

VICENTE CHIAVERINI

# TECNOLOGIA MECÂNICA

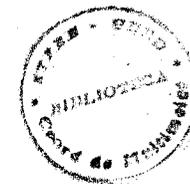
Processos de Fabricação e Tratamento

VOL. II

2ª edição



McGraw-Hill



# TECNOLOGIA MECÂNICA

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO

VOLUME II

2ª edição



EDITORA AFILIADA

VICENTE CHIAVERINI

Professor Titular da Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo

Membro Honorário da Associação Brasileira de Metais

# TECNOLOGIA MECÂNICA

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO

VOLUME II

2ª edição

629.419  
L582t  
v.02  
n.10

MAKRON Books do Brasil Editora Ltda.  
Editora McGraw-Hill Ltda.  
São Paulo  
Rua Tabapuã, 1.105, Itaim-Bibi  
CEP 04533  
(011) 829 8604 e (011) 820-8528

*Rio de Janeiro • Lisboa • Porto • Bogotá • Buenos Aires • Guatemala  
• Madrid • México • New York • Panamá • San Juan • Santiago*

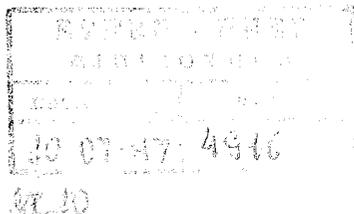
*Auckland • Hamburg • Kuala Lumpur • London • Milan • Montreal  
• New Delhi • Paris • Singapore • Sydney • Tokyo • Toronto*

Copyright ©1977, 1986 da Editora McGraw-Hill, Ltda.

Todos os direitos para a língua portuguesa reservados pela Editora McGraw-Hill, Ltda.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, guardada pelo sistema "retrieval" ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, seja este eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação, ou outros, sem prévia autorização, por escrito, da Editora.

*Editor:* Alberto da Silveira Nogueira Jr.  
*Coordenadora de Revisão:* Daisy Pereira Daniel  
*Supervisor de Produção:* Edson Sant'Anna  
*Capa:* Lay out: Cyro Giordano  
*Arte final:* Jaime Marques



ESCOLA TÉCNICA FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.

Departamento de Administração  
Divisão de Arquivo e Patrimônio

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO

FILM Nº 69239

Data do Lançamento \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
Comprovante de Lançamento Nº \_\_\_\_\_

*A minha esposa  
Aos meus filhos*

**Dados de Catalogação na Publicação (CIP) Internacional  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

C458t	Chiaverini, Vicente, 1914—
v. 1-3	Tecnologia mecânica / Vicente Chiaverini. —
2. ed.	2. ed. — São Paulo : McGraw-Hill, 1986.
	Bibliografia.
	Conteúdo: v. 1. Estrutura e propriedades das ligas metálicas. — v. 2. Processos de fabricação e tratamento. — v.3. Materiais de construção mecânica.
	1. Engenharia mecânica 2. Mecânica aplicada I. Título.
85 2045	CDD-621 -620.1

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Engenharia mecânica 621
2. Mecânica aplicada 620.1

## SUMÁRIO



PREFÁCIO .....	XIII
I — FUNDIÇÃO .....	1
1 — Introdução .....	1
2 — Fenômenos que ocorrem durante a solidificação .....	1
2.1 — Cristalização .....	2
2.2 — Contração de volume .....	3
2.3 — Concentração de impurezas .....	7
2.4 — Desprendimento de gases .....	8
3 — Processos de fundição .....	8
3.1 — Desenho das peças a serem fundidas .....	9
3.1.1 — Proporcionar adequadamente as secções das peças .....	10
3.1.2 — Considerar uma espessura mínima de paredes .....	11
3.1.3 — Evitar fissuras de contração .....	12
3.1.4 — Prever conicidade para melhor confeção do molde .....	12
3.2 — Projeto do modelo .....	13
3.2.1 — Considerar a contração do metal ao solidificar .....	14
3.2.2 — Eliminar os rebaixos .....	14
3.2.3 — Deixar sobremetal .....	14
3.2.4 — Verificar a divisão do modelo .....	14
3.2.5 — Considerar volume de produção .....	15
3.2.6 — Estudar adequadamente a localiza- ção dos machos .....	

3.2.7	Prever a colocação dos canais de vazamento	16	3.1	Prensagem	81
3.3	Confeção do molde ou moldagem	16	3.2	Forjamento livre	83
3.3.1	Moldagem em areia	17	3.3	Forjamento em matriz	87
3.3.2	Moldagem em areia seca ou molde estufado	24	3.3.1	Matrizes para forjamento em matriz	90
3.3.3	Moldagem em areia-cimento	24	3.3.1.1	Sobremetal	90
3.3.4	Processo CO <sub>2</sub>	25	3.3.1.2	Ângulos de saída ou conicidade	91
3.3.5	Processo de moldagem plena	25	3.3.1.3	Concordância dos cantos	91
3.4	Moldagem em molde metálico	25	3.3.1.4	Tolerâncias	91
3.4.1	Moldes permanentes	25	3.3.2	Projeto das matrizes	93
3.4.2	Fundição sob pressão	28	3.3.2.1	Contração do metal	93
3.5	Outros processos	32	3.3.2.2	Sistema de referência entre as duas meias matrizes	94
3.5.1	Fundição por centrifugação	32	3.3.2.3	Canais de rebarbas	95
3.5.2	Fundição de precisão	33	3.3.3	Material das matrizes	95
3.5.3	Processos de molde cerâmico	39	3.4	Recalcagem	96
3.5.4	Fundição contínua	40	3.4.1	Pressão de recalcagem	99
4	Fusão do metal	42	3.5	Outros processos de forjamento	100
4.1	Fusão do ferro fundido	45	3.5.1	Forjamento rotativo	100
4.2	Fusão do aço	45	3.5.2	Forjamento em cilindros	102
4.3	Fusão de não-ferrosos	49			
4.4	Outros tipos de fornos	50			
5	Desmoldagem, limpeza e rebarbação	54			
6	Controle de qualidade de peças fundidas	53			
6.1	Inspeção visual	53			
6.2	Inspeção dimensional	53			
6.3	Inspeção metalúrgica	53			
7	Conclusões	53			
II	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA – LAMINAÇÃO	55	IV	ESTAMPAGEM	104
1	Introdução	55	1	Introdução	104
2	Laminação	58	2	Corte de chapas	104
2.1	Forças na laminação	59	2.1	Matriz para corte	106
2.2	Tipos de laminadores	62	2.2	Esforço necessário para o corte	107
2.3	Órgãos mecânicos de um laminador	66	3	Dobramento e encurvamento	108
2.4	Operações de laminação	67	3.1	Determinação da linha neutra	109
2.4.1	Laminação de produtos planos	69	3.2	Esforço necessário para o dobramento	111
			4	Encurvamento	113
			5	Estampagem profunda	114
			5.1	Matriz para estampagem profunda	115
			5.2	Desenvolvimento de um elemento para estampagem profunda	116
			5.3	Operações de reestampagem	118
			5.4	Prensas de estampagem	119
III	FORJAMENTO E PROCESSOS CORRELATOS	73			
1	Introdução	73	V	OUTROS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	120
2	Forças atuantes na deformação	74	1	Cunhagem	120
3	Processos de forjamento	80	2	Repuxamento	121

3	-	Conformação com três cilindros	122
4	-	Conformação com coxim de borracha	123
5	-	Extrusão	124
	5.1	- Extrusão a frio	126
	5.2	- Força de extrusão	129
6	-	Mandrilagem	129
7	-	Fabricação de tubos soldados	130
8	-	Estiramento	132
9	-	Conformação por explosão	135
VI	-	METALURGIA DO PÓ	136
1	-	Introdução	136
2	-	Matérias-primas	139
	2.1	- Métodos de fabricação de pós metálicos	140
	2.1.1	- Moagem	140
	2.1.2	- Atomização	140
	2.1.3	- Condensação	140
	2.1.4	- Decomposição térmica	141
	2.1.5	- Redução	141
	2.1.6	- Eletrólise	141
3	-	Mistura dos pós	141
4	-	Compactação dos pós	142
	4.1	- Matrizes para compactação	144
5	-	Sinterização	145
	5.1	- Sinterização em presença de fase líquida e infiltração metálica	150
6	-	Dupla compactação	151
7	-	Compactação a quente	153
8	-	Forjamento-sinterização	153
9	-	Tratamentos posteriores à sinterização	157
	9.1	- Recompressão ou calibragem	157
	9.2	- Tratamentos térmicos e termoquímicos	157
	9.3	- Tratamentos superficiais	157
10	-	Considerações sobre o projeto de peças sinterizadas	157
11	-	Conclusões	159
VII	-	SOLDAGEM	161
1	-	Introdução	161
2	-	Tipos de juntas soldadas	162
3	-	Metalurgia da solda	164
4	-	Processos de soldagem	166
	4.1	- Soldagem a arco	166
	4.1.1	- Tipos básicos de soldagem a arco	168

	4.1.2	- Eletrodos para soldagem a arco	172
	4.1.3	- Equipamento para soldagem a arco	172
4.2	-	Soldagem a gás	173
4.3	-	Soldagem a alumínio-térmica	175
4.4	-	Soldagem por resistência	176
4.5	-	Soldagem por "laser"	179
4.6	-	Soldagem por feixe eletrônico	183
4.7	-	Soldagem por ultra-som	185
4.8	-	Soldagem por fricção	185
5	-	Brasagem	186
	5.1	- Métodos de brasagem	188
	5.2	- Soldabrasagem	188
	5.3	- Soldagem fraca	189
6	-	Propriedades mecânicas e ensaios das soldas	189
VIII	-	USINAGEM	193
1	-	Introdução	193
2	-	Variáveis atuantes nas operações de usinagem	195
	2.1	- Condições usuais de corte	197
3	-	Torneamento, torno mecânico	199
	3.1	- Outros tipos de tornos	201
	3.2	- Ferramentas de torno	205
4	-	Furação	205
	4.1	- Algumas brocas especiais	210
5	-	Aplainamento	212
	5.1	- Plainas limadoras	212
	5.2	- Plainas de mesa	214
6	-	Fresamento	215
	6.1	- Fresas	217
7	-	Brochamento	219
8	-	Serramento	220
9	-	Outras operações de usinagem	221
10	-	Usinagem por abrasão	221
	10.1	- Retificação	221
	10.2	- Afiamento	225
	10.3	- Rebolos	225
11	-	Operações de acabamento	227
12	-	Métodos não tradicionais de usinagem	227
	12.1	- Usinagem por descarga elétrica	228
	12.2	- Usinagem eletroquímica	230
	12.3	- Usinagem com feixe eletrônico	233
	12.4	- Usinagem com feixe laser	233

13	— Controle numérico em máquinas operatrizes	233	6	— Revestimentos não-metálicos inorgânicos	277
14	— Fluidos de corte	238	6.1	— Anodização	277
IX	— TRATAMENTOS TÉRMICOS	240	6.2	— Cromatização	278
1	— Introdução	240	6.3	— Fosfatização	278
2	— Fatores de influência nos tratamentos térmicos	241	6.4	— Esmaltação à porcelana	279
2.1	— Aquecimento	241	7	— Revestimentos não-metálicos orgânicos: tintas	280
2.2	— Temperatura de aquecimento	242	8	— Proteção catódica	283
2.3	— Tempo de permanência à temperatura	242	XI	— CONTROLE DE QUALIDADE	283
2.4	— Ambiente de aquecimento	242	1	— Introdução	283
2.5	— Resfriamento	243	2	— Determinação das medidas e das tolerâncias dimensionais	284
3	— Operações de tratamento térmico	244	3	— Qualidade da superfície	286
3.1	— Recozimento	244	4	— Ensaio não-destrutivo	288
3.2	— Normalização	245	4.1	— Métodos visuais	289
3.3	— Têmpera	245	4.2	— Métodos radiográficos	289
3.4	— Revenido	245	4.3	— Métodos eletromagnéticos	291
3.5	— Tratamentos isotérmicos	246	4.4	— Métodos elétricos	293
3.6	— Endurecimento por precipitação	246	4.5	— Métodos sônicos	294
4	— Tratamentos termoquímicos	247	4.6	— Métodos mecânicos	296
5	— Prática dos tratamentos térmicos	247	5	— Conclusões	296
X	— TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	255	Questões e Exercícios	297	
1	— Corrosão dos metais	255	Bibliografia	305	
1.1	— Tipos de células galvânicas	259	Índice Analítico	310	
2	— Tipos de corrosão	261			
2.1	— Corrosão uniforme ou ataque generalizado	261			
2.2	— Corrosão galvânica	262			
2.3	— Corrosão por depósito	263			
2.4	— Corrosão localizada	264			
2.5	— Corrosão intergranular	264			
2.6	— Corrosão seletiva	265			
2.7	— Corrosão por erosão	265			
2.8	— Corrosão sob tensão	266			
2.9	— Corrosão por ação do hidrogênio	267			
3	— Prevenção contra a corrosão	268			
3.1	— Alteração do ambiente	268			
4	— Revestimentos superficiais	270			
5	— Revestimentos metálicos	271			
5.1	— Galvanização	271			
5.2	— Imersão a quente	271			
5.3	— Eletrodeposição	273			
5.4	— Metalização	276			
5.5	— Difusão	276			

## PREFÁCIO



Neste volume II da obra TECNOLOGIA MECÂNICA serão abordados os processos de fabricação e tratamentos térmicos e superficiais dos metais e ligas metálicas.

Os dados serão apresentados de uma maneira geral, dada a extensão de cada um dos temas, porém alguns destes serão abordados com certa profundidade, permitindo ao leitor o seu conhecimento mais pormenorizado.

A matéria relacionada com os tratamentos térmicos será mais desenvolvida no volume III.

Deve-se sempre ter em mente que a estrutura e as propriedades dos metais estão intimamente ligadas com o processo empregado na fabricação de peças e componentes mecânicos.

Desse modo, é conveniente que o engenheiro em geral e o engenheiro mecânico em particular estejam familiarizados, ainda que de modo superficial, com as várias técnicas de fabricação.

Acrescente-se que, em muitos casos, o engenheiro mecânico é o próprio responsável pela aplicação de uma determinada técnica de produção, o que constitui mais um motivo para ele estar ciente das conseqüências que podem resultar se a técnica empregada não for a mais indicada.

Do mesmo modo que no caso do volume I, este volume está dirigido principalmente aos estudantes de engenharia, servindo contudo de fonte de referência para os profissionais da indústria, para o que extensa bibliografia está indicada.

## CAPÍTULO I



# FUNDIÇÃO

**1 Introdução** A transformação dos metais e ligas metálicas em peças de uso industrial pode ser realizada por intermédio de inúmeros processos, a maioria dos quais tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido, que é derramado no interior de uma fôrma, cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir. Essa fôrma é chamada “molde”.

A forma da cavidade do molde pode ser tal que corresponda praticamente à forma definitiva, ou quase definitiva, da peça projetada ou pode apresentar-se com contornos regulares — cilíndrico ou prismático — de modo que a peça resultante possa ser posteriormente submetida a um trabalho de conformação mecânica, no estado sólido, com o que são obtidas novas formas das peças.

A “cavidade” mencionada do molde nada mais é, portanto, que um negativo da peça que se deseja fabricar.

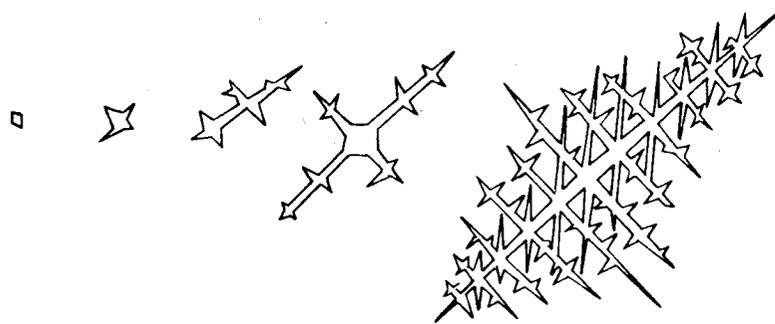
Antes de serem descritos os vários processos correspondentes a essa técnica — ou seja, à *fundição* — serão estudados os fenômenos que podem ocorrer durante a solidificação do metal líquido no interior dos moldes. O estudo desses fenômenos é importante, pois eles podem ocasionar o aparecimento de heterogeneidades, as quais, se não forem adequadamente controladas, podem prejudicar a qualidade das peças fundidas e provocar a sua rejeição.

**2 Fenômenos que ocorrem durante a solidificação** Esses fenômenos são: cristalização, contração de volume, concentração de impurezas e desprendimento de gases.

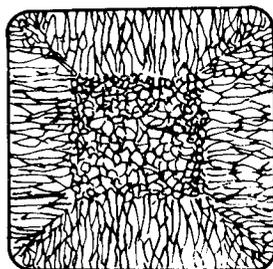
2.1 **Cristalização** Essa particularidade dos metais, durante sua solidificação, já foi estudada, sob o ponto de vista geral. Consiste, como se viu, no aparecimento das primeiras células cristalinas unitárias, que servem como “núcleos” para o posterior desenvolvimento ou “crescimento” dos cristais, dando, finalmente, origem aos grãos definitivos e à “estrutura granular” típica dos metais.

Esse crescimento dos cristais não se dá, na realidade, de maneira uniforme, ou seja, a velocidade de crescimento não é a mesma em todas as direções, variando de acordo com os diferentes eixos cristalográficos; além disso, no interior dos moldes, o crescimento é limitado pelas paredes destes.

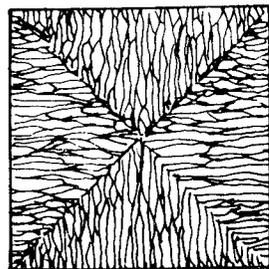
Como resultado, os núcleos metálicos e os grãos cristalinos originados adquirem os aspectos representados na Figura 1.



