



Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia

Gloria de Almeida Santos

COPPELURJ

FUNDIÇÃO:

Mercado, Processos e Metalurgia

Gloria de Almeida Soares

ABRIL DE 2000

DADOS DA AUTORA

Professora Adjunta da Escola de Engenharia e da COPPE leciona a disciplina de Fundição desde 1981, quando foi contratada. Foi também Professora Conferencista dessa disciplina no Instituto Militar de Engenharia em 1983. Obteve seu título de D.Sc. em 1990 com tese que versava sobre Aços Fundidos para a Indústria Petroquímica. Possui mais de 60 trabalhos publicados e na área didática acumula experiência de ensino como professora de 1^o e 3^o grau e como Coordenadora do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EE, por mais de 4 anos.

*Aos que me garantem energia
para viver e lutar:
Cláudio,
Bruno, Viviane
e Ana Clara.*

Aos meus alunos

PREFÁCIO

Qual o propósito deste caderno didático? Como responsável pela disciplina de Fundição desde 1981, me deparei com a falta de bibliografia adequada. Existem bons livros em outras línguas, abordando, entretanto, outras realidades. Existem boas publicações a nível nacional, porém normalmente restritas a assuntos específicos. Ao longo desses anos fui sentindo cada vez mais a necessidade de encontrar alguma publicação que preenchesse essa lacuna: dar uma visão geral do que é a fundição, seu mercado e a base da sua tecnologia, sem entrar pelos inúmeros detalhes técnicos que se tornam, em pouquíssimo tempo, obsoletos. Não me considero especialista no tema, mas o acompanhamento dos alunos a visitas técnicas, a participação em congressos e a leitura de revistas especializadas me deu uma certa vivência do que é hoje o mercado de fundição no Brasil e como ele se confronta com os demais processos de fabricação.

Assim, sem pretender que este caderno didático seja definitivo e completo, me atrevi a passar para o papel um pouco do que eu li e vivi, acreditando que este trabalho possa ajudar aos alunos - metalúrgicos ou não - a vencer de forma mais tranqüila e agradável esse tema.

Dos eventuais leitores - alunos ou profissionais - espero contribuições no sentido de corrigir e aperfeiçoar este trabalho.

a autora

ÍNDICE

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	01
	I.1 - BASE DOS PROCESSOS	01
	I.2 - ORGANIZAÇÃO DA FUNDIÇÃO	02
	I.3 - PARQUE BRASILEIRO	03
CAPÍTULO II	FUNDIÇÃO EM AREIA	07
07	II.1 - INTRODUÇÃO	
	II.2 - MODELAÇÃO	07
	II.3 - AREIAS DE MOLDAGEM	16
	II.4 - PROCESSOS DE FUNDIÇÃO EM AREIA	29
	II.5 - MECANIZAÇÃO	33
CAPÍTULO III	OUTROS PROCESSOS	38
39	III.1 - FUNDIÇÃO DE PRECISÃO	
	III.2 - CENTRIFUGAÇÃO	42
42	III.3 - FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO	
	III.4 - PROCESSOS HÍBRIDOS	44
46	III.5 - CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO PROCESSO	
CAPÍTULO IV	TÉCNICAS DE FUSÃO	48
	IV.1 - FORNOS	48
	IV.2 - ROTINAS DE FUSÃO	62
CAPÍTULO V	SOLIDIFICAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE PEÇAS	77
	V.1 - SOLIDIFICAÇÃO	77
	IV.2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR	
81		

87
100

IV.3 - SISTEMA DE MASSALOTES
IV.4 - SISTEMA DE CANAIS

CAPÍTULO V	ACABAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE	108
	V.1 - ACABAMENTO E INSPEÇÃO	108
	V.2 - DEFEITOS	111
	V.3 - PROJETO	115
CAPÍTULO VI	BIBLIOGRAFIA	118

I - INTRODUÇÃO

"A fundição não encontra paralelo com outros processos de conformação pelo fato de que, em muitos casos, é o método mais simples e econômico e, em outros, o único método tecnicamente viável de se obter uma determinada forma sólida" (V. Kondik)

Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (ex.: sinos, âncoras, tubulações, implantes ortopédicos, bloco de motor, miniaturas); peças de extrema responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial (palhetas de turbina, por exemplo) e peças banais (bueiros, bancos de jardim). A produção pode ser unitária (jóias, implantes e peças artísticas) ou seriada, voltada principalmente para as indústrias mecânica e automobilística. É lógico que toda essa variedade é obtida não com um único processo e sim escolhendo-se - dentre os processos disponíveis - o que melhor se adapta às exigências do cliente e produz o lote encomendado com o mínimo custo dentro do prazo estipulado.

I.1 - BASE DOS PROCESSOS

O metal líquido é vazado num *molde*, cuja cavidade corresponde ao negativo da peça que se deseja obter. Para se construir um molde em areia é necessário primeiramente se fabricar o *modelo* (adaptação do desenho da peça) e os *machos*, caso existam furos ou partes ocas. Numa primeira abordagem podemos dizer que o modelo é fabricado em *madeira* e o molde e o macho em *areia*. Dessa forma, a partir de **um** modelo podemos fabricar **n** moldes, cada molde dando origem a uma peça fundida. Paralelamente à fabricação do molde, o metal é convenientemente fundido. Após vazamento e solidificação, a peça é retirada do molde, com forma próxima à final precisando apenas passar pelas etapas de acabamento: corte de canais; rebarbação;

usinagem; tratamento térmico e soldagem (opcionais); controle de qualidade final e expedição. Mais a frente serão mencionados outros tipos de modelos e de moldes. A Figura I.1, abaixo, esquematiza as etapas de fabricação de um molde em areia.

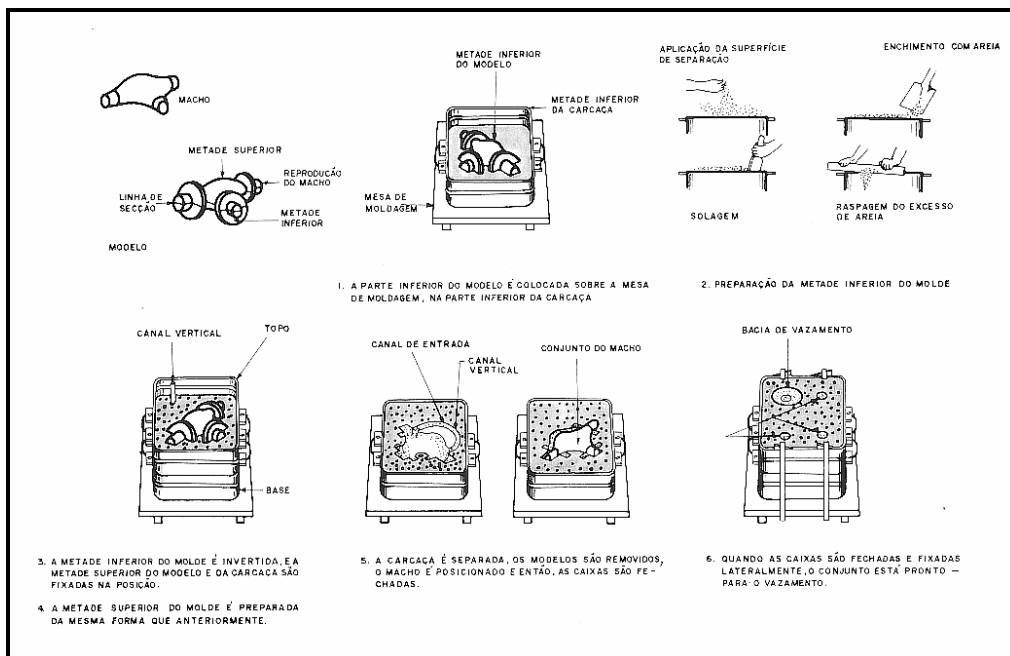


Figura I.1 - Etapas para Produção Manual de um Molde em Areia.

Fonte: *Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas*

I.2 - ORGANIZAÇÃO DA FUNDIÇÃO

Normalmente a fundição se organiza em torno da moldação, pois é nesta seção que se define a quantidade de metal a fundir; machos a produzir, etc. Entretanto, quando a fundição está trabalhando bem abaixo da sua capacidade instalada o centro organizador da mesma se desloca da moldação para a seção de fusão. Este procedimento permite economizar energia, através da concentração da fusão da carga metálica em deter-

minados dias da semana, minimizando assim o custo das peças fundidas, além de aumentar a vida dos refratários. Neste esquema de produção, a fabricação de moldes e machos é feita de forma a atender ao planejamento das seções de fusão e vazamento.

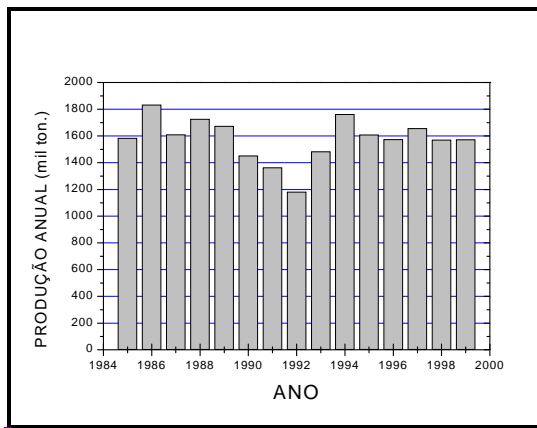
I.3 - PARQUE BRASILEIRO

Na década de 70 a produção brasileira de peças fundidas correspondia a, aproximadamente, 10% da produção brasileira de aço bruto. Entretanto diversas crises, em especial a crise do petróleo, atingiram em cheio a indústria de fundição que despencou do patamar histórico de 1,7-1,8 milhões de toneladas/ano para aproximadamente 1 milhão em 1983, auge da crise no Brasil. A partir de então houve uma sucessão de retomadas e crises - como mostra o gráfico da Figura I.2 - fruto da instabilidade política por que tem passado o Brasil. Somente em 1994 a produção retomou os valores obtidos em 80 e 86 e o ano de 1999 acabou fechando com uma produção inferior a 1600 mil ton. de peças acabadas, que corresponde a cerca de 6,3% da produção de aço bruto.

