui magazine e o posicionamento é sempre no mesmo local.

Solução

Em programação de fresamento tangencial, é ativada a compensação de raio da ferramenta para programar o perfil do desenho, precisando ser deslocado pelo menos o valor do raio da ferramenta para ativar a compensação. A ferramenta se movimenta em uma trajetória com o centro deslocado e tangenciando o perfil programado. Se não for feita a compensação de raio, as coordenadas programadas são as da posição real do centro da ferramenta, procedimento muito usado em furações com broca, não se executando, portanto, o perfil da peça conforme desenho mostrado na figura 12.17. No final, é compensado o raio da ferramenta (figura 12.19). As coordenadas dos pontos e sequência de usinagem são mostradas nas tabelas 12.6 e 12.7.





Figura 12.18 Fresamento usando CNC.

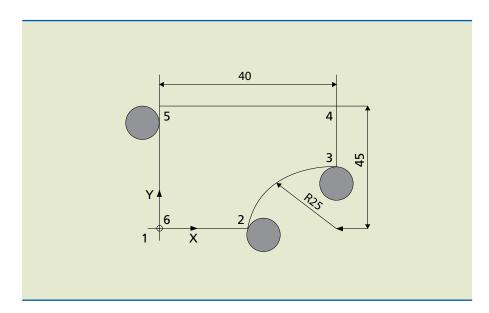


Tabela 12.6Coordenadas dos
pontos da figura 12.18

Ponto	PT	PI	P2	Р3	P4	P5	P6
×	_	-25	15	40	40	0	0
Y	_	-10	0	25	45	45	-5
Z	_	-2	-2	-2	-2	-2	-2

Tabela 12.7 Sequência de usinagem

De/Para	Nº	Trajetória	Tipo de avanço	Ponto final	Observação	
PT a PI	NI	Linear	Rápido	X-25 Y-10	Aproximação em XY	
PT a PI	N2	Linear	Rápido	Z-2	Aproximação em Z	
Ativar	N3	Linear	Usinagem	X-5 Y0	Ativa compensação de raio	
PI a P2	N4	Linear	Usinagem	X15 Y0		
P2 a P3	N5	Arco horário	Usinagem	X40 Y25	Raio 25 mm	
P3 a P4	N6	Linear	Usinagem	X40 Y45		
P4 a P5	N7	Linear	Usinagem	X0 Y45		
P5 a P6	N8	Linear	Usinagem	X0 Y-5	Prepara para descompensar raio	
Desativar	N9	Linear	Usinagem	X-10 Y-15	Descompensa o raio	
P6 a PT	NI0	Linear	Rápido	Retorna a ferra	menta à posição PT em Z	
P6 a PT	NII	Linear	Rápido	Retorna a ferramenta à posição PT em X e Y		

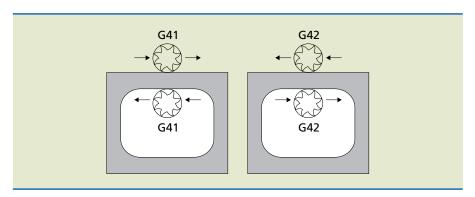


Figura 12.19Raio da fresa compensado na trajetória.

12.4.2 Estrutura de programação CNC - lista de códigos e funções

As principais partes de um programa CNC são as seguintes:

 Bloco – Quando foi criada a programação CNC, cada linha do programa era chamada tecnicamente de "bloco". Dentro do bloco são inseridos os códigos alfanuméricos de funções, formando uma "palavra", de acordo com o formato de cada função. Num mesmo bloco, existem funções ou palavras que podem ou não aparecer junto a outras. A definição depende de cada equipamento.

Os blocos devem aparecer em sequência ordenada no programa para executar corretamente a atividade, segundo lógica operacional simples. Em modo automático, é realizada a execução em sequência de todos os blocos. Em modo de operação definido como "bloco a bloco", a máquina lê e executa a operação programada de um bloco ou linha e aguarda autorização do operador para executar o próximo bloco.