(a)



(b)



(c)

Figura 1 (a) Dendrita originada na solidificação. (b) Aspectos típicos da seção de um “lingote” mostrando algumas formas que os órgãos adquirem durante a solidificação no interior de uma “lingoteira”. (c) Efeito dos cantos na cristalização.

A Figura 1(a) mostra o desenvolvimento e a expansão de cada núcleo de cristalização, originando um tipo de cristal que poderia ser assimilado a uma árvore com seus ramos; a esse tipo de cristal dá-se o nome de *dendrita*.

As dendritas formam-se em quantidades cada vez maiores até se encontrarem; o seu crescimento é, então, impedido pelo encontro das dendritas vizinhas, originando-se os *grãos* e os *contornos de grãos*, que delimitam cada grão cristalino, formando a massa sólida.

A Figura 1(b) mostra o caso particular da solidificação de um metal no interior de um molde metálico, de forma prismática, chamado *lingoteira*, o qual vai originar uma peça fundida chamada *lingote*.

Nesse caso, a solidificação tem início nas paredes com as quais o metal líquido entra imediatamente em contato; os cristais formados e em crescimento sofrem a interferência das paredes do molde e dos cristais vizinhos, de modo que eles tendem a crescer mais rapidamente na direção perpendicular às paredes do molde. Origina-se, então, uma estrutura colunar típica, até uma determinada profundidade, como a Figura 1(b) mostra, e que pode, nos cantos, produzir efeitos indesejáveis — Figura 1(c) — devido a grupos colunares de cristais, crescendo de paredes contíguas, se encontrarem segundo planos diagonais.

Os efeitos indesejáveis resultam do fato de essas diagonais constituírem planos de maior fragilidade de modo que, durante a operação de conformação mecânica a que essas peças são submetidas posteriormente — como laminação — podem surgir fissuras que inutilizam o material.

Esse inconveniente é evitado arredondando-se os cantos.

2.2 **Contração de volume** Os metais, ao solidificarem, sofrem uma contração. Na realidade, do estado líquido ao sólido, três contrações são verificadas<sup>(1)</sup>:

- *contração líquida* — correspondente ao abaixamento da temperatura até o início da solidificação;
- *contração de solidificação* — correspondente à variação de volume que ocorre durante a mudança do estado líquido para o sólido;
- *contração sólida* — correspondente à variação de volume que ocorre já no estado sólido, desde a temperatura de fim de solidificação até a temperatura ambiente.

A contração é expressa em porcentagem de volume. No caso da *contração sólida*, entretanto, a mesma é expressa linearmente, pois desse modo é mais fácil projetar-se os *modelos*.

A contração sólida varia de acordo com a liga considerada. No caso dos aços fundidos, por exemplo, a contração linear, devida à variação de volume no estado sólido, varia de 2,18 a 2,47%, o valor menor correspondendo ao aço de mais alto carbono (0,90%)<sup>(1)</sup>.

No caso dos ferros fundidos — uma das mais importantes ligas para fundição de peças — a contração sólida linear varia de 1 a 1,5%, o valor de 1% correspondendo ao ferro fundido cinzento comum e o valor 1,5% (mais precisamente de 1,3 a 1,5%) ao ferro nodular.

Para os outros metais e ligas, a contração linear é muito variada, podendo atingir valores de 8 a 9% para níquel e ligas cobre-níquel.

A contração dá origem a uma heterogeneidade conhecida por *vazio* ou *chupagem*, ilustrada na Figura 2.

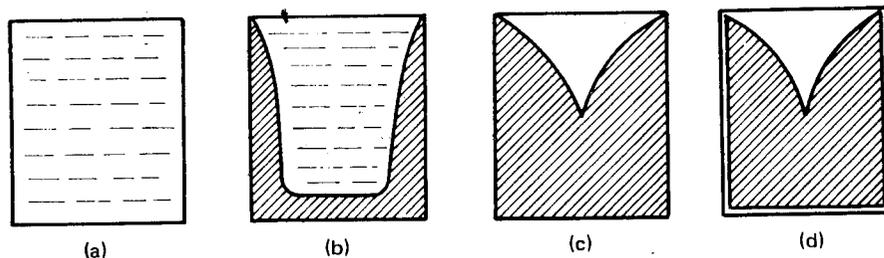


Figura 2 Representação esquemática do fenômeno de contração, com o vazio ou “chupagem” resultante.

Inicialmente, tem-se (a) o metal inteiramente no estado líquido; (b) a solidificação tem início na periferia, onde a temperatura é mais baixa e caminha em direção ao centro; (c) fim da solidificação e (d) contração sólida.

A diferença entre os volumes no estado líquido e no estado sólido final dá como consequência o *vazio* ou *chupagem*, indicados nas partes (c) e (d) da figura. A parte (d) dá a entender também que a contração sólida ocasiona uma diminuição geral das dimensões da peça solidificada.

Os vazios citados podem eventualmente ficar localizados na parte interna das peças, próximos da superfície; porém, invisíveis externamente.

Além dessa consequência — vazio ou *chupagem* — a contração verificada na solidificação pode ocasionar:

- aparecimento de trincas a quente (Figura 3)
- aparecimento de tensões residuais.

A Figura 3<sup>(2)</sup> mostra a heterogeneidade “trincas a quente” e a maneira de corrigi-la.

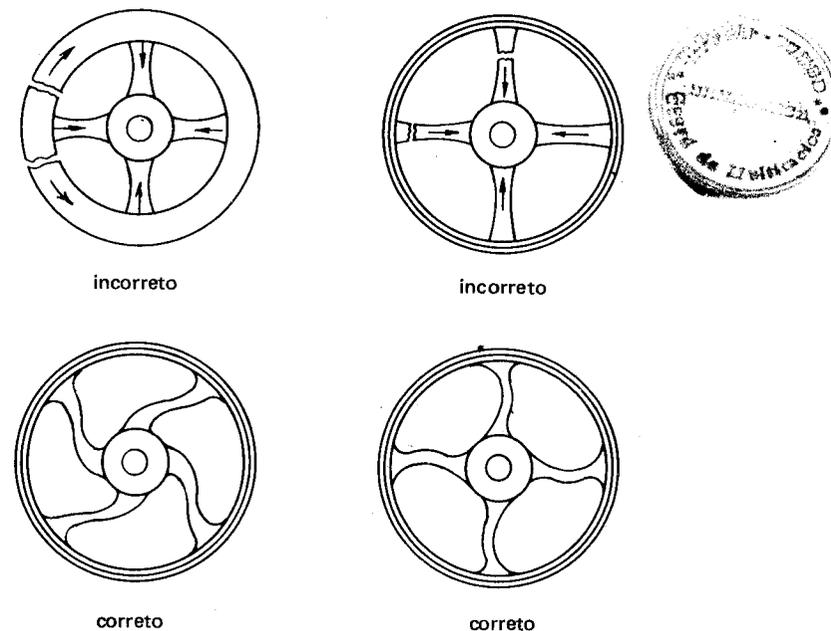


Figura 3 Defeitos de contração em volantes fundidos e modo de corrigi-los.

As tensões residuais podem ser controladas por um adequado projeto da peça, como se verá, e podem ser eliminadas pelo tratamento térmico de “alívio de tensões”.

Os vazios ou *chupagens* que constituem a consequência direta da contração podem também ser controlados ou eliminados, mediante recursos adequados, seja no caso de lingoteiras, seja no caso de moldes para peças fundidas (Figura 4<sup>(1)</sup>).

No caso da fundição de um lingote, o artifício adotado para controlar o vazio é colocar sobre o topo da lingoteira — que é feita de material metálico — uma peça postiça de material refratário, denominada “cabeça quente” ou “massalote”; essa peça, por ser de material refratário, retém o calor por um tempo mais longo e corresponderá à secção que solidifica por último; nela, portanto, vai se concentrar o vazio. Resulta assim um lingote sã, pela eliminação de sua cabeça superior.

No caso de peças fundidas, utiliza-se um “alimentador”. No exemplo apresentado na Figura 4, o molde foi projetado de tal maneira que a entrada do metal líquido, através de canais, é feita na secção mais grossa que alimenta as menos espessas; ao mesmo tempo, o “alimentador” ficará convenientemente suprido de excesso de metal líquido, nele se concentrando o vazio.

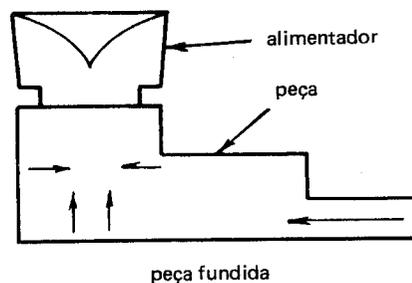
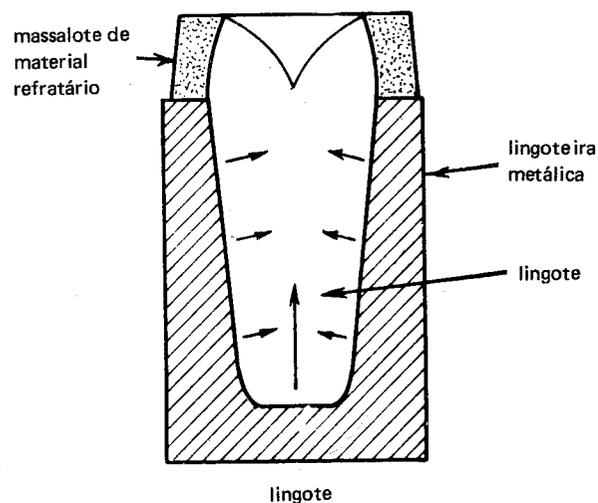


Figura 4 *Dispositivos utilizados para controle de vazios em lingotes e peças fundidas.*

**2.3 Concentração de impurezas** Algumas ligas metálicas contêm impurezas normais, que se comportam de modo diferente, conforme a liga esteja no estado líquido ou sólido. O caso mais geral é o das ligas ferro-carbono que contêm, como impurezas normais, o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o próprio carbono.

Quando essas ligas estão no estado líquido, as impurezas estão totalmente dissolvidas no líquido, formando um todo homogêneo. Ao solidificar, entretanto, algumas das impurezas são menos solúveis no estado sólido: P e S, por exemplo, nas ligas mencionadas. Assim sendo, à medida que a liga solidifica, esses elementos vão acompanhando o metal líquido remanescente, indo acumular-se, pois, na última parte sólida formada.

Nessas regiões, a concentração de impurezas constitui o que se chama *segregação*<sup>(3)</sup>.

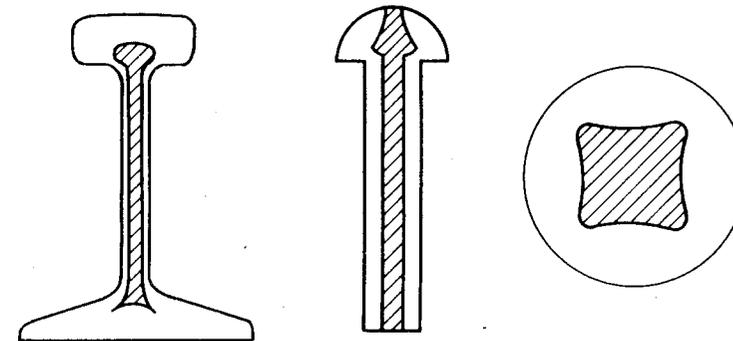


Figura 5 *Segregação em peças laminadas e forjadas.*

A Figura 5 representa esquematicamente como a segregação pode se dispor em peças laminadas e forjadas. O inconveniente dessa segregação é que o material acaba apresentando composição química não uniforme, conforme a secção considerada, e conseqüentes propriedades mecânicas diferentes.

Como as zonas segregadas se localizam no interior das peças, onde as tensões são mais baixas, as suas conseqüências não são muito perniciosas, devendo-se de qualquer modo, evitar uma grande concentração de impurezas, quer pelo controle mais rigoroso da composição química das ligas, quer pelo controle da própria velocidade de resfriamento.

**2.4 Desprendimento de gases** Esse fenômeno ocorre, como no caso anterior, principalmente nas ligas ferro-carbono. O oxigênio dissolvido no ferro, por exemplo, tende a combinar-se com o carbono dessas ligas, formando os gases CO e CO<sub>2</sub> que escapam facilmente à atmosfera, enquanto a liga estiver no estado líquido.

À medida, entretanto, que a viscosidade da massa líquida diminui, devido à queda de temperatura, fica mais difícil a fuga desses gases, os quais acabam ficando retidos nas proximidades da superfície das peças ou lingotes, na forma de *bolhas*.

Em aços de baixo carbono, na forma de lingotes a serem forjados ou laminados, as bolhas não são prejudiciais, pois elas, às temperaturas de conformação mecânica, principalmente para a fabricação de chapas, têm suas paredes soldadas. A rigor, essas bolhas podem ser até mesmo desejáveis.

As bolhas devem ser evitadas, contudo, em aços de alto carbono; isso pode ser feito adicionando-se ao metal líquido substâncias chamadas “desoxidantes”, tais como alguns tipos de ferro-ligas (ferro-silício e ferro-manganês) ou alumínio.

De fato, o oxigênio reage de preferência com os elementos Si, Mn e Al, formando óxidos sólidos — SiO<sub>2</sub>, MnO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — impedindo, assim, que o oxigênio reaja com o carbono formando os gases CO e CO<sub>2</sub>, responsáveis pela produção das bolhas.

Outros gases que podem se libertar na solidificação dos aços são o hidrogênio e o nitrogênio, que comumente também se encontram dissolvidos no metal líquido<sup>(1)\*</sup>.

**3 Processos de fundição** As peças obtidas por fundição são utilizadas em grande quantidade em equipamento de transporte, construção, comunicação, geração de energia elétrica, mineração, agricultura, máquinas operatrizes; enfim, na indústria em geral, devido às vantagens que os processos de fundição oferecem.

Os outros processos de fabricação de peças metálicas, tais como forjamento, estampagem, soldagem, usinagem etc., permitem atingir, igualmente, grande variedade de aplicações, de modo que ao engenheiro são oferecidas várias opções de fabricação.

\* O livro *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*, que consta da Bibliografia, contém um grande acervo de macrografias representativas de exemplos das heterogeneidades verificadas em peças de aço, como resultado dos fenômenos que ocorrem durante a sua solidificação.

Na maioria dos casos, a fundição é o processo inicial, porque, além de permitir a obtenção de peças com formas praticamente definitivas, possibilita a fabricação dos chamados lingotes, os quais serão posteriormente submetidos a processos de conformação mecânica e transformados em formas definitivas.

A fundição, assim, permite a fabricação de peças praticamente de qualquer forma, com pequenas limitações em dimensões, forma e complexidade. Possibilita, finalmente, a consecução de propriedades mecânicas que suportam as mais variadas condições de serviço.

A fundição abrange uma série de processos, cada um dos quais apresentando características próprios, a saber:

- fundição por gravidade
- fundição sob pressão
- fundição por centrifugação
- fundição de precisão
- fundição por outros métodos



Geralmente, qualquer que seja o processo adotado, devem ser consideradas as seguintes etapas:

- desenho da peça
- projeto do modelo
- confecção do modelo (modelagem)
- confecção do molde (moldagem)
- fusão do metal
- vazamento no molde
- limpeza e rebarbação
- controle de qualidade

A etapa que distingue os vários processos de fundição entre si é a “moldagem”, ou seja, a confecção do “molde”, ou seja, do “negativo da peça” a produzir.

Antes de abordar cada processo separadamente, algumas considerações serão feitas a respeito do desenho das peças e do projeto do modelo.

**3.1 Desenho das peças a serem fundidas** Ao projetar-se uma peça para ser fundida, devem ser levados em conta, em primeiro lugar, os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal líquido no interior do molde, de modo a evitar que os defeitos originados a partir desses fenômenos apareçam nas peças solidificadas.

Assim, em princípio, os fatores a considerar são:

- estrutura dendrítica
- tensões de resfriamento
- espessura das paredes

Algumas das recomendações a serem feitas são as seguintes:

3.1.1 Proporcionar adequadamente as secções das peças, ou seja, projetar a peça de modo que haja uma variação gradual das diversas secções que a compõem, evitando-se cantos vivos e mudanças bruscas (Figura 6)<sup>(4)</sup>.

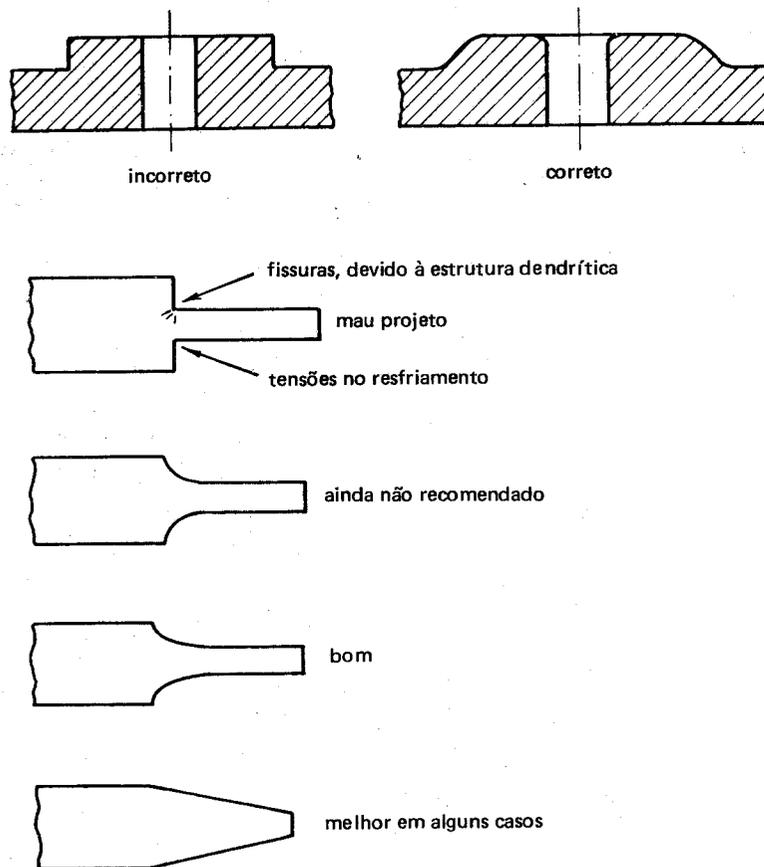


Figura 6 Concordância de secções em peças fundidas.