Excluído: 1997

Excluído: de 1.658

Ainda assim, a participação brasileira a nível mundial tem crescido, com o Brasil ocupando atualmente o 8º lugar, atrás de EUA, CIS, China, Japão, Alemanha, Índia e França. A tendência internacional é de transferir a produção de fundidos para países do terceiro mundo, devido ao, relativamente baixo, custo da mão-de-obra e às regras - menos severas - de controle ambiental vigentes nestes países. Com isto o produtor brasileiro tem investido pesadamente na exportação, que no último ano ultrapassou as 300 mil toneladas e vem representando um grande incentivo à melhoria da qualidade de processos e produtos.



Excluído: <sp>

Figura I.2 - Produção Anual de Peças Fundidas
Fonte: Associação Brasileira de Fundição - ABIFA

Com a perspectiva de crescimento das indústrias automobilística / ferroviária e a recuperação dos setores naval e petroquímico, projetou-se - com excesso de otimismo - para o ano 2001 uma demanda de mais de 2,8 milhões de ton. de peças acabadas, o que ultrapassa a capacidade instalada atual que é de 2 milhões de ton./ano. Para cobrir esse déficit o setor precisaria de investimentos da ordem de US\$ 1.00 / ton. o que geraria cerca de 30.000 novos empregos diretos.

Excluído: projeta-se

A produtividade do setor - que cresceu de 20 ton. / homem.ano na década de 80 para 35,3 em 1996 e 37,5 em 1997 - está se aproximando dos padrões americanos e japoneses que apresentam produtividade anual superior a 40 ton. por empregado.

Em termos de metal mais produzido, o ferro fundido é disparado o primeiro lugar, respondendo por cerca de 86% do total de peças fundidas, seguido pelos não-ferrosos (8,7%) e o aço fundido (5,3%). O setor que mais consome fundidos é o automobilístico / autopeças, absorvendo praticamente 50% do mercado, seguido do siderúrgico e o de bens de capital com \approx 15% cada. Assim a ampliação do parque de fundições a nível interno depende substancialmente do reaquecimento da indústria automotiva no país.

Estima-se a existência de 1000 empresas instaladas no país, embora somente 278 sejam filiadas à ABIFA. Isto significa que ao lado de importantes e conceituadas empresas, convive um grande número de fundições de “fundo de quintal” com, geralmente, administração familiar e grandes problemas tecnológicos. Com o incentivo cada vez maior às exportações só resta dois caminhos para essas empresas: o profissionalismo ou a falência. A Tabela I.1 resume alguns dados desse cadastramento, classificando as fundições por setor de atuação e capacidade instalada.

TABELA I.1 - RESUMO DO PARQUE BRASILEIRO (1997)

CAP. INSTALADA (ton./ano)	FERROSOS	NÃO - FERROSOS	MISTAS
até 600	14	51	15
de 601 a 1.200	25	9	13
de 1.201 a 6.000	41	8	12
de 6.001 a 12.000	7	1	6
de 12.001 a 24.000	17	2	1
de 24.000 a 36.000	2 (TECUMSEH e DZ S.A.)	-	1 (CSN)
de 36.001 a 48.000	--	--	2 (FORD/TAUBATÉ e COSIPA)
de 48.001 a 60.000	--	--	--
acima de 60.000	5 (TUPY; GEN. MOTORS; COFAP; TEKSID; ANÉIS WORKSHOP)	--	1 (METAL. MOGI)
TOTAL	159	75	23

Fonte: Fundição e Matérias Primas (ABIFA)

A produção de peças fundidas começa com a seleção do processo de fundição, o detalhamento do projeto e a especificação dos materiais. Uma vez que todas essas etapas tenham sido vencidas, pode-se então partir para a fabricação de um lote de peças-teste, que se aprovado dará início a produção em larga escala.

O fluxograma da Figura I.1 apresenta, de forma esquemática, as atividades envolvidas na seqüência de produção de peças fundidas em moldes de areia. Todos esses assuntos serão abordados nesta apostila - dividida em seis capítulos, mas não

necessariamente na ordem em que aparecem no fluxograma, uma vez que certos assuntos pressupõem conhecimentos prévios.

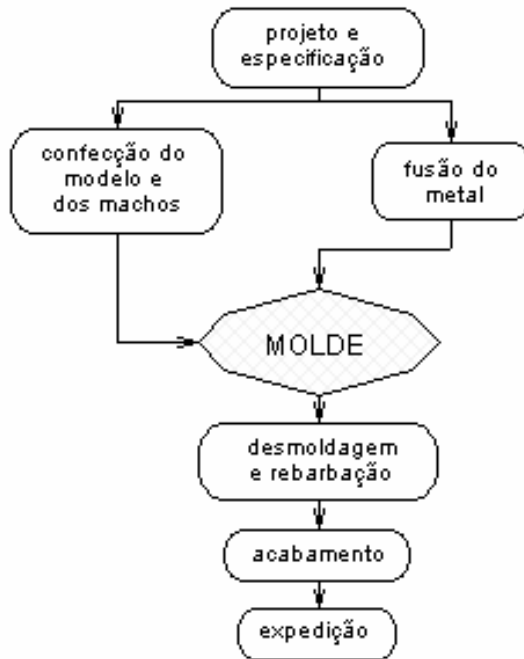


Figura I.3 - Fluxograma da Produção de Peças Fundidas
Fonte: Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas

II- FUNDIÇÃO EM AREIA

"O processo de moldagem em areia ainda é o mais empregado devido à sua versatilidade e economia"

II.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo se dedica a discutir os aspectos relacionados com a fabricação de moldes que utilizam areia como matéria prima, enquanto que os demais processos serão abordados no Capítulo III

II.2 - MODELAÇÃO: Fabricação de Modelos e de Caixas de Macho

"A qualidade da peça fundida depende, antes de mais nada da qualidade e precisão com que o modelo é fabricado"

A modelação é um setor opcional da fundição, uma vez que essa pode contratar serviços de empresa especializada. Isto por que o modelador - ao aliar a capacidade de trabalhar a madeira e/ou o metal, com o conhecimento da tecnologia de fundição - se torna um dos profissionais mais caros dentro da fundição. Entretanto, mesmo que a fundição opte por contratar serviços de terceiros para a confecção de modelos e de caixas de macho, é necessário que a mesma disponha de um mínimo de infra-estrutura para manutenção e reparo desses componentes.

II.1.1 - MATERIAIS

Tradicionalmente são utilizados para modelos e caixas de macho materiais como madeira (cedro, pinho e compensado, entre outros), metais (alumínio e aço, principalmente) e resinas do tipo epóxi (podem ser reforçadas com pó de alumínio, por ex.). Estes materiais diferem entre si quanto ao acabamento e a durabilidade que conferirão ao mo-

delo. O tempo de vida dos mesmos depende da complexidade e do cuidado no armazenamento e manuseio, mas - como uma primeira aproximação - pode-se considerar os valores apresentados na Tabela II.1, para modelos de pequeno porte.

TABELA II.1 - DURABILIDADE MÉDIA DE MODELOS

Material	Nº de Moldes
madeira	200-300
madeira reforçada com metal	até 2000
alumínio ou resina epóxi	até 6000
ferro fundido / aço	até 100.000

Fonte: Metals Handbook, vol. 15

Normalmente os modelos utilizados são do tipo bipartidos (Figura II.1b) que, em relação aos modelos inteiriços (Figura II.1a) apresentam a vantagem de agilizar a moldação, já que o moldador não precisa se preocupar em acertar a posição do modelo com relação à linha divisória das caixas.

Os modelos podem ser maciços (Figura II.2a e II.2b), em esqueleto (Figura II.3a), chapelona (Figura II.3b) ou gabarito (Figura II.3c). Chapelonas são bastante utilizadas na confecção de peças de grande porte com eixo de revolução, como sinos (Figura II.4) e hélices de navios. A opção por modelos e caixas de macho não-maciços pode levar a uma economia de material e de tempo de execução do modelo, barateando-os.

Outra forma de classificar os modelos se refere ao fato deles serem individuais (modelos soltos com marcações de macho e tolerâncias, bipartidos ou não) ou placa-modelo - modelos montados em placa, onde são também fixados os canais de alimentação - , sendo este último tipo utilizado principalmente na moldagem mecanizada.