Os CNCs caracterizam-se pela velocidade de processamento dos blocos (blocos por unidade de tempo) e quantidade de blocos que têm capacidade de ler na frente do bloco que está sendo executado (blocos à frente).

 Cabeçalho de programa – É uma sequência de um ou mais blocos no início do programa CNC que contém informações, por exemplo: identificação do número do programa CNC, de qual peça é o programa CNC e definições de formatação diversas. Os caracteres abaixo definem se o programa é principal ou sub-programa:

% = programa principal (alguns comandos podem utilizar a letra O); P ou L = sub-rotina / sub-programa;

- Comentários Normalmente, o que for colocado <u>entre parênteses</u> ou após o caractere ponto-e-vírgula (;) num programa CNC serve apenas como comentário ou informação adicional ao operador, ou seja, não executa funções na máquina.
- Fim de programa Informa e executa o término da operação de usinagem e reposicionamento no início do programa. Normalmente, é programada a função M30 no último bloco para definir o fim de um programa principal e a função M99 para final de sub-programa.





MECÂNICA 5

Para facilitar a programação, são criados ciclos de usinagem, que são rotinas de movimentos que se repetem quando é feita uma operação. Por exemplo, o roscamento em torneamento e a furação em centros de usinagem. Algumas versões de CNC possuem programação interativa que facilita a programação diretamente na máquina.

Um código pode ter significado diferente se considerados comandos diferentes (Siemens, Fanuc etc.) ou se comparado com outro modelo de máquina (torno e fresa). Por exemplo, a função X pode ser o posicionamento do eixo X (com G00, G01, G02, G03) ou o tempo de parada e permanência quando programado com G04 em alguns CNCs.

Conhecendo as funções de programação, pode-se elaborar o programa CNC.

Caractere	Significado
% e O	Número do programa
N	Número da linha (bloco)
G	Função preparatória
X	Coordenada para movimento no eixo X
Υ	Coordenada para movimento no eixo Y
Z	Coordenada para movimento no eixo Z
I	Distância incremental paralela ao eixo X (interpolação circular)
J	Distância incremental paralela ao eixo Y (interpolação circular)
K	Distância incremental paralela ao eixo Z (interpolação circular)
R	Raio da ferramenta / Recuo da ferramenta no ciclo de desbaste – torno
М	Função miscelânea
Н	Altura da ferramenta / Posição de dados da ferramenta
D	Posição nos dados de ferramenta com o valor do raio da fresa para compensar
Т	Número da ferramenta
S	Rotação do eixo-árvore / Velocidade de corte

Caractere	Significado
F	Avanço da ferramenta (mm/min ou mm/rpm)
U	Profundidade de corte em X no raio / Material em X para acabamento – torno
W	Material deixado em Z para acabamento – torno
Р	Número de um subprograma
; ou #	Caractere que aparece em todos os blocos: fim de bloco

Exemplo de um bloco em torneamento: N20 G01 X20 Z2 F02 M03 S2000

É importante conhecer as características de cada máquina para saber, entre outras, quais funções podem ser programadas na mesma linha e qual o significado de cada uma delas.

As funções G (preparatórias) e M (miscelâneas) são as funções que mais aparecem e se repetem em um programa CNC. As funções G definem as operações que a máquina tem de fazer, preparando-a para executar movimentos e reconhecer unidades de medida. As funções G podem ser **modais** e **não modais**. As funções modais, depois de programadas, permanecem na memória do comando e valem para todos os blocos posteriores. Já as não modais, são válidas apenas nos blocos que as contêm: todas as vezes em que são requeridas, devem ser programadas.