3.1.2 Considerar uma espessura mínima de paredes, pois paredes muito finas não se enchem bem de metal líquido; além disso, em certas ligas, como ferro fundido, o resfriamento mais rápido proporcionado por paredes finas pode resultar em pontos mais duros, devido à influência que a velocidade de resfriamento exerce sobre a estrutura dessas ligas. A Tabela 1<sup>(4)</sup> apresenta algumas recomendações a respeito das secções mínimas das peças fundidas.

TABELA 1

SECÇÕES MÍNIMAS RECOMENDADAS EM PEÇAS FUNDIDAS

Liga	Secção Mínima, em mm			
	Fundição em areia	Fundição em molde metálico	Fundição sob pressão	
			Grandes áreas	Pequenas áreas
De alumínio	3,175 a 4,76	3,175 em áreas pequenas	1,905	1,143
De cobre	2,38	3,175 em áreas pequenas	2,54	1,524
Ferros fundidos cinzentos	3,175 a 6,35	4,76 em áreas pequenas	—	—
De chumbo	—	—	1,905	1,016
De magnésio	4,00	4,00 a 4,176	2,032	1,27
Ferro maleável	3,175	—	—	—
Aço	4,76	—	—	—
De estanho	—	—	1,524	0,762
Ferro fundido branco	3,175	—	—	—
De zinco	—	—	1,143	0,38

A Tabela 2<sup>(4)</sup> serve como guia para as dimensões mínimas de orifícios. Então, às vezes, devem ser preferivelmente perfurados depois da peça pronta, e sua localização deve ser muito precisa em relação a outras secções das peças.

TABELA 2

## SECÇÕES MÍNIMAS DE ORIFÍCIOS EM PEÇAS FUNDIDAS

Processo de fundição	Diâmetro, mm
Em areia	$D = 1/2 t$ onde $D$ = diâmetro do macho $t$ = espessura da secção em mm. $D$ não deve, geralmente, ser menor que 6,35 mm
Em molde metálico	$D = 1/2 t$ , geralmente maior que 6,35 mm
Sob pressão:	
ligas à base de Cu	4,76
ligas à base de Al	2,38
ligas à base de Zn	0,79
ligas à base de Mg	2,38

**3.1.3 Evitar fissuras de contração** A Figura 3, já apresentada, mostra como se pode fortalecer uma peça, de modo a evitar as fissuras devido à contração do metal durante a solidificação.

**3.1.4 Prever conicidade para melhor confecção do molde** A Figura 7 mostra que a confecção do molde torna-se dificultada se não houver conicidade suficiente no modelo. O chamado "ângulo de saída" recomendado é de 3 graus.

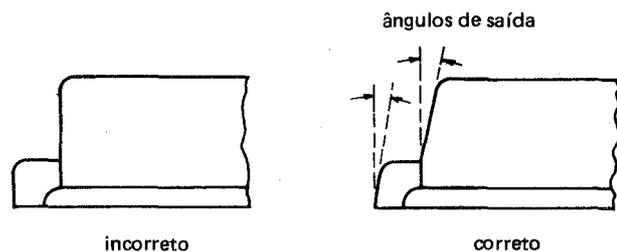


Figura 7 Conicidade recomendada no projeto do modelo e confecção do molde.

**3.2 Projeto do modelo** O modelo é feito, geralmente, de madeira; a espécie mais comumente utilizada no Brasil é o cedro. Outras espécies incluem imbuia, peroba, pinho e pau-marfim. É comum, igualmente, o emprego de madeira compensada para reforçar os modelos ou para a confecção do elemento principal do modelo.

Para produção seriada, em que são utilizadas máquinas de moldar, o material mais comum para confecção dos modelos é o alumínio, devido a sua leveza e usinabilidade.

Os modelos são utilizados em uma única peça, sobretudo quando se trata de moldar e fundir peças volumosas, ou são montados em placas, quando a produção é seriada e as peças de menores dimensões. Os modelos em placa facilitam a utilização de máquinas de moldar.

As principais recomendações no projeto e confecção dos modelos são as seguintes:

TABELA 3

## MARGENS DIMENSIONAIS RECOMENDADAS NOS MODELOS PARA PREVER A CONTRAÇÃO DO METAL

Ligas fundidas	Dimensão do modelo cm	Contração aproximada mm/cm
Ferro fundido cinzento	Até 60	0,1
	De 63,5 a 120	0,08
	Acima de 120	0,07
Aço fundido	Até 60	0,2
	De 63,5 a 183	0,15
	Acima de 183	0,13
Ferro maleável	—	0,01 a 0,10, dependendo da espessura da secção
Alumínio	Até 120	0,13
	De 124 a 183	0,12
	Acima de 183	0,10
Magnésio	Até 48	0,28
	Acima de 48	0,13
Latão	—	0,15
Bronze	—	0,1 a 0,2

**3.2.1 Considerar a contração do metal ao solidificar** Em outras palavras, o modelo deve ser maior. A margem dimensional a ser considerada depende do metal ou liga a ser fundida. A Tabela 3<sup>(4)</sup> apresenta as recomendações gerais nesse sentido.

**3.2.2 Eliminar os rebaixos**, como a Figura 8 mostra, de modo a facilitar a moldagem.

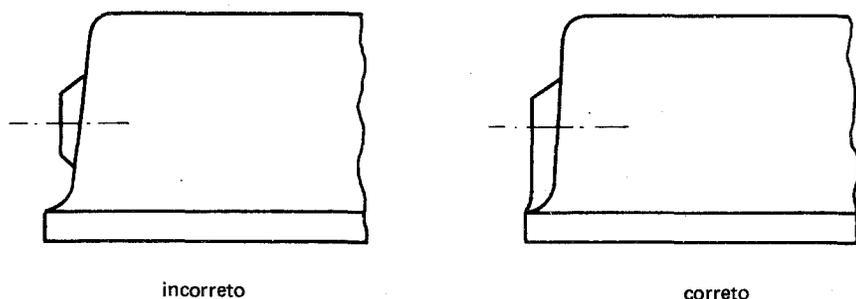


Figura 8 Recortes que dificultam a moldagem.

**3.2.3 Deixar sobremetal**, para usinagem posterior. A Tabela 4<sup>(4)</sup> apresenta as recomendações de margens de usinagem para diversas ligas, em função das dimensões das peças.

**3.2.4 Verificar a divisão do modelo** As linhas divisórias do modelo devem ser feitas no mesmo nível, tanto quanto possível. A linha divisória representa a linha que divide as partes que formam a cavidade superior e a cavidade inferior do molde. A Figura 9 mostra que se deve procurar uma linha divisória reta, em nível, ou seja, recomenda-se que um único plano divida o modelo em seções inferior e superior.

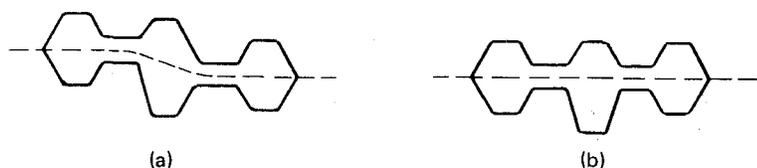


Figura 9 A linha divisória em (a) não é reta e a peça torna-se mais difícil de fundir do que se fosse em nível (b).

TABELA 4

MARGENS DIMENSIONAIS RECOMENDADAS NOS MODELOS PARA PREVER A USINAGEM DE ACABAMENTO

Liga	Dimensões do modelo cm	Margens, mm	
		Orifício	Superfície
Ferro fundido	Até 15,2	3,175	2,38
	De 15,2 a 30,5	3,175	3,175
	De 30,5 a 50,8	4,76	4,0
	De 50,8 a 91,4	6,35	4,76
	De 91,4 a 152,4	7,94	4,76
Aço fundido	Até 15,2	3,175	3,175
	De 15,2 a 30,5	6,35	4,76
	De 30,5 a 50,8	6,35	6,35
	De 50,8 a 91,4	7,14	6,35
	De 91,4 a 152,4	7,94	6,35
Não-ferrosos	Até 7,6	1,59	1,59
	De 7,6 a 20,3	2,38	2,38
	De 20,3 a 30,5	2,38	3,175
	De 30,5 a 50,8	3,175	3,175
	De 50,8 a 91,4	3,175	4,0
De 91,4 a 152,4	4,0	4,76	

**3.2.5 Considerar volume de produção** Já foi mencionado que do volume de produção depende a escolha do material do modelo – madeira ou metal – e de sua montagem em placa ou não.

**3.2.6 Estudar adequadamente a localização dos machos** A localização dos machos é função do tipo e forma da peça que vai ser produzida. O macho vai corresponder às cavidades que são necessárias nas peças fundidas, principalmente orifícios. Seu papel no molde é, portanto, ao contrário do modelo em si, formar uma seção cheia onde o metal não penetra, de modo que, uma vez fundida, a peça apresente um vazio naquele ponto. Assim sendo, o modelo deve prever partes salientes que permitam a colocação dos machos no molde. A Figura 10 mostra um exemplo simples.

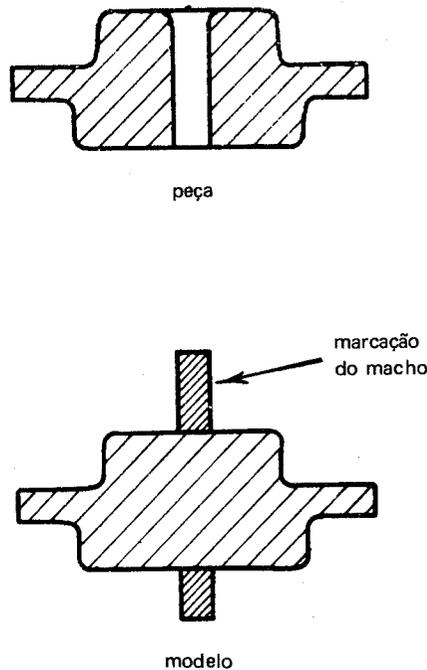


Figura 10 Modelo com marcação do macho.

**3.2.7 Prever a colocação dos canais de vazamento** A Figura 11 mostra a disposição dos canais mencionados e a nomenclatura normalmente usada.

**3.3 Confeção do molde ou moldagem** O *molde* como foi dito é o recipiente que contém a cavidade ou cavidades, com a forma da peça a ser fundida e no interior das quais será vazado o metal líquido.

A fase *moldagem* permite distinguir os vários processos de fundição, os quais são classificados da seguinte maneira:

— moldagem em molde de areia ou temporário, por gravidade:

- areia verde
- areia seca
- areia-cimento
- areia de macho

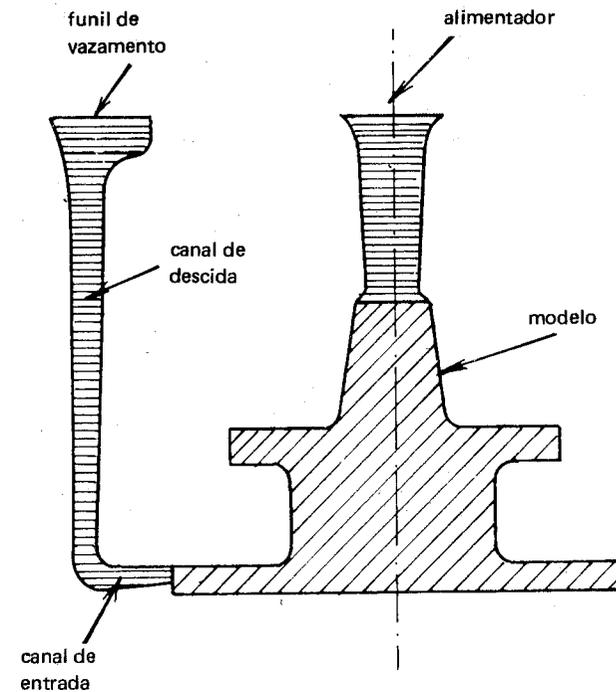


Figura 11 Modelo e respectivos canais

— moldagem em molde metálico ou permanente:

- por gravidade
- sob pressão
- moldagem pelo processo  $CO_2$ ;
- fundição por centrifugação;
- fundição de precisão:
  - em casca
  - de cera perdida (de investimento)

**3.3.1 Moldagem em areia** Inicialmente, o molde deve preencher uma série de requisitos, sem os quais a fundição não se realiza nas melhores condições.

Eles devem apresentar resistência suficiente para suportar o peso do metal líquido; devem suportar a ação erosiva do metal líquido no momento do vazamento; devem gerar a menor quantidade possível de gás, de modo a evitar erosão do molde e contaminação do metal; ou devem facilitar a fuga de gases gerados para a atmosfera etc.

O recipiente do molde ou “caixa de moldagem” é constituído de uma estrutura, geralmente metálica, de suficiente rigidez para suportar o socamento da areia na operação de moldagem, assim como a pressão do metal líquido durante a fundição.

Geralmente a “caixa de moldagem” é construída em duas partes: caixa superior e caixa inferior e os modelos são montados em placa, como a Figura 12 mostra.

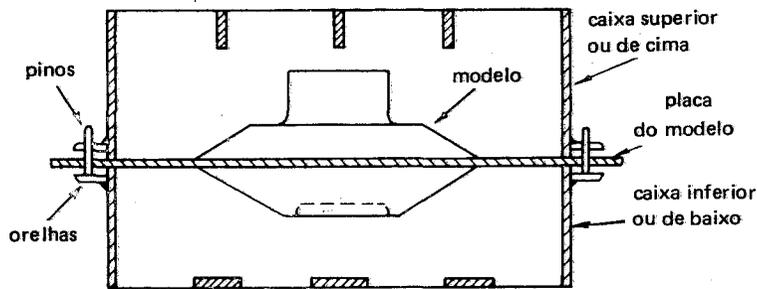


Figura 12 *Modelo em placa montada numa caixa de moldar.*

As caixas são dotadas de pinos e orelhas para sua centragem perfeita, assim como do modelo.

A *moldagem em areia verde* é o processo mais simples e mais generalizado em fundições. Consiste em compactar, manualmente ou empregando máquinas de moldar, uma mistura refratária plástica — chamada areia de fundição —, composta essencialmente de areia silicosa, argila e água, sobre o modelo colocado ou montado na caixa de moldar.

Confeccionada a cavidade do molde, o metal é imediatamente vazado no seu interior.

A Figura 13 mostra esquematicamente a seqüência de operações no processo de fundição em areia verde, para o caso de uma peça simples.

Partindo-se do modelo (I), o mesmo é colocado sobre um estrado de madeira no qual se apóia também a caixa de moldar de baixo; em seguida, joga-se areia no interior da caixa e a mesma é compactada de encontro ao modelo até encher a caixa; a compactação é realizada manualmente, com soquete ou empregando um martelo pneumático (II); a seguir, vira-se a caixa de baixo e retira-se o estrado de madeira (III); coloca-se a outra metade da caixa de moldagem (caixa de cima) e os modelos do alimentador B e do

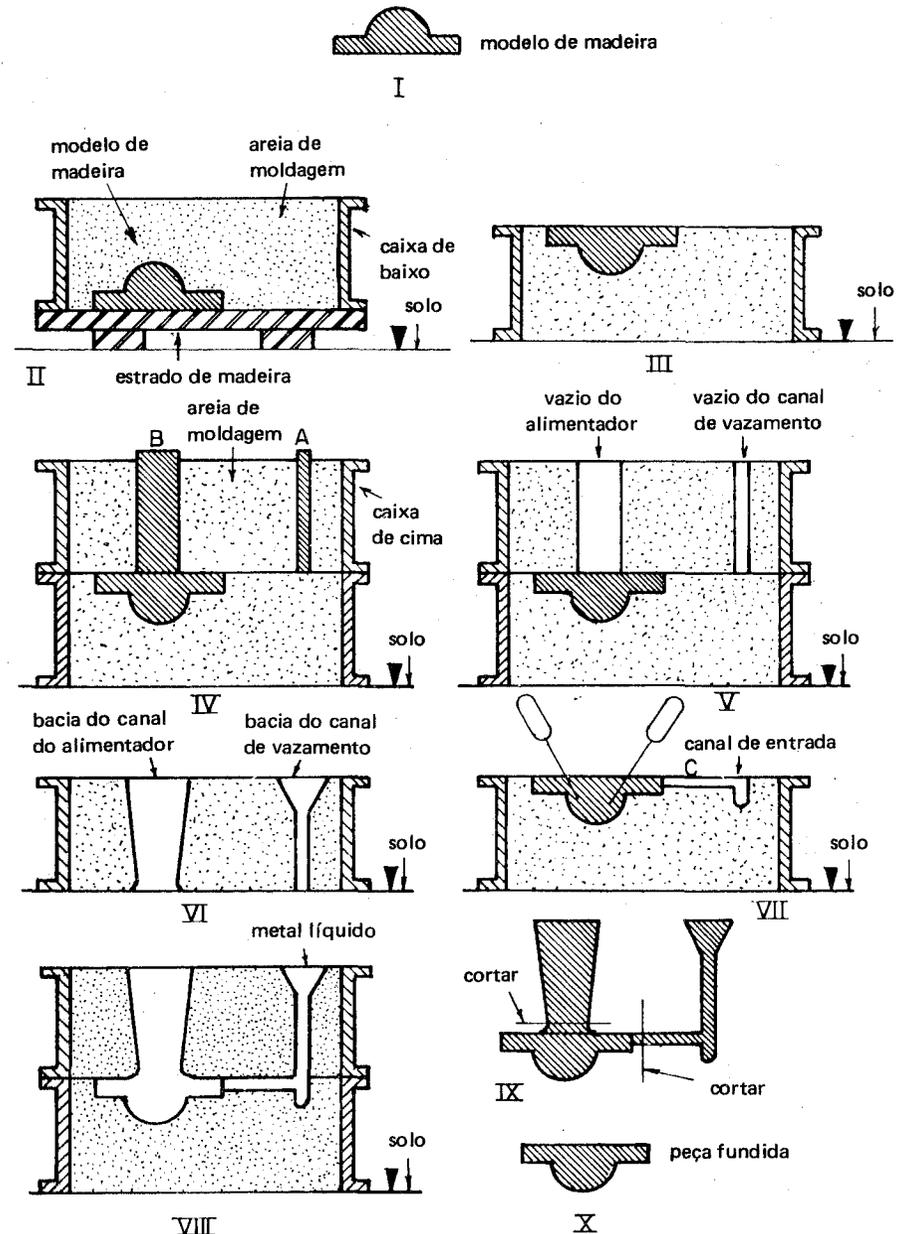


Figura 13 *Representação esquemática da seqüência de operações na fundição em areia verde.*

canal de vazamento; coloca-se areia e procede-se à sua compactação (IV); retiram-se os modelos dos canais A e B (V); separa-se as caixas e procede-se à abertura das bacias do alimentador e do canal de vazamento (VI) da caixa de cima; na caixa de baixo, procede-se à abertura do canal de entrada e retirada do modelo da peça (VII); fecha-se a caixa de moldagem, colocando as duas metades uma sobre a outra e mantendo-as presas por presilhas ou por um peso colocado sobre a caixa de cima (VIII); vaza-se o metal, desmolda-se e corta-se os canais (IX), resultando a peça fundida (X).