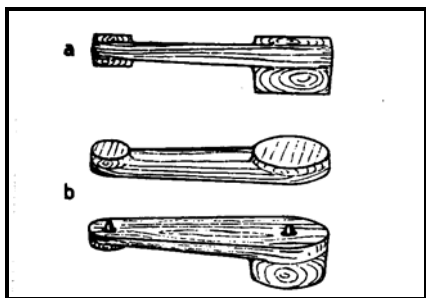


Figura II.1 - Modelo Inteiro e Bi-partido
Fonte: Tecnologia de la Fundicion

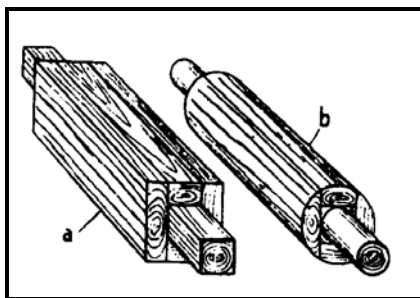


Figura II.2 - Modelo Maciço
Fonte: Ibidem

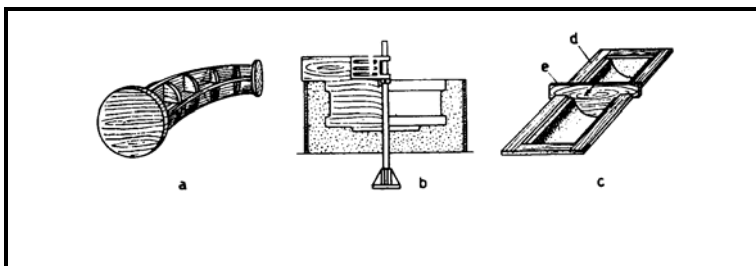


Figura II.3 - Esqueleto (a), Chapelona (b) e Gabarito (c)
Fonte: Ibidem

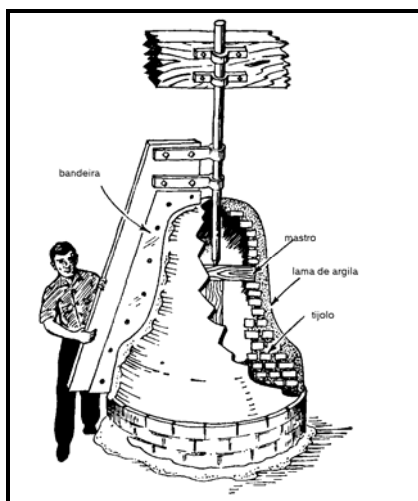


Figura II.4 - Moldagem de um Sino
Fonte: Foundry Engineering

II.1.2 - CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DO MATERIAL

Em primeiro lugar é preciso saber se o processo de moldagem selecionado apresenta alguma exigência em termos da fabricação do modelo. Por exemplo, o processo “shell” (em casca) - por trabalhar com modelo pré-aquecido - exige que o mesmo seja confeccionado numa liga metálica. Caso não haja restrição quanto ao material do modelo, a escolha dependerá basicamente do lote de peças a fabricar, da tolerância dimensional e acabamento requeridos para a peça fundida. É preciso lembrar que o custo de um (ou mais) modelo(s) se diluirá por todo o lote encomendado e assim a durabilidade do modelo escolhido deve ser compatível com o número de peças a fabricar. Exemplificando melhor: no caso do processo shell, a exigência do modelo metálico faz com que o processo somente seja viável economicamente para grandes encomendas.

II.1.3 - OBSERVAÇÕES NA CONSTRUÇÃO DE MODELOS

A. Partição do Molde:

O fato de um dado modelo não apresentar eixo de simetria significa que ele pode ser posicionado no molde de seis formas diferentes. Da escolha desse posicionamento em relação ao plano de partição do molde (normalmente horizontal) depende o número de machos a fabricar, a complexidade destes e eventuais rebarbas difíceis de se retirar. A extração do modelo também pode ser dificultada pela má escolha da posição de peça em relação à caixa, como mostra de forma esquemática as Figura II.5a e II.5b, sendo a II.5c a posição considerada correta, para o exemplo em questão. Em peças simples costuma-se fazer coincidir a maior área projetada com o plano entre caixas.

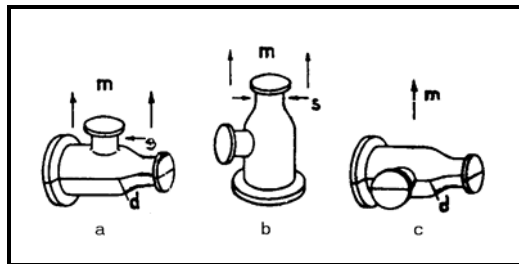


Figura II.5 - Opções de Posicionamento do Modelo no Molde
Fonte: Tecnologia de la Fundicion

B. Sobre-espessura de Usinagem:

O desenho da peça deve indicar o tipo de trabalho mecânico a ser realizado na superfície da mesma, furos a serem feitos pós-fundição, etc. e no projeto da peça fundida deve haver um acréscimo de medidas correspondente ao que será removido. Superdimensionar o projeto também deve ser evitado pois aumenta o custo de acabamento da peça. Os acréscimos de sobremetal dependem do metal, da espessura da peça e da posição da superfície: superfícies superiores exigem maior sobremetal, uma vez que diversos defeitos tendem a se posicionar nas cotas superiores do molde. A Tabela II.2 apresenta valores típicos para moldagem em areia verde.

C. Contração:

Praticamente todos os metais empregados em fundição se contraem durante o resfriamento. Após a solidificação da peça esta contração será responsável pela alteração das medidas originais do projeto, podendo também responder pelo trincamento da mesma. A Tabela II.3 apresenta valores típicos de contração no estado sólido para vários metais.

TABELA II.2 - SOBREMÉTAL PARA USINAGEM

Espessura aproximada da peça (mm)	Acréscimo médio na superfície do modelo (mm)		
	Aço	ferro fundido	não-ferrosos
até 150	3,2	2,4	1,6
de 150 a 300	4,8	3,2	1,6
de 300 a 500	6,4	4,0	2,4
de 500 a 900	6,4	4,8	3,2
de 900 a 1500	6,4	4,8	3,2

Fonte: Metals Handbook, vol. 15

Assim o dimensionamento do modelo deve considerar que haverá contração e a forma mais simples de fazer isto é empregar réguas métricas corrigidas - uma para cada tipo de metal -, supondo que a contração seja linear (na verdade é volumétrica e depende de diversos fatores como temperatura do metal, restrição à contração, etc.). Isto, a princípio, não garante que as dimensões finais da peça estarão dentro das especificações de projeto. Entretanto, para cada lote encomendado, costuma-se fundir primeiro duas ou três peças para, entre outros aspectos, proceder à análise dimensional e corrigir o modelo, se for o caso.

TABELA II.3 - VALORES TÍPICOS DE CONTRAÇÃO DOS METAIS

Metal	% linear
aço	2,0
ferro fundido	0,5-1,0
ferro nodular	0,8
alumínio	1,7
latão	1,3-1,6
zinco	2,6

Fonte: Padrões de Fabricação para Aços Fundidos

D. Ângulo de Saída:

É o ângulo de 1 a 2° utilizado na fabricação do modelo de forma a permitir sua extração do molde sem danificá-lo, como esquematizado na Figura II.6. Dada a necessidade do modelo ser extraído de dentro do molde recorre-se - às vezes - a caixas com 3 ou mais andares, a modelos com partes desmontáveis ou à utilização de machos de parede.

E. Pintura:

O modelo e a caixa de macho costumam ser pintados para proteger a superfície dos mesmos da erosão pela areia, sendo que as cores empregadas obedecem a um código pré-estabelecido: vermelho (ferro fundido); azul (aço); verde (alumínio); amarelo (cobre) e preto (para marcação de macho).

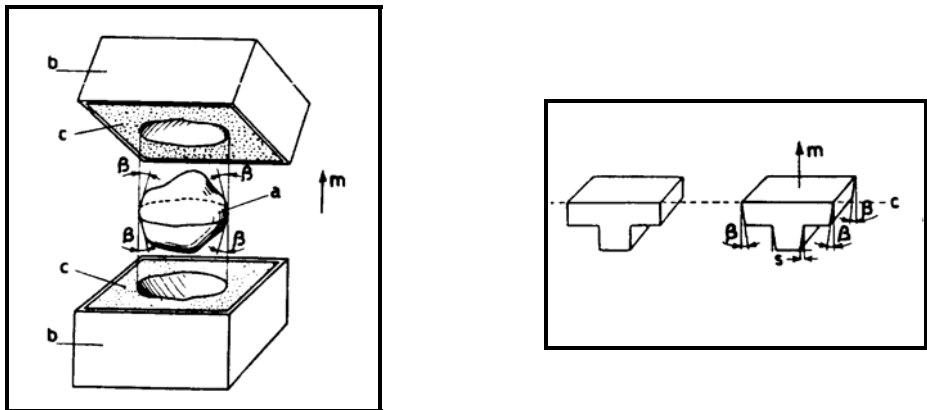


Figura II.6 - Ângulo de Saída (β)
Fonte: Tecnologia de la Fundicion

F. Utilização de Materiais Diversos:

É bastante comum o emprego de mais de um material na confecção de modelos e de caixas de macho. Como exemplo podemos citar a utilização do alumínio e da resina epóxi como reforço de modelos em madeira em áreas onde o desgaste é mais acentuado. Também é possível adicionar pós metálicos às resinas, formando um compósito de maior resistência.

G. Número de Peças por Molde:

As caixas de moldagem tem tamanhos variados e a forma de se aumentar o rendimento metálico é colocar numa caixa o maior número possível de modelos. Com isto se economiza areia e metal já que um canal de alimentação servirá a várias peças. Assim quando se diz que um modelo dá origem a uma peça, entenda-se que normalmente se está pensando num conjunto de modelos que darão origem a um molde e, assim, a várias peças. No caso de fundição de precisão, que de maneira geral se destina a fabricar peças de pequeno porte pode-se ter um modelo composto de até uma centena de modelos individuais.

II.1.4 - MANUTENÇÃO E ESTOCAGEM

Deve ser tomado todo o cuidado com os modelos e caixas de macho durante o armazenamento e manuseio pois a madeira é dada a empenos e a ser atacada por cupins. Os modelos metálicos também podem sofrer com a ação do tempo se não forem convenientemente estocados. Estes componentes recebem um número de identificação que permite sua recuperação e adaptação para novos empregos. Ocasionalmente o cliente é possuidor do seu modelo, cabendo à fundição unicamente produzir o molde e vaziar o metal, mas esta pratica não é aconselhável pois o projeto de fabricação dos modelos e das caixas de macho depende do projeto da peça fundida como um todo.

II.1.5 - PROTOTIPAGEM

Algumas modelações e grandes fundições já estão utilizando a fabricação de protótipos como forma de avaliar - de forma rápida - detalhes construtivos dos modelos e matrizes. A prototipagem rápida - que produz objetos sólidos a partir da informação tridimensional proveniente de um sistema CAD - foi desenvolvida no final da década de 80 com o processo de estereolitografia que consiste na solidificação de uma resina foto-sensível por um raio laser de luz ultra-violeta. Mais recentemente foram desenvolvidos novos métodos como o Modelamento Multijateado que funciona como uma impressora tridimensional utilizando resina no lugar de tinta, sendo que o cabeçote deposita material camada a camada. Algumas máquinas trabalham também com extrusão de plásticos do tipo ABS.