Lista de algumas funções preparatórias (funções G)

- G00 Avanço rápido
- G01 Interpolação linear
- G02 Interpolação circular horária
- G03 Interpolação circular anti-horária
- G04 Tempo de permanência
- G20 Referência de unidade de medida (polegada)
- G21 Referência de unidade de medida (métrico)
- G28 Retorna eixos para referência de máquina
- G33 Ciclo de roscamento
- G40 Cancela compensação do raio da ferramenta
- G41 Ativa compensação do raio da ferramenta (esquerda)
- G42 Ativa compensação do raio da ferramenta (direita)
- G54 a G59 Referência de coordenada de trabalho (definição do zero peça)
- G81 a G84 Ciclos de furação
- G80 Cancela o ciclo de furação
- G90 Sistema de coordenadas absolutas
- G91 Sistema de coordenadas incrementais





G92 – Estabelece limite de rotação (rpm)

G94 – Estabelece avanço x/minuto

G95 – Estabelece avanço x/rotação

G96 – Estabelece programação em velocidade de corte constante

G97 – Estabelece programação em rpm

Algumas funções miscelâneas (funções M)

M00 – Parada programada

M01 – Parada opcional

M03 – Ativa a rotação do eixo-árvore no sentido horário

M04 – Ativa a rotação do eixo-árvore no sentido anti-horário

M05 – Desliga a rotação do eixo-árvore

M06 – Troca automática de ferramentas em caso de fresadoras

M08 – Liga o fluido de corte

M09 – Desliga o fluido de corte

M30 – Finaliza o programa

M98 – Chama o subprograma

M99 – Encerra o subprograma e volta ao programa principal

Geralmente, os blocos e informações inseridos ENTRE PARÊNTESES servem apenas como COMENTÁRIOS, NÃO SÃO EXECUTADOS PELOS CNC.

12.4.3 Exemplos de programas CNC

1. Exemplo de blocos de programa com comentários

%2341 (programa nº 2341)

(PROGRAMA INICIAL) - comentário

N10 G21 G40 G90 G94 (bloco 10 = N10: funções de cabeçalho)

N20 G28 U0 W0 (retorno ao ponto de referência – ponto de troca de ferramenta)

(FERRAMENTA DE FACEAR) – comentário

N30 T01 H01 M6 (ferramenta posição 1 na torre e dados da ferramenta posição 1 na página de dados da ferramenta)

N40 G97 S250 M3 (ativa a 250 RPM constante e liga o eixo-árvore com o M3 sentido horário)

N50 G00 G54 X200 Y100 Z10 (posicionamento rápido e linear da ferramenta a partir do zero peça G54 nas coordenadas X, Y e Z medidas do zero peça em absoluto)

N60 G01 Z0 F30 M8 (posicionamento linear apenas no eixo Z com avanço da ferramenta 30 mm/min e liga o refrigerante)

N70 X100 F80 (posicionamento linear no eixo X com avanço da ferramenta 80 mm/min)

N80 G00 Z10 M9 (posiciona em rápido linear da ferramenta em Z10 desliga o refrigerante)

N90 G28 U0 W0 (retorno ao ponto de referência – ponto de troca de ferramenta)

N100 M30 (fim de programa)

2. Exemplo fresamento de contorno (figura 12.20)

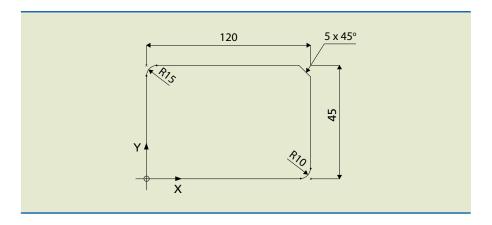


Figura 12.20
Fresamento de contorno usando CNC.

(PROGRAMA PARA FRESAR O PERFIL COM FRESA DE TOPO DIAM. 10 mm)

N10 G21 G40 G90 G94 (cabeçalho do programa)

N20 G00 X235 Y125 Z125 (Afastamento EM RÁPIDO para troca de ferramenta)

N30 T01 M6 D1 (troca da ferramenta, ferramenta 1 no cone do eixo-árvore e ativa corretor posição de dados 1 na página dados da ferramenta)

N40 G97 S1535 M3 (liga o eixo-árvore com 1535 rpm na ferramenta, sentido horário)