A areia de fundição deve apresentar certos característicos que permitem uma moldagem fácil e segura. Entre eles, os mais importantes são<sup>(5)</sup>: plasticidade e consistência, moldabilidade, dureza, resistência, refratariedade etc. Para determinação desses característicos, procede-se a ensaios de laboratório\*.

Os componentes de uma areia de fundição são os seguintes<sup>(5)</sup>:

- *areia*, que é o constituinte básico, no qual devem ser considerados os característicos de pureza, granulometria (tamanho de grãos, distribuição granulométrica e porcentagem de finos, dureza, forma dos grãos, integridade dos grãos, refratariedade, permeabilidade e expansibilidade;
- *argila*, que constitui o aglomerante usual nas areias de fundição sintéticas (especialmente preparadas);
- *carvão moído*, eventualmente, para melhorar o acabamento das peças fundidas;
- *dextrina*, aglomerante orgânico, para conferir maior resistência mecânica à areia quando secada (estufada);
- *farinha de milho gelatinizada* (Mogul), que melhora a qualidade de trabalhabilidade da areia;
- *breu em pó*, também como aglomerante, que confere, principalmente em areia seca, grande resistência mecânica;
- *serragem*, eventualmente, para atenuar os efeitos da expansão.

Uma composição típica de areia sintética de fundição é a seguinte (partes em peso):

- areia: 100
- argila: 20
- água: 4

\* O Boletim nº 52 do IPT, que consta da Bibliografia, contém um capítulo sobre "Controle das Areias de Fundição" e deve ser consultado pelos que desejarem se aprofundar no assunto.



Esse tipo de areia, de composição mais simples, é indicado para emprego geral na confecção dos moldes.

Para a confecção dos machos, as areias devem apresentar alta resistência depois de estufadas (secas), alta dureza, alta permeabilidade e inalterabilidade. Os seus componentes, além da areia natural e água, incluem vários tipos de aglomerantes, entre os quais podem ser citados o silicato de sódio, cimento portland, resinas, piche, melaços, farinha Mogul, óleos etc.

As areias de fundição são preparadas em misturadores especiais, onde os componentes são inicialmente misturados secos (durante 2 a 3 minutos), seguindo-se a mistura úmida pela adição, aos poucos, de água, até completa homogeneização da mistura.

A areia usada, é, geralmente, reaproveitada, chegando-se a obter alto índice de recuperação (98%); inicialmente, logo após a desmoldagem, a areia deve ser peneirada; a seguir é levada ao misturador.

A moldagem, como foi citado, pode ser realizada *manualmente* (com soquete manual ou pneumático) ou *mecanicamente*. Neste último caso, empregam-se máquinas e sistemas de moldar especiais, entre os quais podem ser citados: máquinas de compressão, máquinas de impacto, máquinas de compressão vibratória, máquinas de sopragem e máquinas de projeção centrífuga.

A moldagem mecânica é empregada nas fundições modernas, para produção seriada e produção de moldes e, conseqüentemente, de peças fundidas, de qualidade superior.

A Figura 14 mostra esquematicamente a moldagem mecânica, empregando um modelo próprio para moldagem manual, por intermédio de três métodos<sup>(6)</sup>: (a) pela utilização de um dispositivo vibratório contido na máquina de moldar; (b) comprimindo a areia no interior da caixa de moldar, de modo que seu nível fique mais baixo que a altura da caixa; (c) encher o molde com excesso de areia, comprimir e nivelar de acordo com a altura da caixa.

Os machos, como já se mencionou, são utilizados para a fundição de peças com cavidades. A Figura 15 representa esquematicamente a seqüência das operações de fundição de peça com cavidade.

A Figura 16<sup>(6)</sup> mostra alguns outros exemplos de machos simples, localizados na caixa de moldar.

Os machos são normalmente secados em estufa (estufados) entre 150° e 250°C; na sua confecção, os aglomerantes mais empregados são resinas, piche, melaço (subproduto da refinação de açúcar de cana), cereais (dextrina ou Mogul) etc.

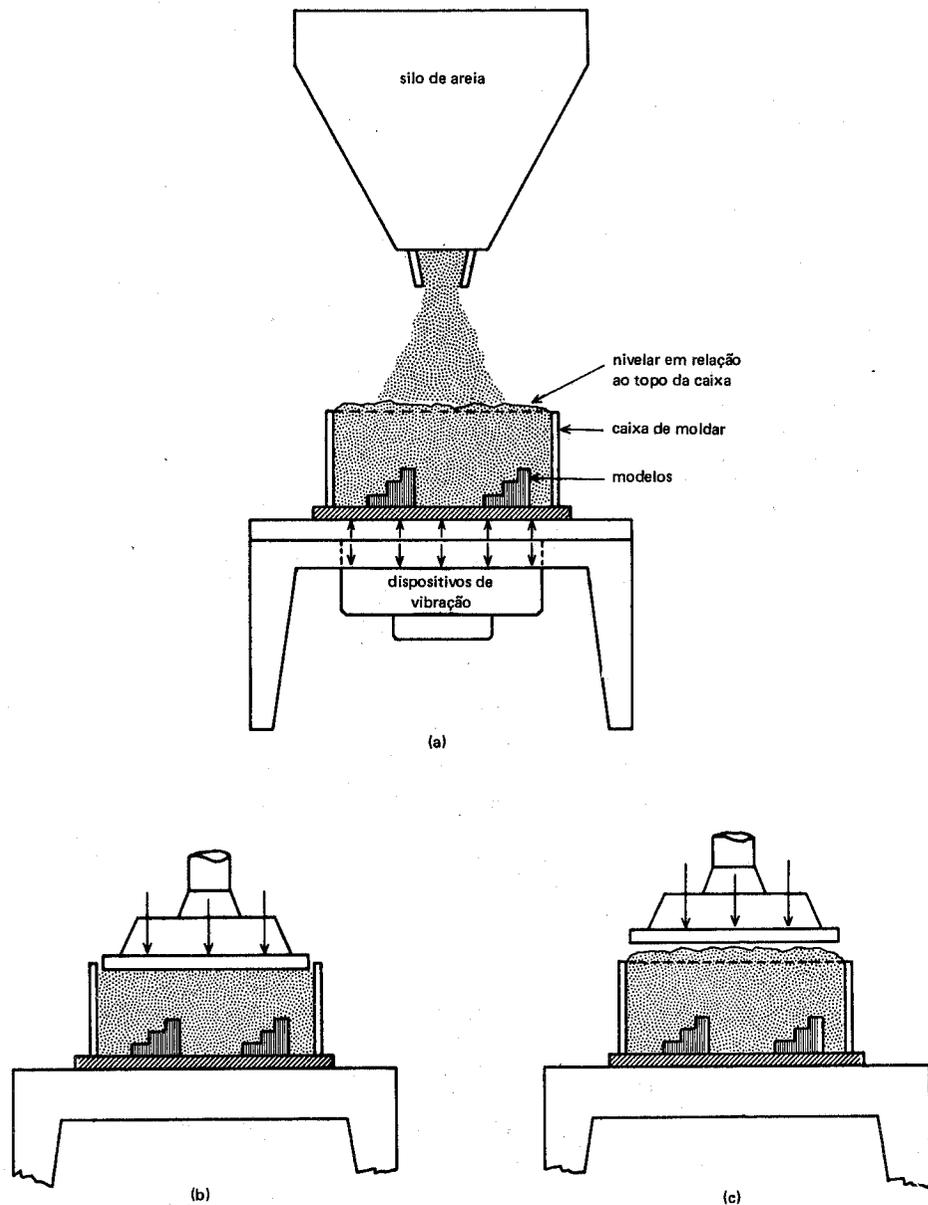


Figura 14 Três métodos de compactação da areia numa caixa de modelar: (a) Utilização de um dispositivo vibrador. (b) Comprimir e deixar com menos areia. (c) Encher em excesso e nivelar.

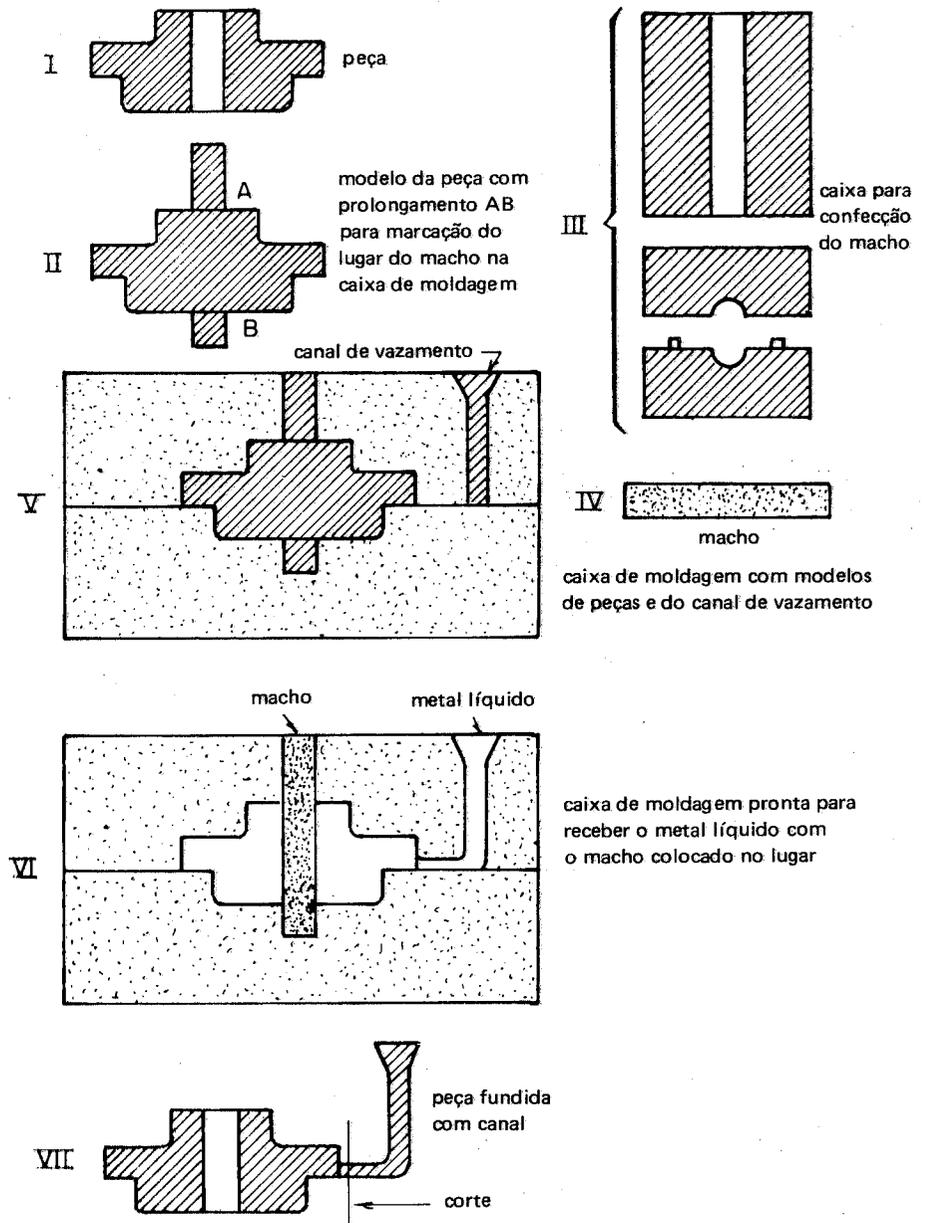


Figura 15 Exemplo de fundição de peça com macho.

**3.3.2 Moldagem em areia seca ou em molde estufado** Neste caso, a areia deve conter aditivos orgânicos para melhorar seus característicos; a secagem tem lugar em estufas apropriadas, a temperaturas que variam de 150 a 300°C. As vantagens dos moldes estufados são, em linhas gerais, maior resistência à pressão do metal líquido, maior estabilidade dimensional, maior dureza, maior permeabilidade e melhor acabamento das peças fundidas.

Esse tipo de moldagem é empregado em peças de qualquer dimensão ou peso, sempre que se exige um melhor acabamento.

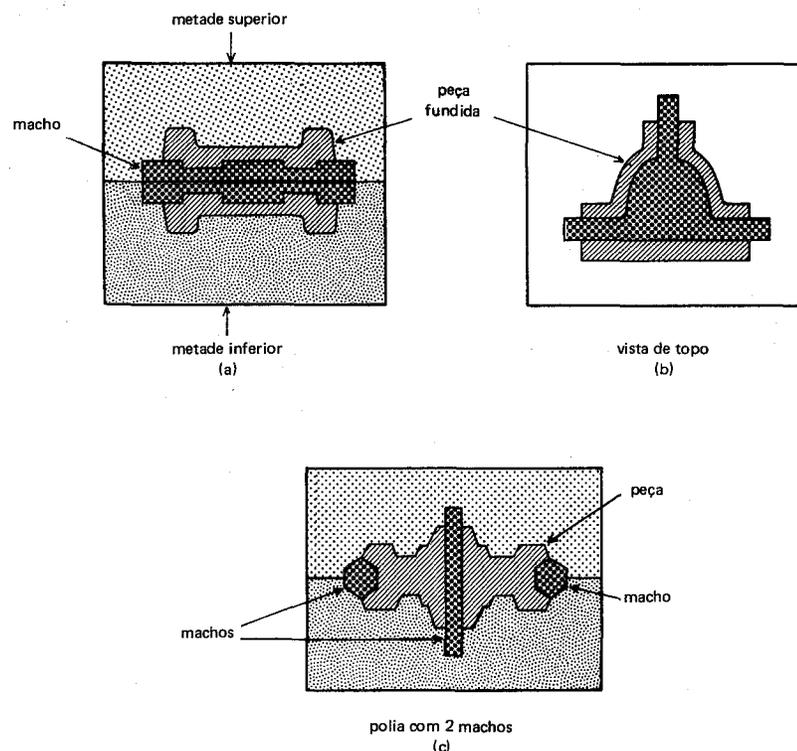


Figura 16 Outros exemplos de machos simples localizados na caixa de moldar.

**3.3.3 Moldagem em areia-cimento** Este processo, em princípio, tem aplicação semelhante à dos moldes estufados. É preferido para moldagem de peças médias e grandes. Uma composição típica da areia de moldagem é a seguinte (porcentagem em peso): areia silicosa, 90%; cimento portland, 10%; e água, 8%.

**3.3.4 Processo CO<sub>2</sub>** É de aplicação relativamente recente. Utiliza-se para moldes e machos relativos a peças de quaisquer dimensões. No processo, os moldes são do tipo convencional, de areia aglomerada com silicato de sódio (2,5 a 6,0% em peso). Depois de compactados, são eles submetidos a um tratamento com CO<sub>2</sub>, que consiste na passagem de uma corrente desse gás através de sua secção. Ocorre uma reação entre o CO<sub>2</sub> e o silicato de sódio; forma-se sílica-gel, carbonato de sódio e água, resultando um endurecimento do molde, em tempo relativamente curto. Não há necessidade de estufagem, alcançando-se elevadas propriedades de dureza e resistência.

O processo é empregado igualmente para a confecção de moldes de areia completos.

**3.3.5 Processo de moldagem plena** Neste processo\* são empregados modelos de espuma de poliestireno<sup>(6)</sup>. Blocos e chapas desse material podem ser cortados, gravados e colados em formatos os mais variados. Como seu peso é muito pequeno (16 kg/m<sup>3</sup>), permitem a confecção de modelos de grandes dimensões.

A moldagem é conduzida do mesmo modo que a empregada quando se tem modelos de madeira, embora se recomende menor pressão durante a moldagem. Quando o metal líquido é derramado no interior do molde, ele vaporiza o poliestireno e preenche os espaços vazios. Em resumo, não há “cavidades”, em momento algum.

Algumas das vantagens do processo são: ângulos de saída e cantos arredondados não são necessários; pouca ou nenhuma quantidade de aglomerante misturada na areia; redução drástica da quantidade de machos; mão-de-obra menos qualificada.