A prototipagem - que está sendo empregada também na própria concepção da peça fundida - ainda encontra resistência entre usuários dado ao elevado custo desta tecnologia e restrições quanto ao tamanho do protótipo e à necessidade de pessoal especializado em informática. No entanto erros de projeto podem ser evitados e como o tempo de fabricação de um protótipo é bastante inferior ao de produção do ferramental definitivo, a economia pode ser significativa, compensando o investimento inicial.

II.3 - AREIAS DE MOLDAGEM

“Areias e aglomerantes devem ser criteriosamente escolhidos para garantir a reprodutibilidade das propriedades dos moldes”

Areia de Moldagem é um sistema heterogêneo constituído essencialmente de um elemento granular refratário (normalmente areia silicosa), um - ou mais - aglomerantes e um plastificante (água). Alternativamente a água pode ser suprimida se o aglomerante utilizado for líquido.

A areia de moldagem deve apresentar elevada refratariedade, boa resistência mecânica, permeabilidade adequada e plasticidade (ou moldabilidade). Já da areia destinada à fabricação de machos espera-se, além dos requisitos exigidos para a areia de moldagem, boa colapsibilidade, definida como a perda de resistência da areia após o início da solidificação da peça.

II.3.1 - CLASSIFICAÇÃO

- ◆ quanto à origem: natural; semi-sintética ou sintética. Apesar de já estar "pronta" a areia natural tem sido pouco utilizada dada as suas baixas propriedades.
- ◆ quanto ao uso: nova ou reciclada. Fundição de areia-verde que trabalhe basicamente com areia usada (reciclada) utiliza cerca de 10% de areia nova para recompor as perdas durante a reciclagem e manter as propriedades da areia estáveis. Na areia reciclada são adicionadas também pequenas quantidades de aglomerantes e água.
- ◆ quanto ao emprego: areia de moldagem (faceamento ou enchimento) e areia de macho.
- ◆ quanto ao estado de umidade: úmida (verde) ou seca (estufada).

II.3.2 - COMPONENTES

A. Areia-base:

A areia-base é uma areia refratária, normalmente silicosa, sendo que se for originária de areia de praia deve ser lavada previamente para retirada dos sais. A composição química da areia-base afeta a dilatação térmica da areia, a reatividade com o metal fundido mas, principalmente, a refratariedade do molde. Essa última propriedade é particularmente importante na fundição de aço.

A granulometria da areia-base afeta a permeabilidade da areia e a penetração metálica. Considerando que a distribuição dos grãos seja relativamente estreita, quanto maior for o diâmetro desses mais permeável será a areia (isso é bom pois facilita o escoamento dos gases) porém maior será a penetração metálica, implicando num acabamento "pobre".

Assim existe um compromisso entre estes dois aspectos e a decisão dependerá do metal em questão: ligas de alumínio e magnésio são extremamente fluídas sendo necessário se utilizar areias finas para minimizar a penetração metálica. Já ferrosos tendem a gerar gases, optando-se por areias mais grossas, ou seja, mais permeáveis. A Tabela II.4 apresenta a faixa de granulometria adequada a esses materiais.

TABELA II.4 - ÍNDICE DE FINURA RECOMENDADO

<i>Metal</i>	<i>IF (AFS)</i>
aço fundido	50-90
ferro fundido	80-130
não-ferrosos	90-160

Fonte: Processos Shell: Materiais e Tecnologia

O formato dos grãos de areia podem variar de redondos a angulares, passando pelos semi-angulares. Não há um consenso quanto a geometria ideal para os grãos, com uma leve tendência de preferência para os grãos angulares que promovem uma melhor amarração dos moldes, ou seja, um molde mais denso e menos permeável.

B. Aglomerantes:

São materiais que envolvendo e ligando entre si os grãos conferem à areia, após compactação, secagem ou reação química, as características necessárias ao processo de moldagem, isto é, resistência às solicitações dinâmicas, estáticas e térmicas provocadas pelo metal fundido. Para um dado aglomerante, com o aumento do seu teor aumenta a resistência e a dureza da areia e diminui a permeabilidade, conforme esquematizado na Figura II.7 para areia aglomerada com óleo. Os aglomerantes se subdividem em aglomerantes inorgânicos, orgânicos e sintéticos.

- ♦ aglomerantes inorgânicos: a resistência é atingida através da socagem, sendo que essas substâncias tendem a sinterizar quando em contato com o metal fundido, o que dificulta a desmoldagem. São eles: argila; bentonita - que é um tipo de argila com maior poder aglomerante - e cimento. Argila e/ou bentonita são os aglomerantes clássicos das areias verdes recicláveis, enquanto que o cimento - devido à baixíssima colapsibilidade - praticamente não é mais utilizado.

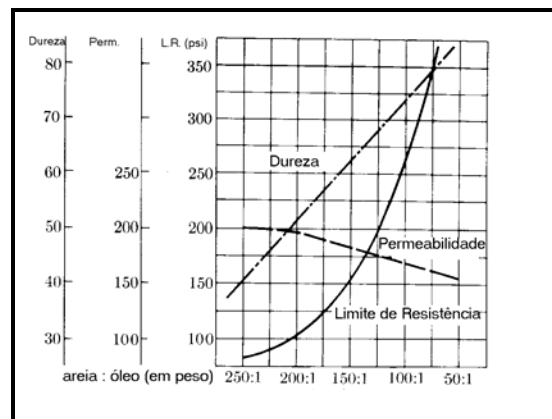


Figura II.7 - Variação da Resistência e Permeabilidade com a Composição da Areia
Fonte: Foundry Technology

- ◆ aglomerantes orgânicos: a resistência é atingida através de uma leve socagem seguida de uma secagem do molde ou macho - já prontos - em estufa, sendo que a resistência final pode ser superior à alcançada com aglomerantes inorgânicos. Como vantagem adicional apresenta também boa colapsibilidade. Com o advento das resinas os aglomerantes orgânicos naturais caíram em desuso. Exemplos: acúcares; melão de cana; amido de milho (maizena); óleos; etc.
- ◆ aglomerantes sintéticos: Existem basicamente duas classes de resinas: as termoendurecíveis (polimerizam pela ação do calor) e as autoendurecíveis (ou de cura a frio). A utilização de resinas como aglomerante cresce dia a dia, pois conferem excelente resistência aliada a uma boa colapsibilidade e capacidade de se fabricar seções finas, compensando o elevado custo desse insumo. Assim, os fundidores dispõem hoje de uma enorme gama de resinas e catalisadores para os mais diversos fins. Um desafio que persiste é a redução da toxidez dessas substâncias.

II.3.3. - AREIAS NÃO-SILICOSAS, ADITIVOS E TINTAS

A. Areias Não-silicosas:

A opção por uma areia-base não-silicosa parte da constatação de que a areia silicosa apresenta - quando comparada com outras composições - inúmeras desvantagens como elevada expansão volumétrica (Figura II.8) e elevada reatividade com o metal fundido. Entretanto, pelo menos em países como o Brasil - com imensas reservas de areia silicosa e grande litoral - fica mais barato se contornar os problemas advindos da utilização de areia silicosa do que substituí-la. Das areias não-silicosas podemos citar a *zirconita*, que seria a areia ideal em termos de propriedades, não fosse pelo alto custo, e a de *cromita* que apresenta maior capacidade de extração de calor do que a areia

comum. Devido a essa característica, algumas vezes, a areia de cromita é empregada como areia de faceamento, quando se pretende acelerar a solidificação.

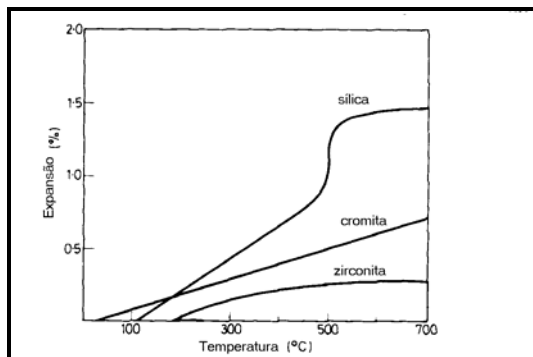


Figura II.8 - Variação Volumétrica de Diversos Tipos de Areia
Fonte: *Ibidem*

Existem duas formas - não-excludentes - de se minimizar os defeitos decorrentes da utilização de areia silicosa: através do emprego de aditivos e pela pintura de moldes e machos.

B. Aditivos:

São substâncias que misturadas à areia de moldagem, em teores inferiores a 1%, modificam suas propriedades, minimizando certos tipos de defeitos.

Exemplo 1: A areia silicosa se expande quando exposta a temperaturas da ordem de 500°C - Figura II.8 - o que pode dar origem a defeitos de expansão. Assim, um aditivo que pretenda minimizar este defeito deve ser queimado para deixar espaço para a expansão da areia. Para este fim pode-se adicionar à areia serragem, pó de madeira ou qualquer outro componente orgânico.

Exemplo 2: A areia silicosa é muito reativa com o metal fundido, em especial com o ferro fundido, comprometendo o acabamento da peça. A reação metal-areia se dá a partir da reação do óxido metálico com a sílica. Assim, um aditivo que gere atmosfera redutora minimiza a oxidação do metal, melhorando o acabamento do fundido. Para tal costuma-se adicionar à areia de ferrosos pó ou moinha de carvão (Carvão Cardiff), conferindo à areia a cor preta característica. Para ligas de magnésio, adiciona-se pó de enxofre à areia.