N50 G00 X-10 Y-10 (posicionamento da ferramenta em rápido próximo do início da usinagem, X e Y coordenadas do centro da fresa EM RELAÇÃO AO ZERO PEÇA)

N60 Z20 (aproximação em rápido até 20 mm de distância entre a ponta da ferramenta e o plano que define a origem em Z)

N70 G01 Z-5 F200 (posicionamento em Z, com 5 mm de profundidade a partir da face origem do eixo Z, com avanço 200 mm/min)





MECÂNICA 5

CAPÍTULO 12

N80 G42 Y0 F200 M8 (ativa compensação de raio da ferramenta à direita da trajetória com G01 modal, liga o refrigerante — a ferramenta estará tangenciando a linha de Y0)

N90 X110 F40 (executa usinagem ao longo do eixo X até 110 mm da origem – posiciona a ferramenta no início do arco de raio 10 mm, com avanço 40 mm/min)

N100 G03 X120 Y10 R10 (interpolação circular anti-horário de raio 10 mm – co-ordenadas X e Y no final do arco em relação ao zero peça)

N110 G01 Y40 (se houver interpolação linear após G02 ou G03, necessita informar G01 – usinagem ao longo do eixo Y)

N120 X115 Y45 (executa o chanfro de 5 x 45°)

N130 X15 (executa usinagem ao longo do eixo X até 15mm da origem - posiciona a ferramenta no início do arco de raio 15mm, com avanço 40mm/min programado em N90)

N140 G03 X0 Y30 R15 (interpolação circular anti-horário de raio 15 mm – coordenadas X e Y no final do arco em relação ao zero peça)

N150 G01 Y-10 (se houver interpolação linear após G02 ou G03, necessita informar G01 – usinagem ao longo do eixo Y passando 10 mm do ponto origem em Y)

N160 G40 X-10 Y-15 (cancela a compensação do raio – movimento sem usinagem)

N170 G00 Z20 M9 (desloca a ferramenta EM RÁPIDO a 20 mm de distância entre a ponta e a origem Z0 e desliga o refrigerante)

N180 X235 Y125 Z125 (afastamento EM RÁPIDO para troca de ferramenta)

N190 M30 (fim de programa)

3. Exemplo torneamento de perfil com a compensação de raio (figura 12.21)

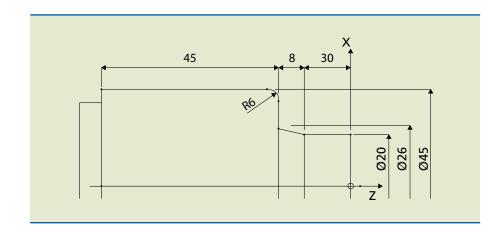


Figura 12.21
Torneamento de perfil
com a compensação
do raio usando CNC.

(EIXO REBAIXADO COM RAIO DE CONCORDÂNCIA COM O USO DE DUAS FERRAMENTAS: UMA PARA FACEAMENTO E UMA PARA ACABAMENTO)

(PEÇA EM BRUTO JÁ DESBASTADA)

N10 G21 G40 G90 G95 (cabeçalho do programa)

N20 G00 X235 Z125 M9 (ferramenta e carros posicionados no ponto de troca da ferramenta)

N30 T0202 (chamada da ferramenta 2 e giro da torre, ativa corretor 2 em dados da ferramenta)

N35 G92 S3000 (ativa Máximo de 3000 rpm durante a usinagem até ser substituída por outra programação de Máx rpm)

N40 G96 S220 M4 (ativa velocidade de corte constante 220 m/min e liga a placa no sentido anti-horário)

N50 G00 X35 Z0 M8 (aproximação da ferramenta em rápido – G00 - no diâmetro 35 mm e na linha da origem em Z e liga o refrigerante de corte)

N60 G01 X-1 F0.25 (execução do faceamento até passar 0,5 mm do centro da peça)

N70 G00 X55 Z2 (recuo da ferramenta em rápido)