As desvantagens eventuais se relacionam com o gás gerado que pode ocasionar alguns problemas e com o acabamento da superfície que, em geral, é mais grosseiro do que o obtido na moldagem normal.

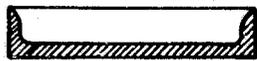
**3.4 Moldagem em molde metálico** Os processos que empregam moldes metálicos são: fundição em molde permanente e fundição sob pressão.

**3.4.1 Moldes permanentes** A aplicação mais conhecida é a da fundição de “lingotes”, ou seja, peças de forma regular, cilíndrica ou prismática, que irão sofrer posterior processamento mecânico.

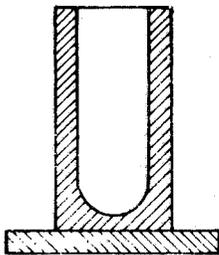
Os moldes, nesse caso, são chamados “lingoteiras”.

Alguns tipos estão representados na Figura 17.

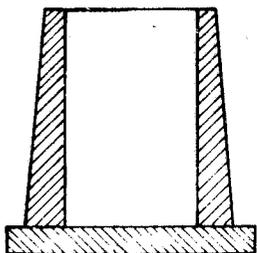
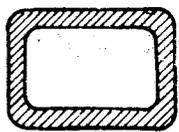
\* O processo é patenteado pela “Full Mold Process, Inc.”.



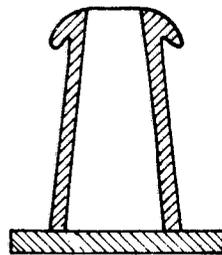
(a) — lingoteira horizontal



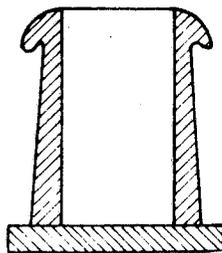
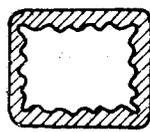
(b)



(d)



(c)



(e)

b — c — d — e — lingoteiras verticais

Figura 17 Alguns dos tipos mais usados de lingoteiras.

Em geral, as lingoteiras são inteiriças, ou com o fundo constituído de uma placa sobre a qual o corpo da lingoteira se apóia.

Os tipos verticais são empregados geralmente para a fundição de lingotes de aço. Os tipos horizontais são mais utilizados para metais e ligas não-ferrosos.

A lingoteira inteiriça (tipo b da figura) é empregada principalmente quando se utiliza “cabeça quente” ou “massalote”, o que facilita a extração do lingote solidificado.

Normalmente, o vazamento do metal líquido é feito pela parte superior da lingoteira. Entretanto, são empregadas também lingoteiras com enchimento pelo fundo, através de canais de vazamento. Essa técnica propicia um enchimento mais uniforme do metal no interior da lingoteira.

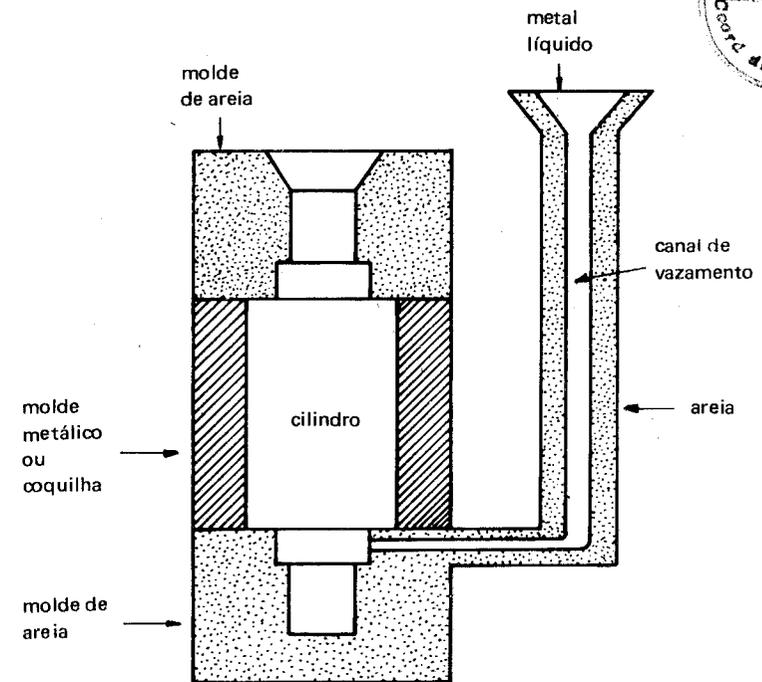


Figura 18 Molde permanente misto para fundição de um cilindro de laminação coquilhado.

Moldes *permanentes mistos* são empregados em certos casos. A Figura 18 apresenta um exemplo, para fundição de um cilindro de laminação "coquilhado". A parte metálica do molde é chamada "coquilha" e o material, que solidifica mais rapidamente nessa secção, adquire uma camada metálica dura e de alta resistência ao desgaste, característicos necessários para a aplicação mencionada.

Os moldes permanentes são geralmente feitos de aço ou ferro fundido. Em alguns casos, empregam-se ligas de cobre, como bronze.

Pelo processo de *molde permanente*, utilizando a ação da gravidade, muitos outros tipos de peças são produzidos.

O molde consiste em duas ou mais partes que são convenientemente alinhadas e fechadas, de modo a formar a cavidade correspondente à forma desejada da peça.

Depois que a peça solidifica, o molde é aberto e a peça é retirada manualmente.

O processo permite a fundição de peças em ligas de alumínio, magnésio, cobre, zinco e ferro fundido cinzento.

Em ligas de alumínio, pode-se produzir peças com até cerca de 300 kg de peso; no caso de ferro fundido cinzento, o processo deixa de ser prático para peças de peso superior a cerca de 15 kg.

As peças, comparadas com as produzidas em moldes de areia, apresentam maior uniformidade, melhor acabamento superficial, tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhores propriedades mecânicas.

Entretanto, o processo é geralmente limitado a peças de dimensões relativamente pequenas, devido ao alto custo do molde; por essa mesma razão, o processo não se recomenda para pequenas séries; por outro lado, nem todas as ligas metálicas podem ser fundidas em moldes permanentes e, finalmente, formas muito complicadas dificultam o projeto do molde e tornam difícil a extração da peça do seu interior.

**3.4.2 Fundição sob pressão** Consiste em forçar o metal líquido, sob pressão, a penetrar na cavidade do molde, chamado *matriz*. Esta é metálica, portanto de natureza permanente e, assim, pode ser usada inúmeras vezes.

Devido à pressão e à conseqüente alta velocidade de enchimento da cavidade do molde, o processo possibilita a fabricação de peças de formas bastante complexas e de paredes mais finas que os processos por gravidade permitem.

A matriz é geralmente construída em duas partes, que são hermeticamente fechadas no momento do vazamento do metal líquido. Ela pode ser

utilizada fria ou aquecida à temperatura do metal líquido, o que exige materiais que suportem essas temperaturas.

O metal é bombeado na cavidade da matriz e a sua quantidade deve ser tal que não só preencha inteiramente essa cavidade, como também os canais localizados em determinados pontos para evasão do ar. Esses canais servem igualmente para garantir o preenchimento completo das cavidades da matriz. Simultaneamente, produz-se alguma rebarba.

Enquanto o metal solidifica, mantém-se a pressão durante um certo tempo, até que a solidificação se complete.

A seguir, a matriz é aberta e a peça é expelida. Procedese, então, à limpeza da matriz e à sua lubrificação. Fecha-se novamente e o ciclo é repetido.

As vantagens do processo são as seguintes<sup>(7)</sup>:

- produção de formas mais complexas que no caso da fundição por gravidade;
- produção de peças de paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas;
- alta capacidade de produção;
- produção de peças praticamente acabadas;
- utilização da mesma matriz para milhares de peças, sem variações significativas nas dimensões das peças produzidas;
- as peças fundidas sob pressão podem ser tratadas superficialmente, por revestimentos superficiais, com um mínimo de preparo prévio da superfície;
- algumas ligas, como a de alumínio, apresentam maiores resistências que se fundidas em areia.

As principais desvantagens são<sup>(7)</sup>:

- as dimensões das peças são limitadas: normalmente o seu peso é inferior a 5 kg; raramente ultrapassa 25 kg;
- pode haver dificuldades de evasão do ar retido no interior da matriz, dependendo dos contornos das cavidades e dos canais; o ar retido é a principal causa de porosidade nas peças fundidas;
- o equipamento e acessórios são relativamente de alto custo, de modo que o processo somente se torna econômico para grandes volumes de produção;
- o processo, com poucas exceções, só é empregado para ligas cujas temperaturas de fusão não são superiores às das ligas à base de cobre.

O princípio do processo está esquematizado na Figura 19<sup>(6)</sup>. Como se vê, o metal líquido está contido num recipiente aquecido por uma fonte adequada de calor. No seu interior, localiza-se um cilindro, ao longo do qual desliza um pistão. O cilindro é dotado de duas aberturas, A e B, por onde penetra o metal líquido, quando o pistão está levantado. Ao cilindro está ligado um canal que leva diretamente à matriz. Ao descer, o pistão força o metal do cilindro, através do canal, no interior das cavidades da matriz. O cilindro volta a ser alimentado de metal líquido, quando o pistão reassume a posição inicial; e assim em seguida.

É muito importante, na fundição sob pressão, um projeto adequado da matriz e de todas suas peças acessórias que constituem os sistemas de injeção, extração da peça, refrigeração etc.

A máquina de fundição sob pressão é dotada de duas mesas: uma, fixa, onde se localizam uma metade da matriz e o sistema de injeção do metal líquido; outra, móvel, onde se localizam a outra metade da matriz, o sistema de extração da peça e o sistema de abertura, fechamento e travamento da máquina.

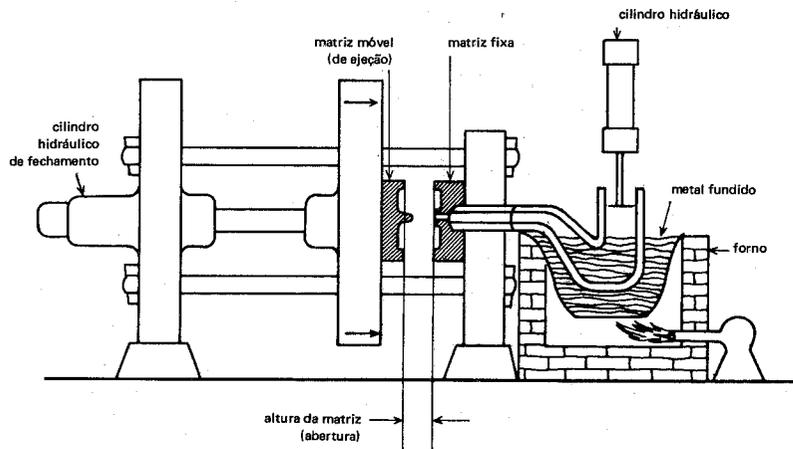


Figura 19 Representação esquemática da operação de fundição sob pressão em câmara quente.

A Figura 20<sup>(8)</sup> apresenta o corte de uma matriz para fundição sob pressão.

As máquinas para fundição sob pressão obedecem a dois tipos básicos:

— se o metal a ser utilizado funde a uma temperatura baixa e não ataca o material do cilindro e pistão de injeção, este cilindro pode ser colocado diretamente no banho de metal fundido. Este tipo de máquina é cha-

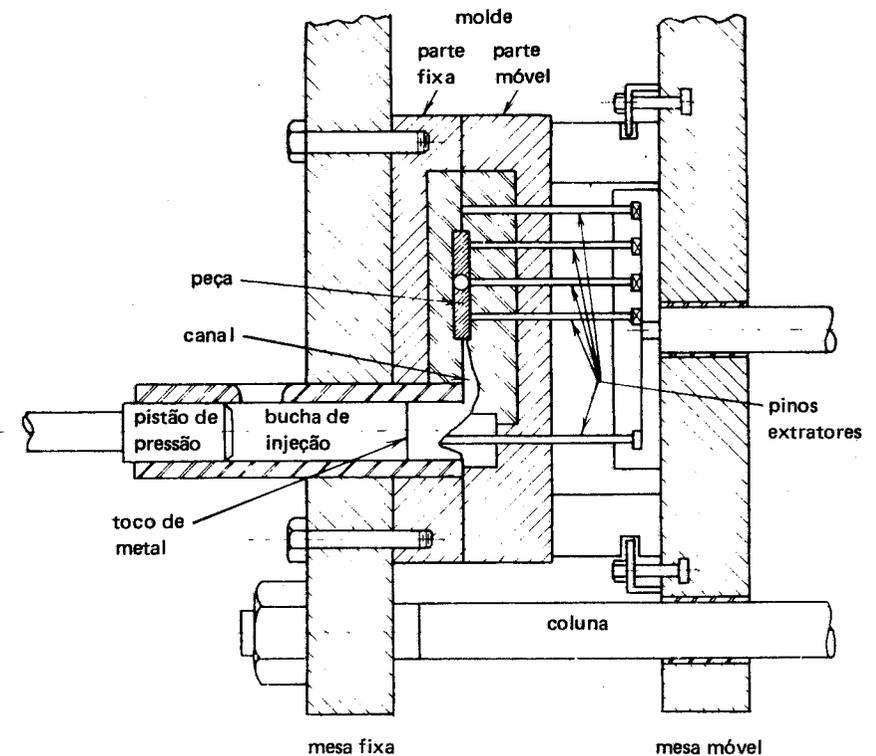


Figura 20 Corte de uma matriz para fundição sob pressão.

mado “câmara quente”. A Figura 19 indica, esquematicamente o sistema de câmara quente. As peças fundidas neste tipo de máquina pesam desde poucos gramas até cerca de 25 kg. Sua capacidade de produção, dependendo do grau de mecanização adotado e do tipo de peça, varia normalmente de 50 a 500 peças por hora;

— se o metal fundido ataca o material do sistema de bombeamento (cilindro e pistão), este não pode ser colocado em contato com o metal líquido. O tipo de máquina usado é chamado “câmara fria”, representada esquematicamente na Figura 21.

Como se vê, a câmara de pressão é montada horizontalmente com um orifício de vazamento no topo da parede da câmara. O contato desta com o metal fundido ocorre somente no momento do vazamento.

Geralmente essas máquinas são empregadas para fundir sob pressão alumínio, magnésio e ligas de cobre.

Empregam-se também máquinas com câmara fria, do tipo vertical.

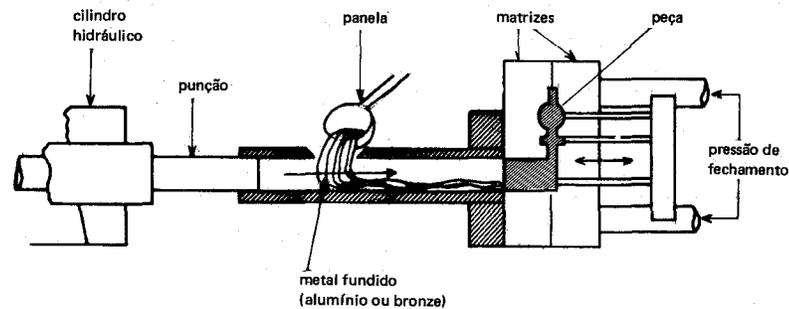


Figura 21 Representação esquemática do método de fundição sob pressão de câmara fria (peça de alumínio e ligas de cobre).

**3.5 Outros processos de fundição** Serão considerados a seguir alguns outros processos de fundição.

**3.5.1 Fundição por centrifugação** O processo consiste em vazarse metal líquido num molde dotado de movimento de rotação, de modo que a força centrífuga origine uma pressão além da gravidade, a qual força o metal líquido de encontro às paredes do molde onde solidifica.

Um dos exemplos mais conhecidos de utilização do processo corresponde à fabricação de tubos de ferro fundido para linhas de suprimento de água.

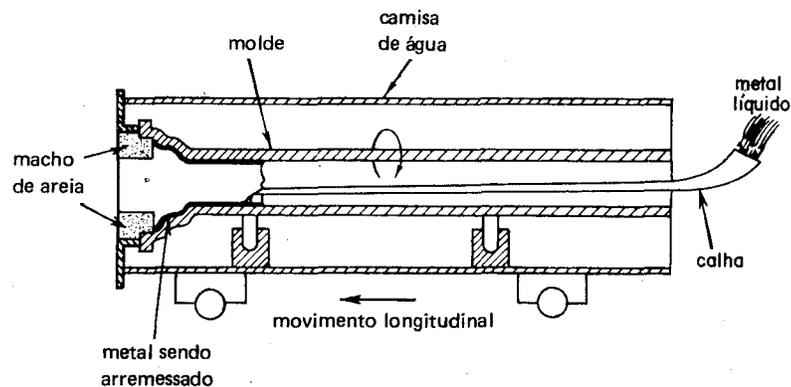


Figura 22 Sistema de fundição centrífuga para produção de tubos de ferro fundido.

Nesse caso, o processo está ilustrado na Figura 22. Como se vê, a máquina empregada consiste essencialmente em um molde metálico cilíndrico, montado em roletes, de modo que nele se possa aplicar o movimento de rotação. O cilindro é rodeado por uma camisa de água estacionária, montada, por sua vez, em rodas, de modo a permitir que o conjunto se movimente longitudinalmente.

O metal líquido é vazado no interior do molde, por uma das extremidades, por intermédio de uma "calha" que é alimentada por uma "panela de fundição".

No início da operação, a calha está localizada na extremidade oposta à da entrada do metal. Nesse instante, iniciam-se os movimentos de rotação e longitudinal e a corrente líquida começa a fluir tangencialmente sobre a superfície do molde, onde é mantida pela força centrífuga originada, até solidificar.

Terminado o processo, a máquina é parada e o tubo solidificado é facilmente retirado por intermédio de tenazes.