C. Tintas:

A principal função de uma tinta é a criação de uma camada intermediária entre areia e metal, visando conferir um bom acabamento ao molde ou macho e, por conseguinte, à peça. A tinta é constituída de uma substância refratária (grafite ou zirconita), uma substância aglomerante (bentonita, por ex.) e um solvente (água ou álcool). A pintura pode ser feita por pincel, pistola ou imersão, sendo imprescindível que a camada aplicada seja fina e que o solvente seja totalmente evaporado por ocasião da queima da tinta, evitando que a tinta seja mais uma fonte de defeito na peça fundida.

II.3.4 - ENSAIOS E CONTROLE DAS AREIAS DE MOLDAGEM

Quando se trabalha com areias recicláveis (areia-verde) é importante monitorar periodicamente propriedades da areia como resistência, permeabilidade e teor de umidade, o que significa ter um controle sobre a qualidade dos moldes produzidos. Esses resultados devem ser registrados graficamente para serem consultados quando da ocorrência de defeitos em determinados lotes de peças.

Para medir a resistência da areia utilizam-se equipamentos com acionamento hidráulico e múltiplas opções de ensaios. Normalmente é possível se medir resistência à

compressão (usual); resistência à tração (para areias com elevada resistência); resistência ao cisalhamento e à flexão (mais importante para machos). Com o equipamento denominado permeâmetro mede-se a permeabilidade da areia, que é dada pela quantidade de ar que atravessa longitudinalmente um corpo de prova padrão. Atualmente já existem disponíveis no mercado equipamentos compactos - como o mostrado na Figura II.9 - onde, após a colocação da areia a ser testada, o corpo de prova é compactado e submetido a múltiplos testes como ensaios mecânicos diversos e teste de permeabilidade, entre outros.

Já a medida da umidade da areia pode ser determinada através da perda de massa decorrente da secagem - em estufa ou secador - de uma dada quantidade de areia. Para areias com ligantes orgânicos que poderiam ser evaporados juntamente com a água, pode-se usar o método a frio que consiste na reação da água com Carbureto de Cálcio, gerando gás acetileno. Assim, a quantidade de gás formado é proporcional à umidade da areia e existem dispositivos que indicam esse valor automaticamente.

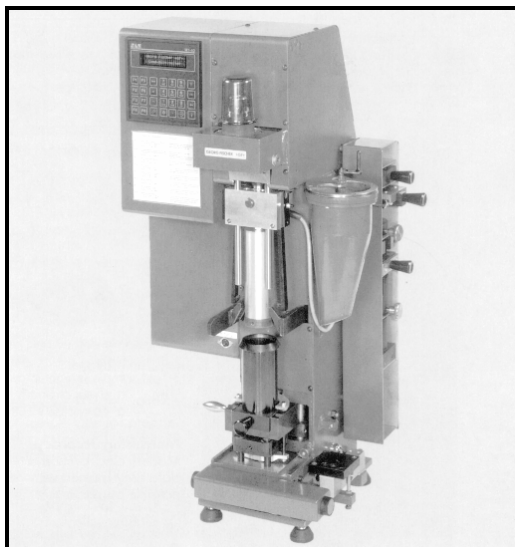


Figura II.9 - Equipamento Multi-Teste para Areias
Fonte: Catálogo George Fischer

Outros ensaios gerais (análise granulométrica da areia, teor de argila da areia base) ou específicos (como fluidez da resina, por exemplo) também podem ser realizados.

Normalmente a areia-base comprada vem acompanhada da composição química média e da análise granulométrica. A granulometria é dada pelo Índice de Finura (IF) que corresponde à média ponderada da massa retida em cada uma das peneiras de uma série padrão. Normalmente se utiliza a série da AFS (American Foundrymen's Society) e a escolha do I.F. depende do metal a ser fundido, como mostrado na Tabela II.4.

II.3.5 - RECICLAGEM E RECUPERAÇÃO DE AREIAS DE MOLDAGEM

A. Reciclagem:

A areia de moldagem a ser reciclada precisa passar por determinadas etapas antes de ser empregada novamente. Isto por que após a desmoldagem a areia se encontra quente, com torrões e partículas metálicas. Assim, a fundição que opte por trabalhar com areia-verde deve possuir instalação de reciclagem da areia, visando a reutilização desta. Para isso são necessários equipamentos de transporte (correias, elevadores, etc.), de armazenamento (silos), peneiras (para eliminar parte dos finos e torrões), separadores magnéticos (para separar partículas ferrosas), etc.

A instalação de Reciclagem pode variar quanto à sofisticação maior ou menor dos equipamentos (por. ex. a desmoldagem pode ser manual - com marreta - ou feita em desmoldadores vibratórios) e no layout, dependendo do pé direito e da área física disponível. A Figura II.10 mostra um fluxograma das etapas principais constantes de uma planta de reciclagem de areia. A etapa de resfriamento de areia é importante,

principalmente, em fundição de aço, pois a cada reciclagem a temperatura da areia vai se elevando.

Ao fim dessas etapas é preciso se adicionar água (para recuperar a umidade inicial) e, às vezes, aglomerantes, o que é feito no misturador. A Figura II.11 mostra uma foto do misturador Simpson que funciona com duas mós e duas pás e na Figura II.12 são apresentadas fotos de outros dois tipos de misturadores. Esses equipamentos são utilizados também no preparo de diversas composições de areias, como areia-silicato, areia-resina, etc. No caso de areias ligadas com resinas de cura a frio a preferência deve recair sobre misturadores contínuos, cuja capacidade seja compatível com a necessidade de areia, já que essa composição não pode ser estocada. A preparação de areias shell é mais complexa: assim a maior parte das fundições opta por comprar a mistura - normalmente denominada de areia coberta - já pronta.



Figura II.10 - Etapas da Reciclagem de Areias

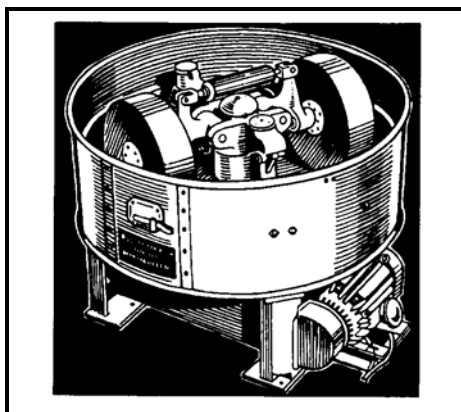


Figura II.11 - Misturador Simpson para Areia de Moldagem
Fonte: Foundry Technology

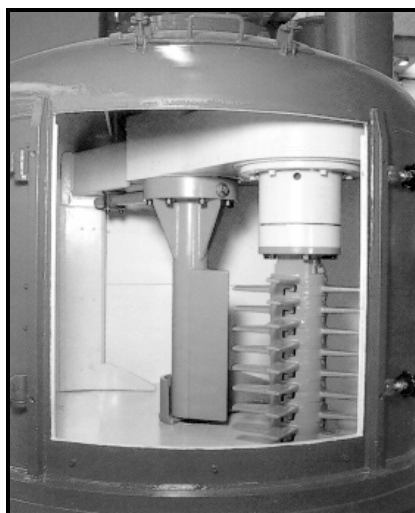
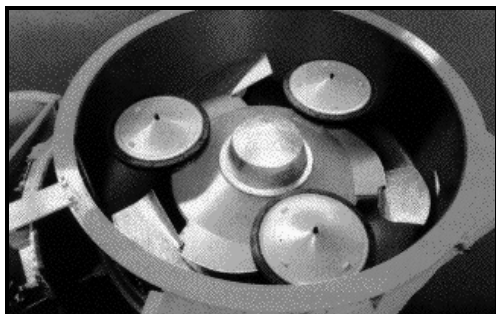


Figura II.12 - Misturador: (a) de Mós Horizontais - *Catálogo Küttner do Brasil* e
(b) tipo Turbina - *Catálogo George Fischer*

B. Recuperação:

Após um número não-determinado de reciclagens a areia pode se encontrar esgotada. Isto é observado através do acompanhamento das propriedades da areia, que tendem a apresentar uma baixa na refratariedade e na permeabilidade. A refratariedade decai em decorrência da formação de camadas sucessivas de aglomerantes ao redor dos grãos de sílica, enquanto que a produção excessiva de finos gerados no socamento do molde e não removidos durante a reciclagem da areia faz decrescer a permeabilidade. Neste momento deve-se optar por trocar toda a areia ou proceder à recuperação da mesma.

O processo de recuperação de areia também pode ser adotado para areias não-recicláveis e consiste em se retirar a camada aglomerante que envolve os grãos da areia e proceder a uma classificação da mesma. Após estas operações a areia é considerada praticamente nova, sendo que o índice de recuperação varia de 50% (processo seco) a praticamente 100% (processo úmido + térmico).

O processo mais simples e barato consiste na retirada do aglomerante, a seco, por atrito entre os grãos, usando-se britador ou células pneumáticas. O processo úmido resulta num rendimento mais elevado, mas o gasto energético é muito alto e a água tem que ser tratada antes do descarte. Por exemplo uma instalação para recuperação de areia de silicato com capacidade de 5 ton./h consome 680 litros de água/min. Em areias com resinas ou aglomerantes orgânicos pode se usar o processo térmico normalmente em combinação com o processo seco ou úmido. A calcinação da areia é feita entre 800 e 1000°C em fornos rotativos - forno com 1m de diâmetro e 4 m de altura pode recuperar 1 ton./h - ou leito fluidizado.

Um fator limitante ao emprego de processos de recuperação de areias é que areias de diferentes composições não podem ser tratadas em conjunto e os "pacotes" de equipamentos para recuperação são caros. Além disso, o baixo custo da areia nova no Brasil contribui para a não-disseminação desses procedimentos. Na prática o que algumas fundições tem feito é a recuperação de alguns tipos de areia através de soluções caseiras, isto é, utilizando fornos ou pequenos britadores desativados.