N80 G00 X235 Z125 M9 (retorno da ferramenta ao ponto zero e desliga o refrigerante)

N90 T0404 (chamada da ferramenta 4 e giro da torre, ativa corretor 4 em dados da FERRAMENTA DE ACABAMENTO EXTERNO)

N100 G96 S240 M4 (ativa velocidade de corte constante 240 m/min e liga a placa sentido anti-horário)

N110 G00 X25 Z5 M8 (aproximação da ferramenta em rápido no diâmetro 25 mm, a 5 mm da face e liga o refrigerante)

N120 G01 G42 X20 Z2 F0,4 (ativa a compensação do raio da ferramenta a direita da trajetória com avanço programado 0,4 mm/rpm — não é usinagem — posiciona a ferramenta pronta para tornear o diâmetro 20 mm)

N130 G01 Z-30 F0,25 (torneamento do diâmetro 20 mm com avanço 0,25 mm/rpm até a coordenada de profundidade Z-30)

N140 X26 Z-38 (torneamento do cone, atingindo o diâmetro 26 mm e 38 mm da face)





N150 X33 (faceamento da parede e posicionamento no ponto inicial do arco, no diâmetro 33 mm, definido por dia. 45 mm menos 2x raio 6 mm)

N160 G03 X45 Z-44 R6 (interpolação circular com raio 6mm)

N170 G01 Z-83 (torneamento do diâmetro 45 mm até a profundidade de 83 mm da face)

N190 G40 X48 Z-84 M9 (cancela a compensação do raio da ferramenta e desliga o refrigerante de corte)

N180 G00 X235 Z125 M5 (recuo da ferramenta ao ponto de troca e desliga a rotação da placa)

N190 M30 (fim de programa)

Apêndice

Identificação ISO das pastilhas ou insertos



I.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
С	N	М	G	12	04	08	(E)	(N)	МН

1.1	Formato do inserto		2. Ângulo de folga			
Símbolo	Formato do i	nserto	Símbolo	Ângulo de fol	ga	
н	Hexágono	\bigcirc	Α	3°		
0	Octógono		В	5°		
P	Pentágono	\bigcirc	С	7 °		
S	Quadrado		D	15°		
Т	Triangular		E	20°		
С	Romboidal 80°		F	25°		
D	Romboidal 55°		G	30°		
E	Romboidal 75°		N	0°		
F	Romboidal 50°		P	11°		
М	Romboidal 86°		0	Outros ângulos de folga Principais ângulos de folga		
V	Romboidal 35°					
w	Trigon					
L	Retangular					
A	Paralelogramo 85°					
В	Paralelogramo 82°					
K	Paralelogramo 55°					
R	Redondo					

3. Classe de tolerância									
Símbolo	Tolerância do raio de ponta m (mm)	Tolerância do círculo inscrito ø d (mm)	Inserto triangular com faceta (aresta de corte secundária) Tolerância da espessura s (m)						
A	±0,005	±0,025	±0,025						
F	±0,005	±0,013	±0,025						
С	±0,013	±0,025	±0,025						
н	±0,013	±0,013	±0,025						
E	±0,025	±0,025	±0,025						
G	±0,025	±0,025	±0,13						
J	±0,005	±0,05* ±0,13	±0,025						
K *	±0,013	±0,05* ±0,13	±0,025						
L*	±0,025	±0,05* ±0,13	±0,025						
M*	±0,08* ±0,18	±0,05*±0,13	±0,13						
N*	±0,08* ±0,18	±0,05* ±0,13	±0,025						
U*	±0,13*±0,38	±0,08* ±0,25	±0,13						

A marcação * indica superfície sinterizada, as demais são retificadas.