Usam-se, também, para outros tipos de peças, sistemas verticais de centrifugar. A Figura 23 ilustra esquematicamente esse processo<sup>(9)</sup>.

**3.5.2 Fundição de precisão** Os processos de fundição de precisão utilizam um molde obtido pelo revestimento de um modelo consumível com uma pasta ou argamassa refratária que endurece à temperatura ambiente ou mediante adequado aquecimento.

Uma vez endurecida essa pasta refratária, o modelo é consumido ou inutilizado. Tem-se assim uma casca endurecida que constitui o molde propriamente dito, com as cavidades correspondentes à peça que se deseja produzir.

Vazado o metal líquido no interior do molde e solidificada a peça correspondente, o molde é igualmente inutilizado.

Assim, ao contrário do que ocorre na fundição em areia verde, onde o modelo é usado inúmeras vezes e o molde é inutilizado, nos processos de fundição de precisão, tanto o modelo como o molde são inutilizados.

O modelo consumível é confeccionado a partir de matrizes, cujas cavidades correspondem à forma do modelo. Essa matriz é praticamente permanente.

As principais vantagens da fundição de precisão são as seguintes<sup>(10)</sup>:

possibilidade de produção em massa de peças de formas complicadas que são difíceis ou impossíveis de obter pelos processos convencionais de fundição ou por usinagem;

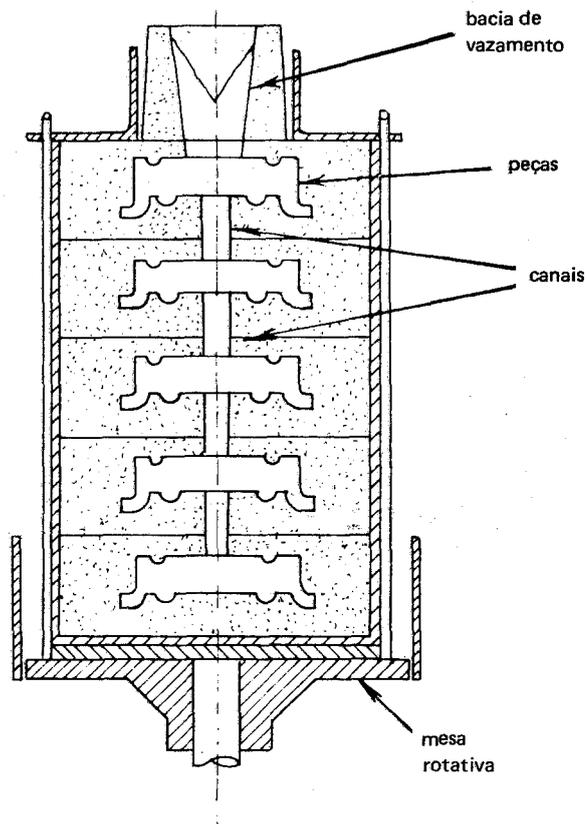


Figura 23 Sistema vertical de centrífuga.

- possibilidade de reprodução de pormenores precisos, cantos vivos, paredes finas etc.; obtenção de maior precisão dimensional e superfícies mais macias;
- utilização de praticamente qualquer metal ou liga;
- as peças podem ser produzidas praticamente acabadas, necessitando pouca ou nenhuma usinagem posterior, o que torna mínima a importância de adotarem-se ligas fáceis de usinar;
- o processo permite rigoroso controle do tamanho e contornos dos grãos, solidificação direcional e orientação granular, o que resulta em controle mais preciso das propriedades mecânicas;



- o processo pode adotar fusão sob atmosfera protetora ou sob vácuo, o que permite a utilização de ligas que exijam tais condições.

As principais limitações são:

- as dimensões e o peso são limitados, devido a considerações econômicas e físicas e devido à capacidade do equipamento disponível. O peso recomendado para as peças fundidas por precisão não deve ser superior a cerca de 5 kg;
- o investimento inicial para peças maiores (de 5 a cerca de 25 kg) é normalmente muito elevado.

Alguns exemplos de peças obtidas por fundição de precisão<sup>(11)</sup>:

- peças estruturais para a indústria aeronáutica, de ligas de alumínio e aço inoxidável;
- peças para motores de avião, de aço inoxidável, ligas resistentes ao calor etc.;
- sistemas de combustão de aviões, de aço inoxidável, ligas de alumínio e ligas resistentes ao calor;
- instrumentos de controle de aviões, de alumínio e suas ligas, ligas cobre-berílio, ligas de magnésio, de bronze-silício etc.;
- em equipamento aeroespacial, de aço inoxidável, alumínio etc.;
- em equipamento de processamento de dados, de aços-liga, latão ao silício, ligas cobre-berílio, ligas de alumínio etc.;
- em motores elétricos, de aço doce, ligas cobre-berílio, latão ao silício, aço inoxidável, cobre etc.;
- em equipamento eletrônico de comunicações, de cobre-berílio, alumínio e suas ligas, bronze ao silício etc.;
- em turbinas a gás, de aço inoxidável, ligas de níquel, ligas resistentes ao calor e ao desgaste etc.;
- em armamentos de pequeno porte, de aços-liga, cobre-berílio etc.;
- em máquinas operatrizes e acessórios, em equipamento médico e odontológico; em equipamento óptico, em equipamento para indústria têxtil, em máquinas de escrever e equipamento de escritório, bem como em uma infinidade de outras aplicações.

Um dos processos de fundição de precisão corresponde ao sistema de *cera perdida*, ilustrado na Figura 24<sup>(12)</sup>.

As etapas do referido processo são as seguintes, a partir da matriz:

- a) a cera é injetada no interior da matriz para confecção dos modelos;
- b) os modelos de cera endurecida são ligados a um canal central;
- c) um recipiente metálico é colocado ao redor do grupo de modelos;
- d) o recipiente é enchido com uma pasta refratária – chamada *investimento* – para confecção do molde;
- e) assim que o material do molde endurecer, pelo aquecimento, os modelos são derretidos e deixam o molde;
- f) o molde aquecido é enchido do metal líquido, sob ação de pressão, por gravidade, a vácuo ou por intermédio de força centrífuga;
- g) o material do molde é quebrado e as peças fundidas são retiradas;
- h) as peças são separadas do canal central e dos canais de enchimento e esmerilhadas.

Um segundo sistema de fundição de precisão corresponde à *fundição em casca*. Nele, o molde é confeccionado a partir de uma mistura de areia e uma resina, endurecível pelo calor, a qual atua como aglomerante. A mistura é colocada sobre a superfície de um modelo metálico. O conjunto é aquecido e endurece, resultando aderência mútua dos grãos de areia; forma-se, assim, uma casca resistente e rígida que constitui metade do molde.

O modelo é então extraído.

A outra metade do molde é confeccionada de modo idêntico.

Prontos os moldes, são colocados os machos na sua cavidade, se necessários. As metades são juntadas e presas, geralmente por colagem.

A Figura 25 mostra esquematicamente o processo de fundição em casca, pelo sistema manual de caixa basculante<sup>(6)</sup>:

(a) a placa com o modelo, aquecida entre 177° e 260°C, é levada à caixa basculante, mantida na sua posição normal, contendo a areia de fundição;

(b) a caixa basculante é girada de 180° para que a areia caia sobre o modelo aquecido; o calor provoca a fusão da resina e liga as partículas de areia; quanto mais longo o tempo de contato da areia com o modelo mais espessa a casca resultante. Geralmente, uma casca com espessura variando de 4,7 a 9,5 mm é suficiente. O tempo necessário para atingir essa espessura varia de 15 a 60 segundos;

(c) a caixa basculante é levada à sua posição normal; o conjunto completo de modelo e molde é estufado a cerca de 315°C;

(d) o molde é extraído do modelo e está pronto para ser utilizado.

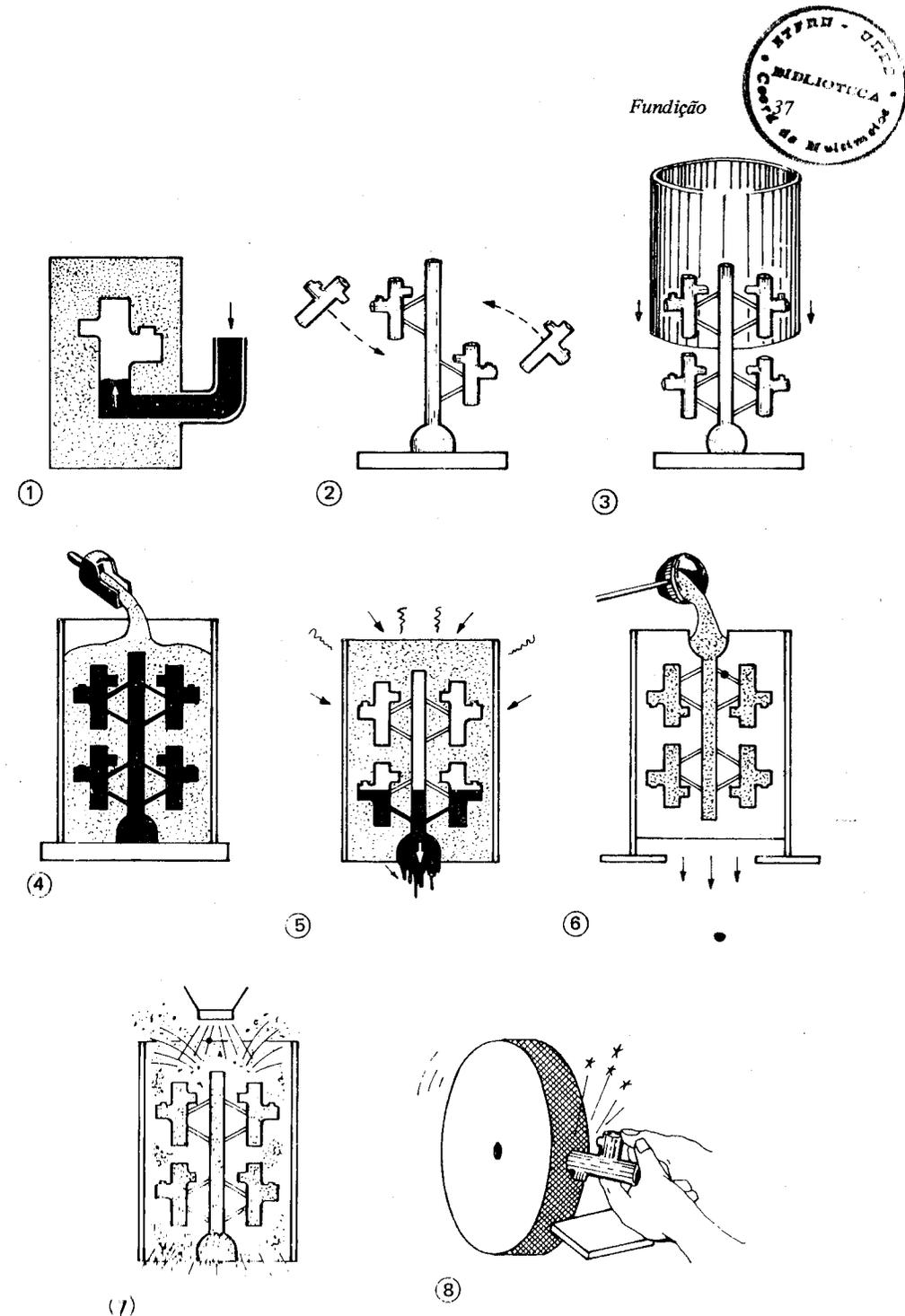


Figura 24 Fundição de precisão pelo processo de cera perdida.

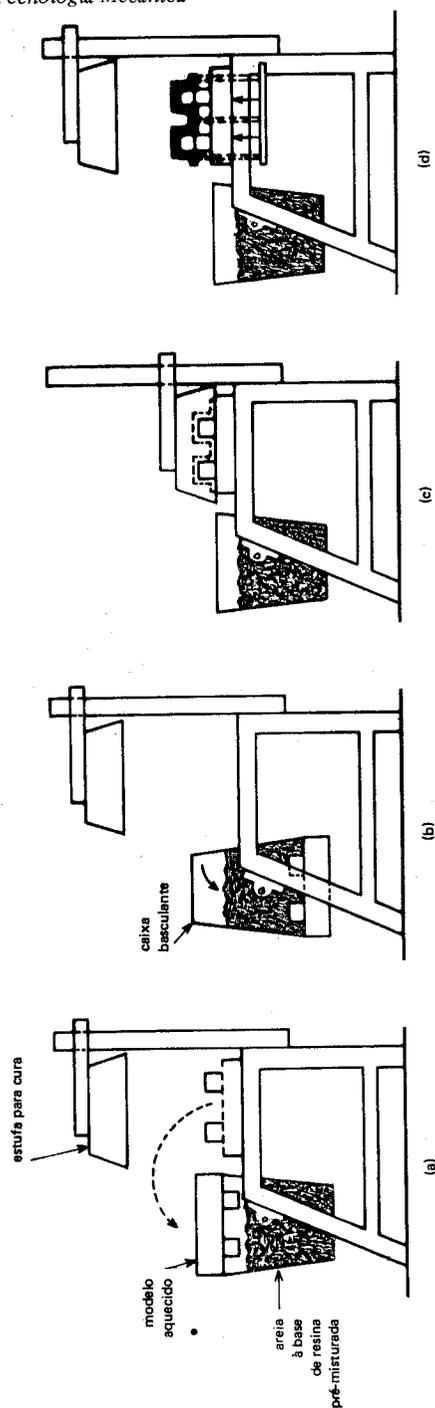


Figura 25 Método manual de caixa basculante: quatro fases para a confecção da "casca".



Se o molde for constituído de duas cascas, a outra metade é confeccionada da mesma maneira e as duas metades são coladas.

Em seguida, procede-se ao vazamento do metal líquido.

As vantagens do processo de fundição em casca são as seguintes<sup>(6)</sup>:

- pode-se produzir peças com tolerâncias entre mais ou menos 0,127 mm, de modo que, em operações de usinagem para acabamento, menor quantidade de metal é removida. As tolerâncias de usinagem variam de 1,0 a 1,5 mm;

- as peças fundidas em cascas podem apresentar acabamentos equivalentes a 3,2 mm ou superiores;

- na presença de orifícios, os machos correspondentes podem frequentemente fazer parte do modelo, de modo que são confeccionados e posicionados com maior precisão; na prática obtém-se orifícios relativamente pequenos, por exemplo em torno de 10 mm;

- não há necessidade de prever ângulos de saída maiores que 1/2° a 1°, facilitando a operação de usinagem final;

- podem ser fundidas secções muito finas, por exemplo de 2,5 a 5 mm; os ângulos de concordância também são pequenos. É preciso cuidado para que isso não afete a resistência mecânica das peças;

- qualquer tipo de metal, com características de fusão fácil, pode ser utilizado na produção de peças por fundição em casca; as dimensões destas podem atingir 1200 a 1500 mm. Contudo, a maioria das peças fundidas em casca possui a metade ou menos dessas dimensões.

As desvantagens do processo são as seguintes<sup>(6)</sup>:

- o custo do modelo é maior, porque o mesmo deve ser metálico, geralmente alumínio ou ferro fundido; além disso, os modelos devem estar isentos de defeitos superficiais, os quais podem dificultar a remoção da casca. Do mesmo modo, a areia à base de resina é de custo relativamente elevado, além de ser mais difícil de armazenar e manusear;

- as dimensões das peças fundidas em casca são limitadas, quando comparadas às peças produzidas em fundição convencional. Contudo, essas dimensões são geralmente maiores do que as obtidas por intermédio da fundição sob pressão.

**3.5.3 Processos de molde cerâmico** São métodos igualmente de fundição de precisão, destinados à produção de peças de grande precisão de aço-ferramenta, ligas de cobalto, titânio, aço inoxidável e ligas não-ferrosas<sup>(6)</sup>.

Os dois principais processos são denominados respectivamente “Unicast”, licenciado pela “Unicast Development Corporation” e o “Shaw”, licenciado pela “Avnet Shaw Division” da “Avnet, Inc.”.

Em ambos os casos são empregados modelos convencionais de madeira, plástico ou metal, montados em caixas de moldagem. Em vez de areia, emprega-se uma pasta refratária, preparada a partir de misturas rigorosamente controladas de pó cerâmico com um ligador líquido catalítico (um silicato alcalino). Conforme as peças metálicas, são empregadas misturas de composição diferente.

Os ingredientes são misturados e imediatamente e rapidamente derramados sobre o modelo. A pasta solidifica, em aproximadamente 3 a 5 minutos, tornando-se um sólido de aparência gelatinosa que pode ser extraído do modelo.

No processo Shaw, o molde é aquecido e o álcool contido na substância catalisadora evapora, deixando uma malha de fissuras finas no molde, o que torna a cerâmica impermeável, permitindo que ar e gases escapem durante o vazamento.

No processo Unicast, o molde verde é submetido à ação de um banho químico, por aspersão ou imersão. Resulta uma interação catalisadora que origina uma estrutura no molde de aparência celular ou esponjosa.

Os moldes são estufados a temperaturas até cerca de 980°C, durante aproximadamente uma hora. São a seguir montados, com os machos localizados e, finalmente, procede-se ao vazamento.

Por esses processos, pode-se fundir peças até cerca de 900 kg, embora os pesos mais comuns se situem entre 4,5 e 90 kg.

Os moldes cerâmicos possuem um coeficiente de dilatação correspondente a zero e suas paredes são muito resistentes, de modo que permitem a fabricação de peças de alta precisão.

A precisão dessas peças varia de mais ou menos 0,125 mm para peças pequenas a mais ou menos 1,14 mm para peças com dimensões laterais de 380 mm ou mais.

Entre as peças produzidas podem ser citadas: matrizes de forjamento, matrizes para fundição sob pressão, bocais de extrusão, algumas ferramentas para usinagem e muitos componentes mecânicos.