O tratamento conjunto de areias de diferentes fundições poderia ser um caminho para viabilizar a recuperação dessas areias. Isto seria possível com a criação de pólos - existe um em funcionamento em São Paulo e o projeto de um para o Rio de Janeiro. Assim as empresas participantes do pólo poderiam não só recuperar a areia de forma econômica, como também repartir custos de laboratórios (análise química e ensaios) e centralizar compras de matérias primas.

Como mais uma opção às areias de fundição que não tenham sido recicladas ou recuperadas existe a possibilidade de utilizá-las em novas aplicações, como na produção de concreto, tijolos e asfalto. Devido ao alto custo do descarte de areia que varia de US\$ 20.00 a US\$ 100.00 por ton., em função do tamanho da fundição e de sua localização - custos estes que tenderão a crescer com as novas normas de proteção ambiental - várias empresas estão começando a encarar a areia de fundição como matéria prima ao invés de simples descarte.

II.4 - PROCESSOS DE FUNDIÇÃO EM AREIA

“Em ordem crescente de qualidade do molde ou macho - definida como resistência elevada aliada à capacidade de obtenção de seções finas - temos: areia-verde; silicato de sódio; areia-resina e shell”

Excluído: temos:¶

II.4.1 - DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS MAIS EMPREGADOS

A. Areia-Verde:

Processo bastante empregado por ser simples, versátil e barato; trabalha com areia reciclável e moldagem manual (Figura I.1) ou mecanizada. Entretanto a resistência final não é muito elevada, sendo considerado um molde não-rígido, isto é, capaz de ceder sob a pressão do metal. Na prática isto significa trabalhar com maior sobremetal para acabamento, como forma de garantir as dimensões previstas no projeto e massalotes de maior diâmetro para se evitar os rechupes.

B. Silicato / CO₂ :

O macho ou molde confeccionado com uma areia contendo silicato de sódio como aglomerante é em seguida submetido a uma gasagem com CO₂. A resistência final depende do módulo do silicato - relação SiO₂:Na₂O -, do tempo de gasagem e do tempo de estocagem, sendo que para melhorar a colapsibilidade são adicionados aditivos orgânicos - tais como serragem - à areia de moldagem. A Figura II.13a mostra como a resistência do componente - macho ou molde - varia com o tempo de gasagem e a relação SiO₂:Na₂O e na Figura II.13b pode ser observada a evolução da resistência com o tempo de estocagem, para um silicato com módulo igual a 2. Como normalmente os machos são estocados por um ou mais dias, é preciso levar esse tempo em conta quando da ga-

sagem, a fim de evitar que ocorra queda na resistência durante o armazenamento dos mesmos.

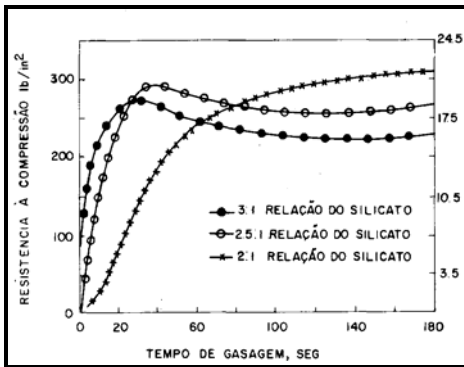


Figura II.13a - Variação da Resistência da Areia com o Módulo do Silicato e o Tempo de Gasagem
 Fonte: Liquid Carbonic

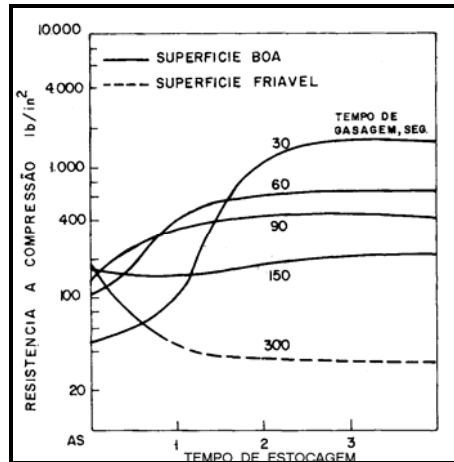


Figura II.13b - Variação da Resistência da Areia com o Tempo de Gasagem e de Estocagem
 Fonte: Ibidem

C. Areia-resina:

Esse grupo engloba a utilização - como aglomerante - de diversos tipos de resinas de cura a frio, em processos denominados Cura a Frio e Cold Box (ou Caixa Fria). O tempo de cura e a resistência final dependem da quantidade de resina (de 1 a 2% e do tipo e quantidade do catalisador (de 20 a 40% do peso de resina). No caso do processo Cold Box o catalisador básico do tipo amina é pulverizado junto a um gás de arraste, polimerizando a resina. Esses processos por dispensarem estufagem e longos tempos de secagem praticamente desativaram processos antigos como areia-seca, areia-cimento, entre outros. Apesar do custo elevado da resina e da possibilidade de algumas gerarem

gases nocivos à peça e à saúde do moldador, a qualidade e a rapidez de obtenção dos moldes ampliou a demanda por machos e moldes obtidos a partir desses processos.

D. Shell moulding (moldagem em casca):

Como resposta aos requisitos crescentes de qualidade tem havido expansão da utilização desse processo. Como exemplo podemos citar a produção de fundidos em ferro nodular em substituição a peças de aço fundido ou forjado, com custo menor. Também muitas das peças fabricadas originalmente em areia-verde são atualmente produzidas pelo processo shell.

A forma mais simples consiste na fabricação de partes do molde com auxílio de recipiente basculante, sob ação da gravidade, como esquematizado na Figura II.14. Neste caso a placa modelo é aquecida (**a**) e posicionada sobre o reservatório (**b**). Com o basculamento do conjunto (**c**) a casca é formada - a espessura desta depende do tempo de contacto e da temperatura da placa - sendo o conjunto novamente basculado (**d**). Resta ainda o aquecimento da casca para completar a cura (**e**) e a ejeção da mesma (**f**).

Todas essas etapas são geralmente mecanizadas, adequando o processo à produção de peças seriadas. A Figura II.15 mostra um molde (aberto) para produção simultânea de 4 peças. Cada molde é composto de duas placas (cascas), normalmente verticais que são acondicionados em caixas preenchidas com areia ou granalha de aço para sustentação dos moldes. Existe uma limitação de peso do fundido, em função da resistência da casca e devido ao alto custo da placa-modelo, o processo só se viabiliza para lotes superiores a 1000 peças.

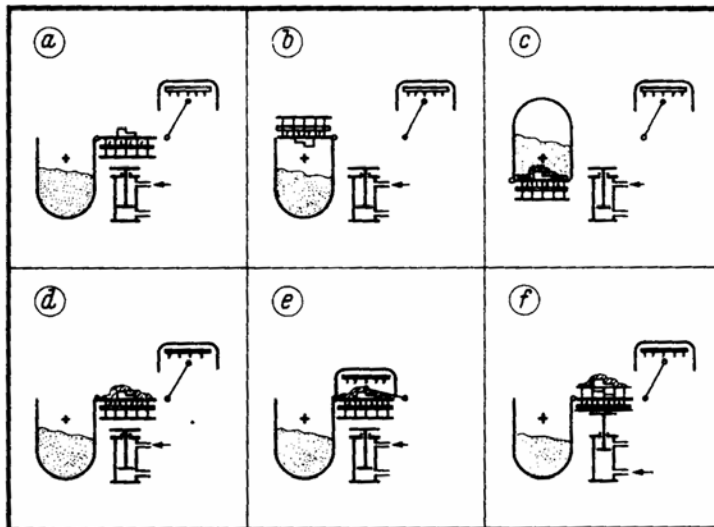


Figura II. 14 - Produção de Moldes Shell em Máquinas de Moldar com Reservatório Basculante por Ação da Gravidade
Fonte: Processo Shell: Materiais e Tecnologia

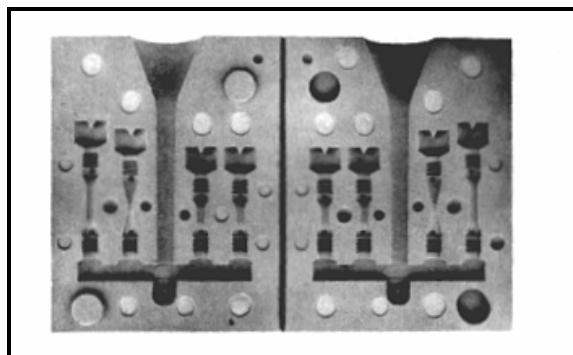


Figura II.15 - Molde Shell Aberto
Fonte: Foundry Technology

II.5 - MECANIZAÇÃO

"Como a fundição organiza sua produção de moldes e machos?"

Por que se compacta a areia? No processo areia-verde a resistência do molde é atingida unicamente através da socagem. Assim, a socagem tem como objetivo aumentar a densidade aparente da areia, até valores da ordem de $1,6 \text{ g/cm}^3$, fazendo com que a resistência e a permeabilidade do molde sejam adequadas (Figura II.16). Nos demais processos, nos quais a resistência é atingida através de reações químicas, a socagem, é feita, apenas, com o intuito de garantir a conformação de todos os detalhes do modelo.