	4. Fixação e/ou quebra-cavacos										
	Métrico										
Sím- bolo	Furo	Configu- ração do furo	Quebra- cavacos	Figura	Sím bolo	Furo	Configu- ração do furo	Quebra- cavacos	Figura		
w	Com furo	Furo cilíndrico +	Face plana		A	Com furo	Furo cilíndrico	Face plana			
т	Com furo	Chanfro unifacial (40 a 60°)	Unifacial		M	Com furo	Furo cilíndrico	Unifacial			
Q	Com furo	Furo cilíndrico +	Face plana	口	G	Com furo	Furo cilíndrico	Bifacial			
U	Com furo	Chanfro bifacial (40 a 60°)	Bifacial		N	Sem Furo	-	Face plana			
В	Com furo	Furo cilíndrico +	Face plana		R	Sem furo	-	Unifacial			
н	Com furo	chanfro unifacial (70 a 90°)	Unifacial		F	Sem furo	-	Bifacial			
С	Com furo	Furo cilíndrico	Face plana		x	-	-	-	Desenho especial		
J	Com furo	chanfro bifacial (70 a 90°)	Bifacial								

5. Tamanho do inserto					do inse		6. Espessura do inserto		
Símbolo							Diâmetro		1
R			D	<u>C</u>	S	A	do círculo inscrito (mm)		
	02		04	03	03	06	3,97	A espessura é med inserto até o topo	ida do assento do da aresta de corte.
	L3		05	04	04	08	4,76	Símbolo	Espessura (mm)
	03		06	05	05	09	5,56	SI	1,39
06							6,00	01	1,59
	04	11	07	06	06	11	6,35	Т0	1,79
	05		09	08	07	13	7,94	02	2,38
08							8,00	T2	2,78
09	06	16	11	09	09	16	9,525	03	3,18
10							10,00	Т3	3,97
12							12,00	04	4,76
12	08	22	15	12	12	22	12,70	06	6,35
	10		19	16	15	27	15,875	07	7,94
16							16,00	09	9,52
19	13		23	19	19	23	19,05		
20							20,00		
			27	22	22	38	22,225		
25							25,00		
25			31	25	25	44	25,40		
31			38	32	314	55	31,75		





7.	Raio da ponta	8. Preparação da aresta						
Símbolo	Raio da ponta (mm)	Figura	Aresta de corte	Símbolo				
00	Ponta sem raio		Aresta corte vivo	F				
02	0,2		Aresta arredondada	E				
04	0,4		Aresta com chanfro	т				
08	0,8		Aresta com chanfro e arredondamento	S				
12	1,2							
16	1,6							
20	2,0							
24	2,4	Observação: alguns forne preparação de aresta.	cedores omitem o símbo	lo para				
28	2,8	preparação de aresta.						
32	3,2							
00: polegada	Inserto redondo m0: métrico							

9. Direção de corte – opcional								
Figura	Figura Sentido Símbolo							
	Direita	R						
•	Esquerda	L						
← ▲ →	Neutro	N						

10. Quebra-cavacos. Específico de cada fabricante. Exemplos:								
Standard	С	ES						

Adicionalmente, o fabricante introduz dígitos para informar o tipo de cobertura da pastilha.





Sistema de identificação do porta-ferramentas para torneamento (codificação ISO)									
1.	2.	3.	4.	5.	6.	6.	7.	8.	
Р	С	L	N	R	25	25	М	12	

I. Método de fixação	3. Ângulo de usinagem		
D Dupla fixação M Tipo WP P Fixação por alavanca S Fixação por parafuso 2. Formato do inserto C Romboidal 80° D Romboidal 55° R Redondo S Quadrado T Triangular V Romboidal 35°	A 90° Sem offset B 75° D 45° Neutro E 60° F 90° G 90° Com offset J 93° K 75° L 95° N 63° Q 105° S 45° T 60°		
4. Ângulo do inserto	5. Sentido de corte		
C 7° N 0° E 20°	R Direito L Esquerdo N Neutro		
6. Tamanho da haste (mm) (altura e largura)	7. Comprimento ferramenta		
8 8 10 10 12 12 16 16 20 20 25 25 32 32 Fonte: http://www.mitsubishicarbide.com.	D 60 E 70 F 80 H 100 K 125 M 150 P 170 Q 180 R 200		

Fonte: http://www.mitsubishicarbide.com.