**3.5.4 Fundição contínua** Neste processo, as peças fundidas são longas, com seções quadrada, retangular, hexagonal ou de formatos diversos. Em outras palavras, o processo funde barras de grande comprimento, com as seções mencionadas, as quais serão posteriormente processadas por usinagem ou pelos métodos de conformação mecânica no estado sólido.

Em princípio, o processo consiste em vazar-se o metal líquido num cadinho aquecido (Figura 26)<sup>(6)</sup>. O metal líquido escoo através de matrizes de grafita ou cobre, resfriadas a água.

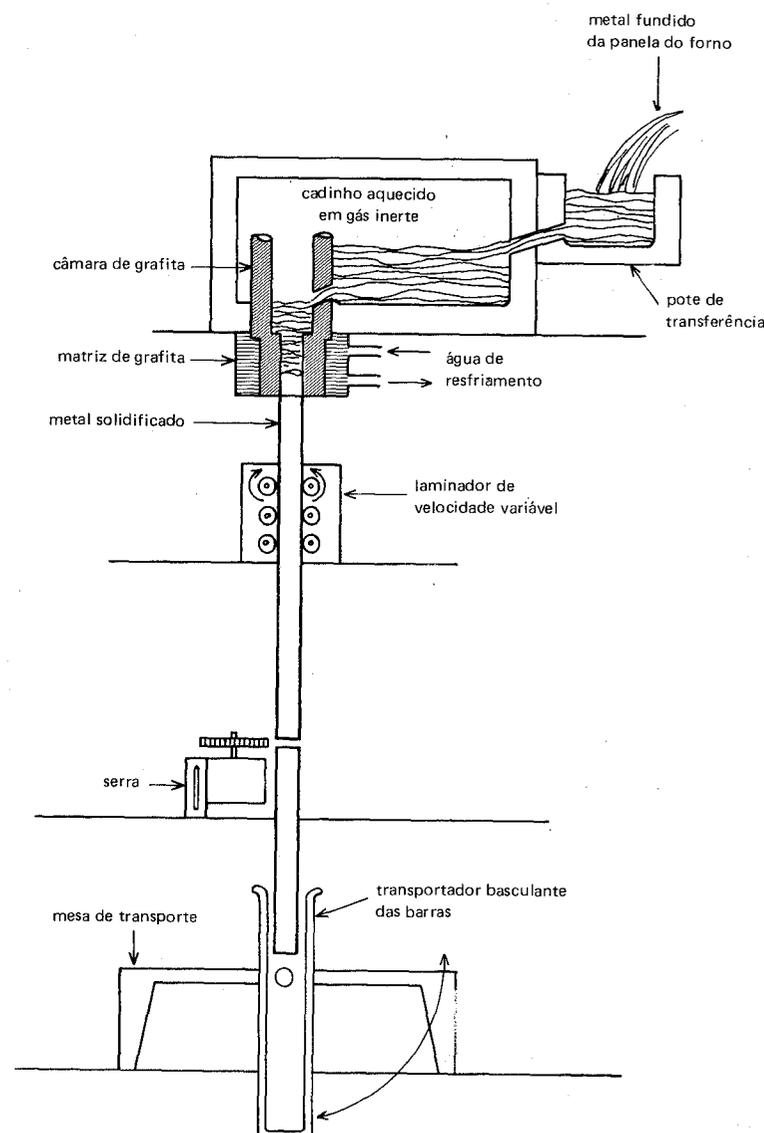


Figura 26 Máquina vertical de fundição contínua para ligas não-ferrosas.

A barra, já no estado sólido, porém ainda quente, é agarrada por cilindros de laminador e arrastada para frente, com velocidade correspondente às velocidades de resfriamento e solidificação do metal.

No percurso, a barra continua resfriando e é cortada pelo emprego de serras circulares ou chama de oxiacetileno. As peças cortadas são submetidas a processamento posterior.

A Figura 26 representa esquematicamente uma máquina vertical para fundição contínua de ligas não-ferrosas. Além destas, o aço e o ferro nodular podem ser fundidos continuamente.

O aço, por exemplo, pode ser produzido em placas com dimensões até 1.930 mm de largura por 230 mm de espessura ou em tarugos quadrados, aptos para serem usados em grandes laminadores.

Barras com secções as mais variadas podem ser obtidas a partir de alumínio, latão, ferro nodular etc.

**4 Fusão do metal** Existem inúmeros tipos de equipamentos ou fornos construídos para a fusão dos metais e preparo das ligas. Alguns se prestam praticamente à fusão de qualquer liga, enquanto outros são mais indicados para um metal, ou liga, determinado.

**4.1 Fusão do ferro fundido** O ferro fundido é uma das mais importantes ligas de ferro; caracteriza-se por possuir carbono em teores relativamente elevados (em média entre 2,5% e 4,0%), além de silício, igualmente em porcentagem bem acima da que se encontra no aço comum. A rigor, o ferro fundido deve ser considerado uma liga ternária Fe-C-Si. Suas aplicações na indústria são muito importantes.

O método clássico de fusão do ferro fundido, ainda hoje o mais empregado, é o que utiliza o forno "cubilô" (Figura 27). Esse forno caracteriza-se por sua alta eficiência térmica e economia de processo.

Consiste, como a figura mostra, em uma carcaça cilíndrica vertical de aço, revestida internamente com tijolos de material refratário. O seu diâmetro interno pode chegar a cerca de 1,80 m e a altura superar a 15 metros. Sua capacidade de fusão varia de 1 t/h até cerca de 50 t/h.

O fundo do cubilô possui duas portas semicirculares que são mantidas fechadas durante a operação do forno e são abertas para descarga dos resíduos que sobram depois de cada "corrida".

Esse fundo, durante a operação do forno ou "corrida", fica protegido por uma camada de até 5 cm de uma mistura socada de areia e tijolos refratários moídos, de modo a constituir uma proteção contra o metal líquido.

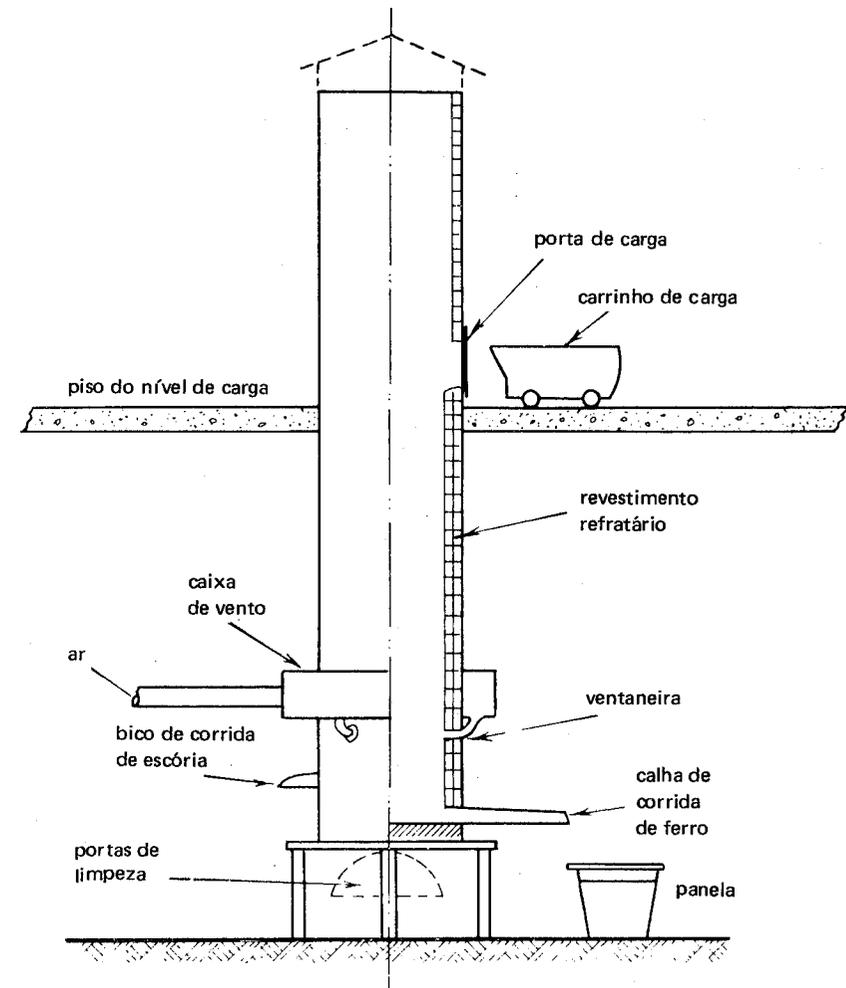


Figura 27 Forno "cubilô" para fusão de ferro fundido.

Logo acima do fundo está situado o "furo de vazamento" do metal, geralmente circular e de 12,5 a 25 mm de diâmetro. Um furo de 12,5 mm pode, por exemplo, descarregar cerca de 5 t de metal líquido por hora.

Ao furo é anexada a calha de vazamento que conduz o metal à panela de fundição.

Mais acima, e localizado a 90° ou 180°, situa-se o furo de saída de escória, formada durante o processo. A posição desse furo de escória deve ser tal que permita a formação de um volume suficiente de metal líquido.

Ainda mais acima, situa-se a região das “ventaneiras” ou aberturas, através das quais é introduzido ar comprimido no interior do forno.

O ar comprimido provém da “caixa de vento” que envolve o cubilô; por sua vez, a caixa de vento é alimentada por um ventilador ou ventoinhas rotativas, de modo a ter-se pressões variáveis, de acordo com o diâmetro do cubilô.

Muito acima da caixa de vento, está localizado o nível de carregamento do forno, e sua posição deve ser a mais alta praticável, de modo a permitir um preaquecimento da carga, tanto mais longo quanto possível.

Há cubilôs com câmara de água. Neles, uma certa altura da carcaça, desde o fundo até pouco abaixo das ventaneiras, é feita de blocos de carbono; uma camisa de água envolve a carcaça, desde as ventaneiras até uma altura acima delas de 1,80 m a 4,50 m.

Esses cubilôs apresentam maior capacidade de produção por hora.

A operação de um cubilô processa-se da seguinte maneira:

— a carga é composta de metal, combustível (carvão coque) e uma substância fundente (para facilitar a separação das impurezas do metal e do carvão e formar a escória);

— a composição da carga depende muito da experiência. A carga metálica é constituída de sucata metálica de fundição (canais, alimentadores, peças quebradas) e sucata em geral, ferro-gusa de alto-forno, sucata de aço, adições de ferro-silício e ferro-manganês; estas últimas para acerto de composição química do ferro fundido, de acordo com as especificações.

Como exemplo, para a produção de ferro fundido com a composição seguinte: Ct — 3,36%; Si — 2,17%; S — 0,12%; Mn — 0,77% e Cr — 0,21% a carga total do cubilô foi a seguinte<sup>(13)</sup>:

Sucata de fundição .....	1.089	kg
Ferro-gusa .....	590	kg
Aço .....	584	kg
Briquetes de Fe-Si .....	6,4	kg
Carvão coque .....	347	kg
Calcário (fundente) .....	82	kg
Carboneto de silício .....	15	kg

O peso das cargas é baseado nos diâmetros dos cubilôs e na quantidade de coque colocada. Uma regra comum é: a carga metálica deve ser aproximadamente o peso fundido por uma camada de cerca de 15 cm de coque. Por

exemplo<sup>(13)</sup>: um cubilô de 120 cm de diâmetro, com 16% de coque, o peso da carga será aproximadamente 400 kg e num cubilô de 180 cm de diâmetro a 10% de coque, o peso da carga seria de 1.450 kg.

A operação é iniciada, depois de limpad o forno, colocando-se fogo no fundo, com madeira e coque. Os furos de escória e de vazamento do metal são mantidos temporariamente abertos. Quando a camada de coque tiver atingido a altura das ventaneiras e o fogo tiver atravessado toda a camada é iniciada a carga propriamente dita, colocando-se quantidades predeterminadas de ferro-gusa, sucata, coque e fundente (calcário). Prossegue-se no carregamento até que o nível da porta de carga tenha sido atingido; esta altura da carga deve ser mantida durante toda a operação.

A operação de um cubilô pode ser intermitente ou contínua. No primeiro caso, a corrida é feita periodicamente, sendo retirada a quantidade necessária de metal líquido, através do furo de vazamento que é, a seguir, fechado.

No segundo caso, existe somente um furo de descarga e o material fundido (metal e escória) é levado a uma pequena bacia na calha de vazamento. Nela se acumulam ferro líquido e escória que flutua, por ser de menor densidade. A escória que flutua na superfície do ferro escorre lateralmente e o ferro corre normalmente para a panela de fundição.

O cubilô não produz um material de grande uniformidade, do ponto de vista de composição química, mesmo com os melhores controles operacionais. A temperatura do metal líquido também não é fácil de controlar, de modo que, normalmente, o cubilô é empregado para fundir peças de menor responsabilidade com relação à qualidade.

Para ferros fundidos, onde os característicos químicos e físicos devem ser mantidos dentro de rigorosas especificações, o equipamento de fusão mais utilizado é o *forno elétrico a arco*.

O mais comum é idêntico ao que é empregado na fundição de aço.

**4.2 Fusão do aço** O *forno elétrico a arco* consiste numa carcaça cilíndrica de aço, montada sobre um sistema que permite que o aparelho bascule para diante e para trás (Figura 28).

A parte inferior do forno, ou *soleira*, é constituída de um revestimento refratário, de natureza básica ou ácida, conforme a técnica de fundição usada. As partes laterais são revestidas de tijolos refratários tipo silicoso, assim como a cobertura ou *abóbada*.

O sistema de aquecimento compreende três eletrodos, igualmente empunçados, cada um dos quais ligado a uma fase de um suprimento trifásico de eletricidade. Os eletrodos podem ser de carbono ou de grafita, sendo pre-

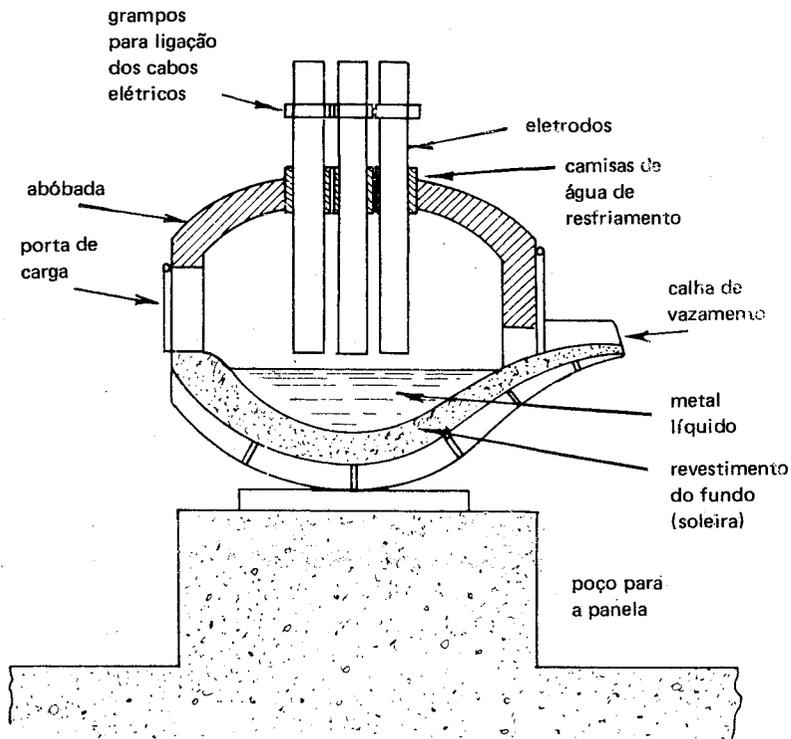


Figura 28 Forno elétrico a arco.

feridos estes últimos por possuírem maior resistência e condutibilidade elétrica mais elevada.

O efeito de aquecimento é produzido por arcos que se formam entre os três eletrodos. A energia elétrica é suprida em alta voltagem que é transformada nas baixas voltagens operacionais, mediante um transformador, a partir do qual, por meio de cabos flexíveis de cobre, é levada aos eletrodos.

A faixa de voltagens vai de 90 a 500 volts.

As condições de fusão são controladas pela variação de voltagem aplicada e pelo ajuste automático da posição ou altura dos eletrodos.

A carga do forno é feita por uma porta localizada do lado oposto à calha de vazamento. Em fornos de grande capacidade, a abóbada pode ser retirada e o carregamento é feito pelo topo.

Os fornos elétricos a arco são dimensionados em termos de diâmetro de carcaça; isso determina a capacidade em toneladas do metal líquido do forno. Por exemplo, um forno com diâmetro de 2,75 m tem uma capacidade de 10 a 12 t de metal líquido e um forno com diâmetro de 3,35 m tem uma capacidade de 22 a 26 toneladas.

A produção por hora depende da energia disponível; em média, a produção de 1 t/h exige cerca de 1.000 kVA de capacidade de transformador.

O forno elétrico a arco pode fundir qualquer tipo de sucata.

Na fusão de ferro fundido, a carga é constituída geralmente de sucata de ferro fundido e de aço e o controle dos teores de carbono e silício é feito adicionando-se carbono, na forma de coque e Fe-Si.

A formação da escória é importante, visto que ela atua como uma cobertura protetora na superfície do metal líquido, de modo a diminuir a oxidação e estabilizar o arco.