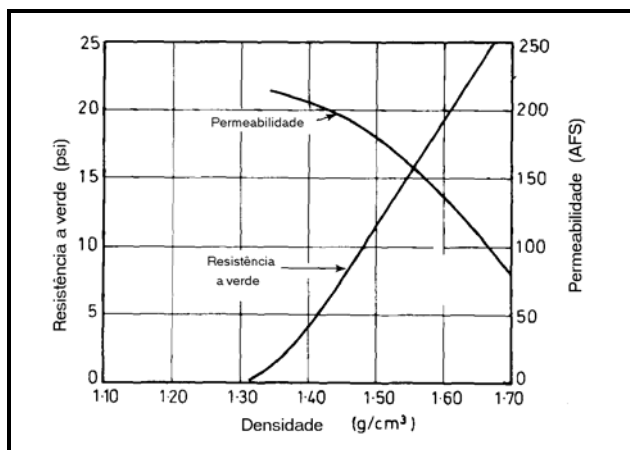


Figura II.16 - Variação da Resistência e Permeabilidade do Molde com sua Densidade
Fonte: *Ibidem*

Normalmente a fundição subdivide sua produção em três grupos fisicamente distintos:

- ◆ GRUPO 1 - moldagem manual de pequenos lotes: um número reduzido de peças encomendadas pode inviabilizar a fabricação de placas-modelo, justificando a moldação manual.
- ◆ GRUPO 2 - moldagem mecanizada e/ou automatizada: em fundição com trabalho seriado a maior parte da "carteira" da mesma deve estar enquadrada nesta categoria, dada à alta produtividade alcançada pelas máquinas compactadoras.
- ◆ GRUPO 3 - moldagem de grandes peças: peças de grande porte, normalmente em encomendas unitárias, não podem ser produzidas através das máquinas de moldar convencionais por extrapolar suas capacidades. Assim a moldagem se fará manualmente ou com auxílio de máquinas de projeção centrífuga, com capacidade de compactar de 200 a 500 kg de areia/min (Figura II.17).

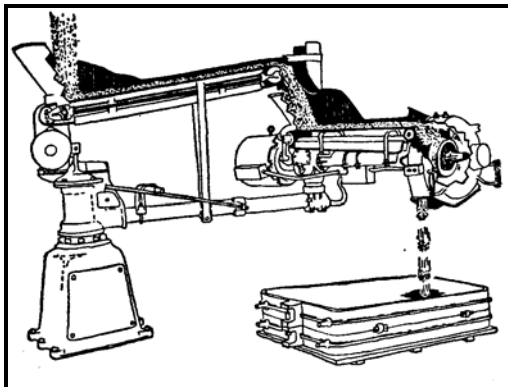


Figura II.17 - Compactação por Projeção Centrífuga
Fonte: Foundry Engineering

Na compactação mecanizada convencional - grupo 2 - temos os seguintes tipos de máquinas: impacto; compressão e impacto + compressão. Quase todas as fundições

trabalham com máquinas do tipo impacto + compressão (Figura II.18), com vistas a equalizar a densidade, e por conseguinte a dureza da areia, embora já sejam produzidas máquinas do tipo alto impacto, em que a compactação é atingida numa única operação de apenas 0,2 segundos, com resultado uniforme.

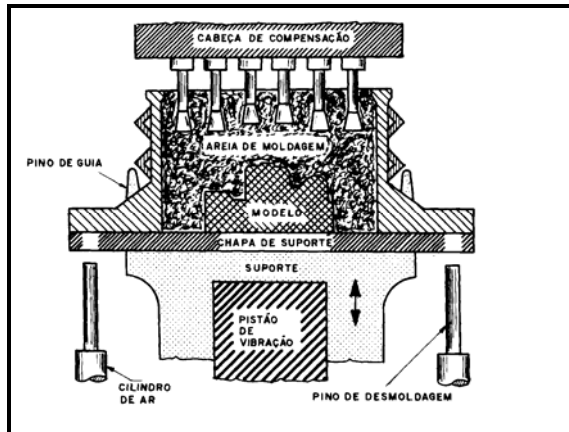


Figura II.18 - Máquina de Socamento por Impacto e Compressão
Fonte: *Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas*

No caso mais comum da fundição trabalhar com placas-modelo simples (de uma face) aloca-se duas máquinas para cada linha de produção, quando uma produz caixas inferiores e a outra produz caixas superiores. Após a compactação, a caixa inferior é invertida, o macho é nela colocado e a caixa superior entra fechando o conjunto, como esquematizado na Figura II. 19 . É possível se trabalhar com uma máquina por linha, mas neste caso a placa-modelo deve ser do tipo duas faces e o manuseio das caixas fica mais difícil.

Linhas automatizadas para a confecção de moldes podem ser empregadas em fundições que trabalham com elevada capacidade de produção. Nesses sistemas, praticamente todas as operações podem ser realizadas automaticamente, alcançando produtividade de até 150 moldes/hora, para moldes pequenos.

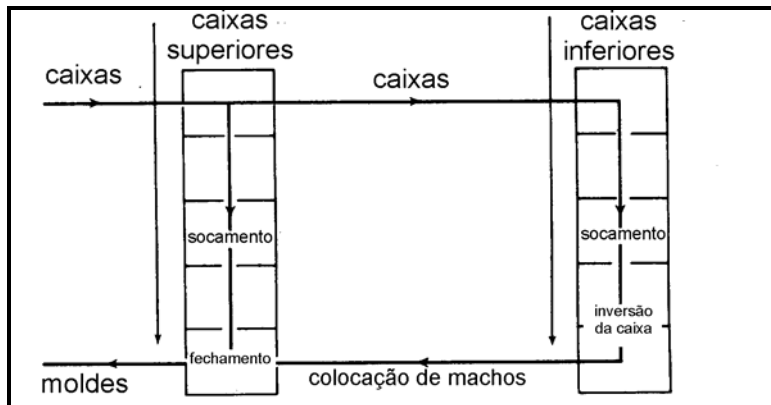


Figura II. 19 - Linha de Moldagem em Paralelo
Fonte: Foundry Technology

Já na fabricação de machos, existe a opção de se adaptar máquinas de moldar à produção de machos ou, melhor ainda, investir em máquinas especialmente projetadas para a fabricação de machos. Neste caso a areia é soprada diretamente nas caixas, em máquinas com capacidade de sopro de até 36 kg e elevada produtividade; trabalham com areias de diversas composições, sendo que a gasagem pode ser feita na própria máquina. A Figura II.20 mostra uma máquina de sopro para a produção de machos de até 5 kg cada e ciclo de 20 s., sendo que na Figura II.21 está esquematizado o ciclo de fechamento da caixa (1); sopro de areia (2); gasagem (3); abertura da caixa (4); retirada do macho (5) e por fim limpeza da caixa (6). Dependendo do peso individual do macho, a cada ciclo podem ser produzidos 4 ou mais machos.

Dos processos de fabricação de machos os mais utilizados tem sido o silicato/CO₂, areia-resina e o shell moulding, que conferem, em ordem crescente, maior resistência, maior capacidade de obtenção de seções finas e geram machos mais caros. Assim, machos mais complexos e de paredes finas são normalmente produzidos por shell moulding.

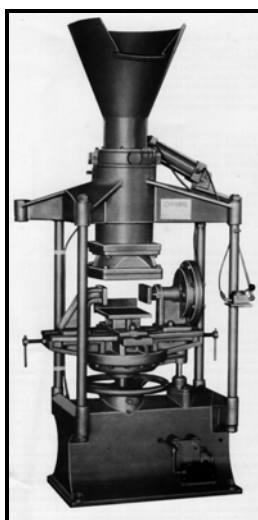


Figura II.20 - Máquina de Soprar Machos
Fonte: Catálogo Mecânica Industrial Vick Ltda

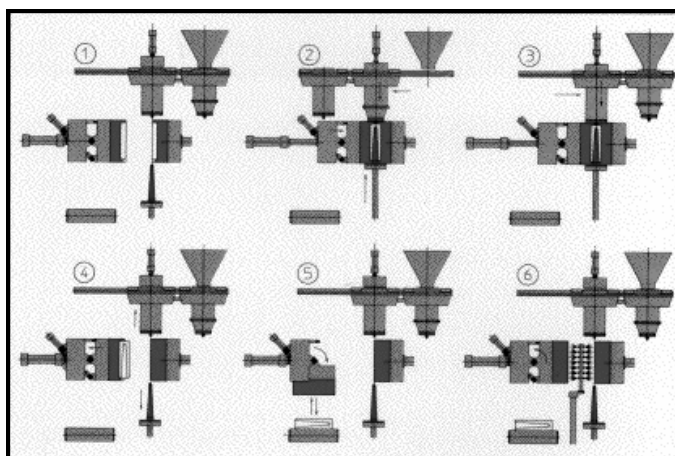


Figura II.21- Ciclo de Fabricação de um Macho
Fonte: Catálogo Loramendi S.A.

III - OUTROS PROCESSOS

"Os processos de moldagem competem entre si e com os demais processos de fabricação"

Os processos discutidos no Capítulo anterior se enquadram no grupo modelo não-perecível em molde perecível apresentados na Tabela III.1 abaixo. Isto significa que o modelo apresenta um tempo de vida que depende do material empregado na sua fabricação, enquanto que a forma do molde é perdida após cada vazamento, podendo o material com que é confeccionado o molde ser - ou não - reaproveitado. Esse grupo pode ser considerado o principal, uma vez que - dada a sua versatilidade e baixo custo - responde pela maior parte da tonelagem de peças produzidas.

Os demais processos listados nessa Tabela são mais - ou menos - intensamente utilizados em função das características que conferem às peças e ao aporte de tecnologia envolvido. Em seguida são dadas algumas características dos processos mais difundidos e dos processos que conjugam fundição e forjamento.

TABELA III.1 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE MOLDAGEM

GRUPO	PROCESSO	MODELO	MOLDE	LIGAS
modelo e molde perecíveis	microfusão	cera ou plástico	pasta cerâmica	quaisquer
	molde cheio	poliestireno	areia fluida	quaisquer
modelo não-perecível; molde perecível	areia-verde silicato areia-resina shell	metálico (shell); madeira, epóxi ou metálico (para os demais)	areia + aglome- rantes + aditivos + água (opcional)	quaisquer
modelo não-perecível; molde semi-permanente	grafite gesso borracha	madeira ou epóxi	grafite gesso borracha	ligas não-ferrosas
molde permanente	molde permanente	dispensável	metal (coquilha)	quaisquer, menos aço
	centrifugação	não existe	metálico	quaisquer
	sob-pressão	dispensável	metal (matriz)	Zn, Al e Mg

Fonte: *Fundamentals of Metal Casting* (adaptação)

III.1 - FUNDIÇÃO DE PRECISÃO (MICROFUSÃO)

Este processo é uma adaptação - relativamente recente - do processo "cera perdida" utilizado desde a antiguidade, na produção de jóias e utensílios domésticos, apresentando como grande vantagem a liberdade de formas, excelente acabamento e estreita tolerância dimensional. Em sua vertente artística, a partir da escultura feita em barro é confeccionado um modelo em cera. Este é recoberto com gesso e bandagens, sendo que durante a secagem do molde a cera é derretida, deixando a cavidade livre para preenchimento pelo metal.