Círculo	Formato do inserto									
inscrito(mm)	Quadrado	Triangular	Redondo	Romboidal 80°	Romboidal 55°	Romboidal 35°				
6.00	-	-	06	-	-	-				
6.35	-	П	-	06	07	П				
7.94	-	13	-	-	-	-				
8.00	-	-	08	-	-	-				
9.525	09	16	-	09	Н	16				
10.00	-	-	10	-	-	-				
12.00	-	-	12	-	-	-				
12.70	12	22	-	12	15	-				
15.875	15	27	-	16	-	-				
16.00	-	-	16	-	-	-				
19.05	19	-	-	19	-	-				
20.00	-	-	20	-	-	-				
25.00	-	-	– 5	-	-	-				
25.40	25	-	-	-	-	-				
32.00	-	-	32	-	-	-				











Catálogo e apresentação técnica da empresa Heller, 2009.

Catálogo técnico da empresa Ceratizit, 2009.

Catálogo técnico da empresa Sandvik Coromant, 2008.

"Vale a pena trocar a retificação pelo torneamento duro". SANDVIK CO-ROMANT DO BRASIL. *O Mundo da Usinagem*, vol. 3, 2001. Disponível em: http://www.omundodausinagem.com.br/edicoesAnteriores/edicoes/2001/3/26-28.pdf> Acesso em: 28 jun. 2011.

AGOSTINHO, O. L. *Processos de fabricação e planejamento de processos*. Campinas: Editora Unicamp, 2004.

CNC ENSITEC. Curso de programação. Disponível em: http://www.scribd.com/doc/19750145/19527133ApostilaCNC20073>. Acesso em: 28 jun. 2011.

CUNHA, L. S. Manual prático do mecânico. 8. ed. São Paulo: Hemus, 1982.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2000.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FREIRE, J. M. Torneiro mecânico. São Paulo: LTC, 1983.

MANGE, R. *Programação Comando Numérico Computadorizado*. Campinas: Senai, 2009.

MAREGA, B. et al. *Furação e furadeira*. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2008. Disponível em: http://www.ebah.com.br/furacao-e-furadeira-pdf-a6091.html Acesso em: 28 jun. de 2011.

MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. *Manual de aplicação de ferramentas*. Mitsubishi Tooling Technology, 2007.

PALMA, F. Máquinas e ferramentas. Blumenau: Senai, 2005.

SENAI. Tecnologia para Mecânica. Matão: Senai, 2008.

SENAI. Produção mecânica. Florianópolis: Senai, 2004.

STOETERAU, R. L. *Processos de usinagem*: fabricação por remoção de material. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

_____. Processos de usinagem. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.



MECÂNICA 5

Disponível em: http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-22-U-2007-1-retificacao.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2011.

_____. *Projeto de máquinas-ferramenta*. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

Telecurso 2000. *Mecânica*: processos de fabricação – fresagem, aula 41. Disponível em: http://www.ebah.com.br/41proc3-pdf-pdf-a1184.html>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Telecurso 2000. *Mecânica*: processos de fabricação – retificação, aula 54. Disponível em: http://www.ebah.com.br/54proc3-pdf-pdf-a1201.html. Acesso em: 28 jun. 2011.

SITES

Acessórios para a fresadora: <www.neboluz.com.br>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Acessórios para o torno: <www.platinametal.com>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Cabeçote múltiplo de furar: http://www.mhmequipamentos.com.br>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Ferramentas para geração de dentes de engrenagem: <www.addn.com.br>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Operação de torneamento: http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4851>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Programação de baixo nível: http://pt.wikipedia.org>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Tipos de tornos – do império romano a 1600 e partes do torno no século XIX: http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4857>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Tipos de tornos e fresadoras CNC: http://www.fg.com.br/maquinas.asp>. Acesso em: 28 jun. 2011.

Torno multifuso – detalhe do torno multifuso: http://www.wickman-group.com/i/pdf/6-26_English.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2011.







Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.