Na fundição do aço, duas técnicas são empregadas:

— *ácida*, em que a soleira é constituída de areia silicosa e tijolos refratários moídos, sendo a mistura socada no lugar. A carga do forno contém sucata de aço selecionada, de baixos teores de P e S, porque a técnica ácida não permite a eliminação desses elementos. Durante o período de fusão, pequenas quantidades de areia e calcário são adicionadas, periodicamente, para formação da escória protetora. Quando a fusão está completa, adiciona-se minério de ferro (óxido de ferro) de boa qualidade, o qual atua como agente oxidante, que reage com o Si e o Mn, produzindo óxidos de Si e Mn que se incorporam à escória. Depois que a maior parte do Si e do Mn tiver sido oxidada, o banho começa a "ferver", o que é uma evidência da eliminação do carbono. Este atinge valores de 0,20% a 0,25%. A "fervura" é interrompida pela adição de carbono, na forma de ferro carbonetado de baixos teores de P e S. A seguir, outras substâncias desoxidantes são adicionadas — Fe-Si e Fe-Mn — e o metal está pronto para ser vazado;

— *básica*; neste caso, o revestimento refratário do forno é de natureza básica: magnesita ou dolomita. A carga é constituída de sucata de fundição e sucata adquirida. Durante o período de fusão, adicionam-se periodicamente pequenas quantidades de cal, para formar a escória protetora. Adiciona-se ainda minério de ferro, quando a fusão estiver completada. A escória formada retira P do metal fundido. Essa escória é então retirada do forno, geralmente basculando-o ligeiramente para trás, de modo que ela saia pela porta de carregamento. A seguir, compõe-se uma nova escória, constituída essencialmente de cal, fluorspató e, às vezes, pequena quantidade de areia.

Assim que essa segunda escória fundiu, a corrente elétrica é reduzida e espalha-se, sobre a superfície do banho, em intervalos, coque pulverizado,

carbono ou ferro-silício ou uma combinação desses materiais. Esse período da operação do forno é chamado período de “refino” e seu objetivo é formar uma escória de carbureto de silício, essencial para a remoção do S do metal líquido.

A composição do banho é então controlada, pelo ajuste do teor de carbono, adicionando-se ferro-gusa de baixo P e de Fe-Si e Fe-Mn, estes últimos depois de ter-se atingido a temperatura apropriada.

O metal está, então, pronto para ser vazado.

Como desoxidante final, adiciona-se alumínio na panela de fundição.

A técnica básica é indispensável para produção de aços-liga.

Outro processo de fundição de aço emprega o *forno de indução* (Figura 29). O forno é suprido por corrente elétrica de alta frequência.

No princípio de *indução*, a carga metálica constitui o enrolamento secundário do circuito. O enrolamento primário é constituído por uma bobina de tubos de cobre resfriados a água, colocada no interior da carcaça do forno.

A câmara de aquecimento é um cadinho refratário ou é constituída de revestimento refratário socado no lugar, de natureza básica.

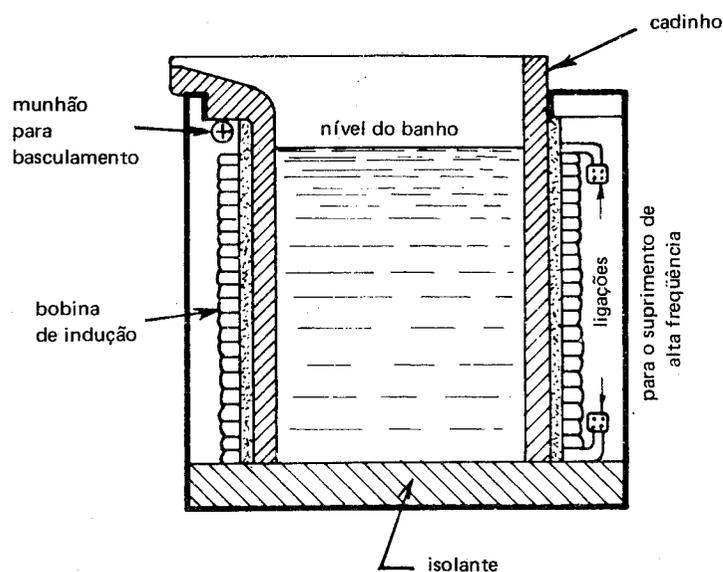


Figura 29 Forno de indução de alta frequência.

O processo consiste em carregar-se o forno com sucata de aço; a seguir passa-se uma corrente de alta frequência através da bobina primária; induz-se, assim, uma corrente secundária muito mais forte na carga, resultando o seu rápido aquecimento à temperatura desejada. Assim que se forma uma bacia de metal líquido, começa uma ação forte de agitação, o que concorre para acelerar a fusão. Fundida inteiramente a carga, procura-se atingir a temperatura desejada; o metal é desoxidado e está pronto para ser vazado.

Os fornos de indução para fusão de aço têm capacidades variáveis de 50 a 500 kg geralmente, embora fornos maiores sejam ocasionalmente empregados.

Tais fornos são utilizados principalmente para a fusão de aços-liga.

**4.3 Fusão de não-ferrosos** Os fornos elétricos, entre os quais os de indução, prestam-se bem à fundição de metais e ligas não-ferrosos. Entretanto, o principal tipo de forno é o de *cadinho*, aquecido a óleo ou gás (Figura 30) por intermédio de um queimador.

Os fornos podem ser do tipo estacionário, como o indicado esquematicamente na figura — neles, completada a fusão, o cadinho é retirado para vazamento do metal líquido — ou podem ser basculantes, onde o cadinho é fixo na carcaça, a qual contém um bico de vazamento; este é realizado, basculando-se o conjunto.

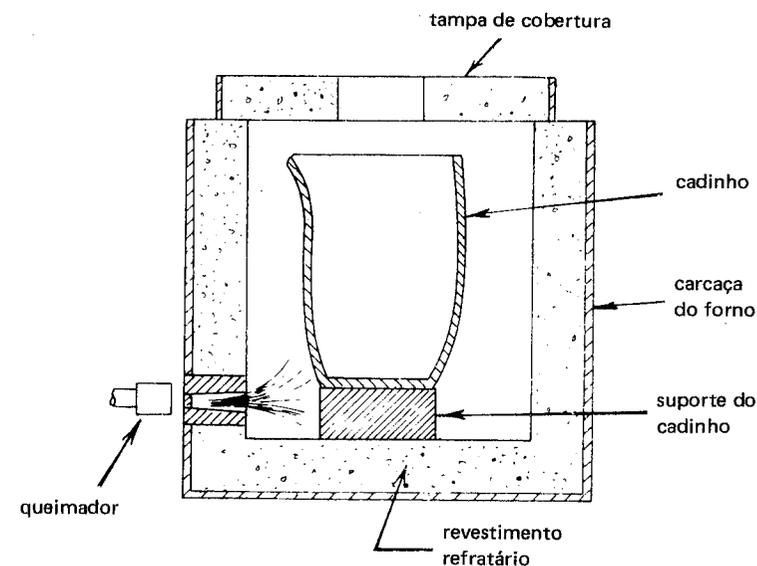


Figura 30 Forno de cadinho, tipo estacionário.

A maioria dos metais e ligas oxida-se, absorve gases e outras substâncias e forma uma casca superficial. Vários métodos foram idealizados para preservar a pureza do metal e produzir peças de boa qualidade.

O alumínio e suas ligas, por exemplo, absorvem hidrogênio quando aquecidos e esse gás causa porosidade nas peças fundidas, as quais apresentam, ainda, tendência à oxidação.

A casca formada serve, de certo modo, de proteção contra o hidrogênio e oxidação ulterior. A tendência de oxidação e absorção de oxigênio aumenta com a temperatura e o tempo, de modo que esses fatores devem ser rigorosamente controlados.

Alguns fundentes podem ser adicionados para melhorar as condições de fusão. Por essas razões, têm sido desenvolvidos processos de fusão a vácuo, de modo a manter metais e ligas não-ferrosos limpos e puros durante a fusão.

**4.4 Outros tipos de fornos** Entre eles pode-se citar o *forno de arco indireto* (Figura 31). Trata-se de um forno monofásico, tipo basculante, de eletrodos horizontais. Tem sido usado, com êxito, na fundição de ferro fundido de alta qualidade e ligas e metais não-ferrosos pesados. Depois de carregado, liga-se a força e dota-se o forno de um ligeiro movimento basculante para frente e para trás, mediante dispositivos elétricos especiais.

Esse movimento aumenta paulatinamente até atingir o máximo de 140°-160°, quando a carga está completamente fundida.

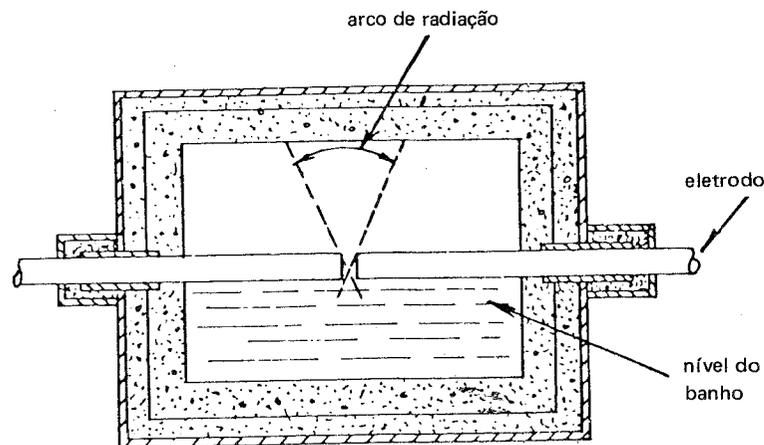


Figura 31 Forno a arco indireto, tipo "Detroit".

A regulagem do arco é feita automaticamente, ou seja, à medida que os eletrodos se consomem, um deles se aproxima, de modo a manter sempre o arco elétrico.

Com esse forno, obtêm-se temperaturas elevadas e, além disso, consegue-se um controle químico do metal fundido mais rigoroso.

A capacidade normal desses fornos atinge 2 t, embora tenham sido fabricados fornos maiores.

**5 Desmoldagem, limpeza e rebarbação** Completada a solidificação das peças no interior dos moldes, procede-se às operações de desmoldagem, corte de canais, limpeza e rebarbação.

No caso da fundição em areia, a qual é quase totalmente reaproveitada, as fundições bem equipadas dispõem de maquinário de desmoldagem especial.

A desmoldagem tem por finalidade separar a areia das peças solidificadas, que, freqüentemente, estão ainda muito quentes.

Em linhas gerais, o equipamento de desmoldagem consiste em um *desmoldador* em grade, dotado de movimento vibratório. A areia separada cai sobre *transportadores* de correia, por exemplo, e é levada a silos, de modo a ser reaproveitada.

No percurso de transporte aos silos, *polias magnéticas* separam pedaços de canais, rebarbas ou qualquer outro resíduo metálico. A areia, livre desses resíduos, é levada por *elevadores de caneca* a um *siló de estocagem*, a partir do qual se procede à sua recuperação, mediante operações de peneiramento, correção do teor de aglomerante, adição de água e mistura final.

As peças são, a seguir, transportadas para a Seção de Limpeza e Rebarbação.

A *limpeza* compreende as seguintes etapas<sup>(14)</sup>:

- *limpeza grosseira*, para remoção de canais e alimentadores
- *limpeza da superfície*, interna e externa das peças fundidas

A *limpeza grosseira* é feita de diversos modos, dependendo principalmente do tipo de liga fundida. Em alumínio, magnésio e suas ligas, os cortes de canais são feitos com serras de fita, no caso de peças grandes, ou manualmente, em peças pequenas.

Para cobre, bronze e latão, utilizam-se serras de fita ou discos de corte de óxido de alumínio.

No caso do ferro fundido, que é uma liga frágil, a extração de canais e alimentadores pode ser feita por percussão com martelo ou marreta, desde que se corte ligeiramente o canal, no ponto onde se deseja removê-lo, por intermédio de um rebolo de corte.

Canais grandes exigem corte por discos de corte de óxido de alumínio ou serras de fita.

Os canais podem ainda ser removidos utilizando-se maçarico de oxiacetileno.

Os mesmos processos, preferivelmente o maçarico de oxiacetileno, são empregados no corte de canais de peças de aço.

A *limpeza da superfície* é feita principalmente mediante o emprego dos chamados *jatos de areia*. Nestes aparelhos, uma substância abrasiva, em grãos, é arremessada sob pressão de encontro à superfície das peças. As peças são colocadas no interior de câmaras, de pequena ou grande dimensão, dependendo das peças a limpar.

Nos jatos de areia menores, o operador manuseia as mangueiras que formam o jato abrasivo, colocando mãos e braços, devidamente protegidos, no interior da câmara e observando o trabalho através de um visor.

Nos jatos de areia maiores, o operador, inteiramente protegido, penetra na própria câmara de limpeza, onde executa o serviço.

Outro processo de limpeza da superfície corresponde ao *tamboreamento*. O equipamento consiste num recipiente cilíndrico de chapa grossa que opera horizontalmente, com movimento de rotação de 25 a 50 rpm.

Em geral, o cilindro ou tambor é carregado até ser ocupado no máximo 70% do seu volume disponível. Peças em forma de estrela são colocadas juntamente com as peças fundidas, para facilitar sua limpeza e promover um polimento superficial.

A limpeza das peças fundidas, sobretudo para remover machos e areia em peças de grandes dimensões, pode ser realizada mediante um jato d'água de alta pressão, com ou sem mistura de areia.

A *rebarbação* tem por fim remover as rebarbas e outras protuberâncias metálicas em excesso na peça fundida. A rebarbação é feita geralmente após o corte dos canais e alimentadores e após a limpeza por jato abrasivo.

Para esse fim, são utilizados *marteleto pneumáticos* e *esmerilhagem*. O marteleto pneumático efetua a primeira operação de rebarbação, pela remoção do excesso de material.

Em seguida, as peças são esmerilhadas para eliminar qualquer excesso de metal ainda existente e produzir a superfície acabada da peça fundida.

Os tipos usados de esmeril são de bancada ou fixos, portáteis e suspensos. Estes últimos são empregados para peças de grande porte.



O tipo de abrasivo do rebolo depende da liga a ser esmerilhada:

- para ferro fundido cinzento e latão, o abrasivo recomendado é de carbureto de silício;
- para aço, óxido de alumínio;
- para alumínio e ferro fundido maleável, carbureto de silício.

**6 Controle de qualidade de peças fundidas** A inspeção de peças fundidas — como de peças produzidas por qualquer outro processo metalúrgico — tem dois objetivos:

- rejeitar as peças defeituosas;
- preservar a qualidade das matérias-primas utilizadas na fundição e a sua mão-de-obra.

O controle de qualidade compreende as seguintes etapas<sup>(15)</sup>:

**6.1 Inspeção visual** para detectar defeitos visíveis, resultantes das operações de moldagem, confecção e colocação dos machos, de vazamento e limpeza;

**6.2 Inspeção dimensional** a qual é realizada geralmente em pequenos lotes produzidos antes que toda a série de peças seja fundida;

**6.3 Inspeção metalúrgica** que inclui análise química; exame metalográfico, para observação da microestrutura do material; ensaios mecânicos, para determinação de suas propriedades mecânicas, ensaios não-destrutivos, para verificar se os fundidos são totalmente sãos.

Muitas vezes, uma inspeção, para ser completa, exige testes de uma montagem, onde são incluídas as peças fundidas e onde se simulam ou duplicam as condições esperadas em serviço.

**7 Conclusões** O processo de fundição por gravidade, em areia, é o mais generalizado, pois peças de todas as dimensões e formas — exceto as mais complexas — e praticamente de qualquer metal podem ser fundidas em areia.

A fundição em moldes metálicos produz uma contração muito rápida que, em algumas ligas de menor resistência mecânica, pode resultar em fissuras. Por outro lado, certas ligas apresentam temperaturas de fusão que podem danificar os moldes metálicos. Entretanto, a fundição em moldes metálicos dá origem a peças com melhor acabamento superficial, dentro de tolerâncias dimensionais mais estreitas, com seções mais finas e exigem menos usinagem que as fundidas em areia.

A Tabela 5<sup>(9)</sup> apresenta, em linhas gerais, uma comparação de alguns de alguns processos de fundição.

TABELA 5  
COMPARAÇÃO DE ALGUNS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

Fator	Fundição em areia	Fundição em molde permanente	Fundição sob pressão	Fundição por centrifugação
Metal processado	Todos	Ferros fundidos e não-ferrosos	Não-ferrosos de baixo ponto de fusão	Todos
Dimensões comerciais mín. - máx.	As maiores	0,5 kg a cerca de 150 kg	Diminutas a 35 kg em Al, a 150 kg em Zn	Acima de 25 t
Espessura mín., mm	3,2 - 4,7	3,2	0,8 - 1,6	1,6
Resist. à tração *kgf/mm <sup>2</sup>	13	16	19,5	17,5
Ordem de produção** (Peças por hora)	10 - 15	40 - 60	120 - 150	30 - 50
Custo do molde ou modelo***	100	660	1650	500

\* Para uma liga de alumínio, como exemplo.

\*\* Produção estimada para uma peça fundida de alumínio de cerca de 1,5 kg de peso e moderada complexidade.

\*\*\* Tomando como base 100 para fundição em areia.

## CAPÍTULO II

### PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA - LAMINAÇÃO

**1 Introdução** A conformação mecânica para a produção de peças metálicas inclui um grande número de processos que, entretanto, em função dos tipos de esforços aplicados, podem ser classificados em apenas algumas categorias, a saber<sup>(16)</sup>:

- processos de compressão direta
- processos de compressão indireta
- processos de tração
- processos de dobramento
- processos de cisalhamento.

A Figura 32 apresenta exemplos típicos dessas categorias: os processos de laminação e forjamento são de "compressão direta"; trefilação de fios e tubos, extrusão e estampagem profunda são processos de "compressão indireta", porque embora as forças aplicadas sejam freqüentemente de tração ou compressão, a reação da peça com a matriz produz elevadas forças indiretas de compressão.

O *tracionamento* de chapas serve de exemplo do processo de conformação mecânica tipo tração; nele, uma chapa metálica é envolvida em torno do contorno de uma matriz, pela aplicação de esforços de tração. O *dobramento* envolve a aplicação de momentos de dobramento na chapa e o *cisalhamento* envolve a aplicação de esforços de cisalhamento que levam à ruptura ou corte do metal.