Dos processos de fundição, este é um dos que possui maior aporte tecnológico, competindo com produtos usinados ou conformados a partir de pós. As etapas: fabricação do modelo em cera; revestimento do modelo; estufagem (100 a 120°C por 24 a 48 h); calcinação do modelo (650 a 1000°C por 12 horas) estão esquematizadas na Figura III.1. Por esse processo são produzidas palhetas de turbina, componentes de armas e próteses, entre outros. Os principais metais empregados são: aços, aços especiais e ligas de níquel e de titânio.

O molde é produzido a partir do revestimento do modelo com lamas cerâmicas de elevada refratariedade. Devido à baixa permeabilidade desses moldes foi desenvolvido o vazamento CLA (Counter-gravity Low-pressure Casting) que consiste na sucção do metal através da diminuição da pressão ao redor do molde, como esquematizado na Figura III.2. Além de garantir um melhor preenchimento das seções finas, com esse método os canais são reduzidos a uma seção mínima do canal de ataque, já que o restante - ainda não solidificado - retorna à panela.

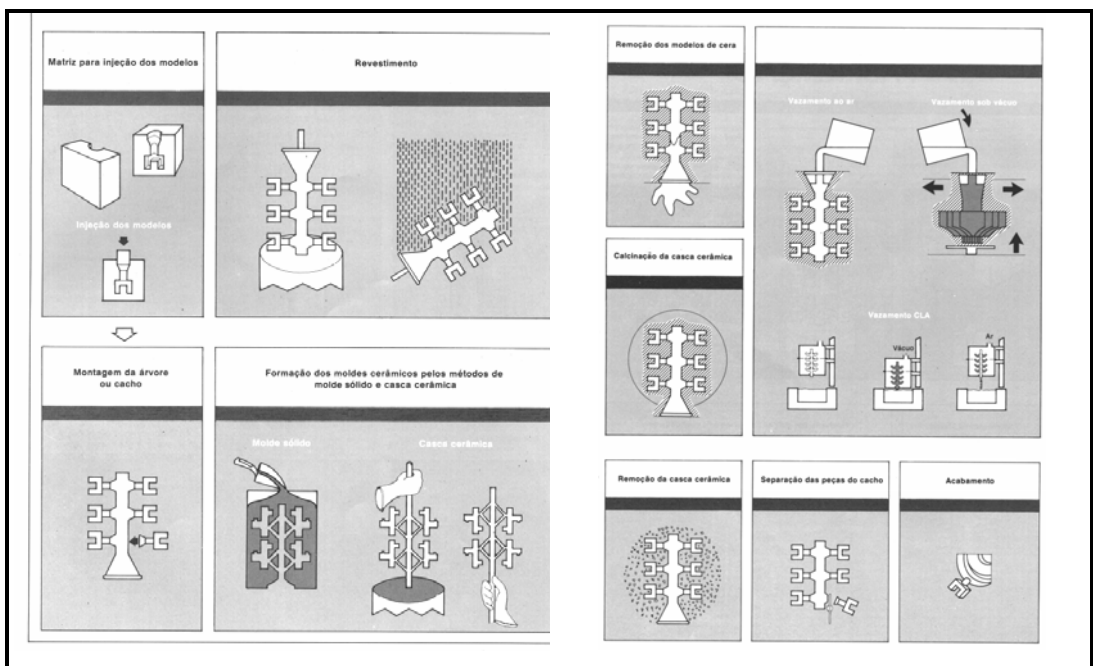


Figura III.1 - Etapas para Obtenção de uma Peça Microfundida
 Fonte: Catálogo Fupresa-Hitchiner

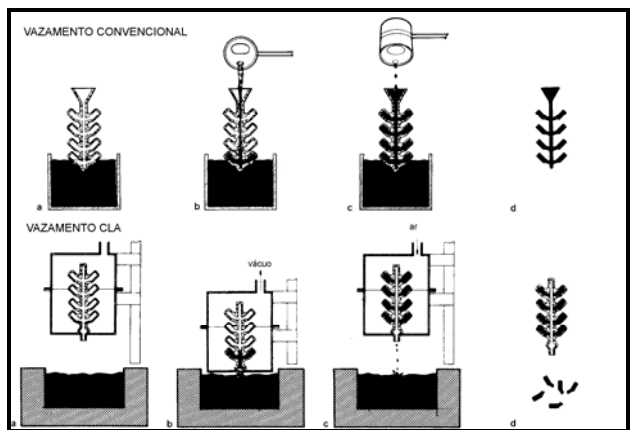


Figura III.2- Comparação do Vazamento Convencional e CLA
 Fonte: Catálogo Fupresa-Hitchiner

No caso específico de fabricação de palhetas de turbina esse é o único processo de fabricação indicado dada a geometria, espessuras e o acabamento requeridos para esses componentes. Além disso o desenvolvimento de ligas metálicas para aplicações

em altas temperaturas evoluiu no sentido de se passar da solidificação convencional para a solidificação direcional (obtendo-se grãos colunares) e mais recentemente para a produção de palhetas em monocristal, maximizando a resistência à fluência.

A Figura III.3 mostra o molde cerâmico já pronto e as palhetas após a remoção do mesmo. Para garantir a formação de grãos colunares o conjunto molde-metal é aquecido e depois resfriado direcionalmente. Já para a obtenção dos monocristais é colocada uma constricção no molde de forma a somente um cristal ultrapassar essa barreira, como esquematizado na Figura III.4

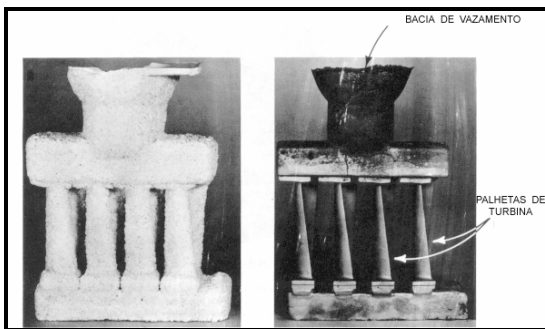


Figura III.3 - Molde para Fabricação de Quatro Palhetas de Turbina
Fonte: *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*

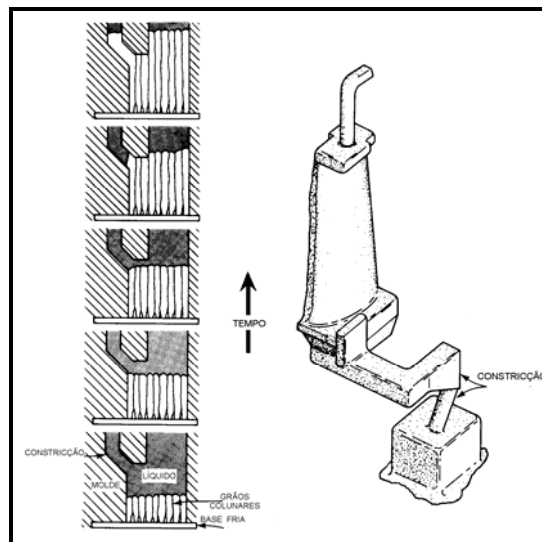


Figura III.4 - Solidificação de uma Palheta em Monocristal
Fonte: *Ibidem*

III.2 - CENTRIFUGAÇÃO

Através desse processo se produz tubos de ferro fundido nodular para transporte de água e esgoto, sem costura, com elevada produtividade (cerca de 100 tubos/ hora). O tubo é obtido a partir do vazamento do metal num molde (cilindro oco) que gira de 400 a 2000 rpm. A força centrífuga decorrente é suficiente para que o metal não só não escorra, como para garantir uma macroestrutura colunar praticamente livre de defeitos. Outra aplicação é a fabricação por centrifugação de tubos (para indústria petroquímica) e cilindros (para laminadores, com dupla camada e cerca de 9 ton. cada, após usinagem). Na área de não-ferrosos, a centrifugação também é bastante empregada para a produção de buchas e mancais em ligas de cobre. A Figura III.5 mostra o vazamento de um tubo, segundo o método - De Lavaud - utilizado pela Cia Metalúrgica Barbará para a fabricação de tubos de ferro nodular.

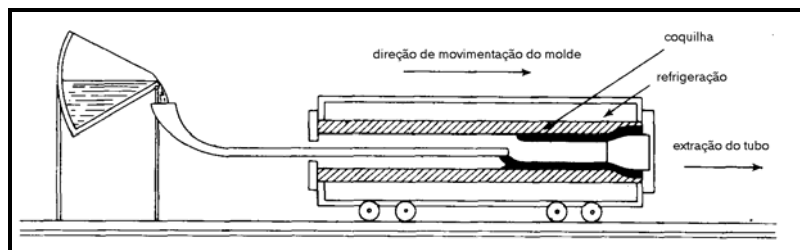


Figura III.5 - Produção de Tubos sem Costura por Centrifugação
Fonte: Foundry Technology

III.3 - FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

O processo de injeção de metal sob pressão e o de injeção de polímeros são similares, mas devido ao desgaste acentuado das matrizes metálicas, a injeção de metais fica restrita aos não-ferrosos de baixo ponto de fusão, principalmente ligas de alumínio e ligas de zinco. O acabamento das peças é excelente e o limite de peso é dado pela capacidade de fechamento da máquina que opera hidráulicamente. Em máquinas do tipo câmara quente (mais empregadas para ligas de zinco) opera-se com pressões da ordem de 3 a 30 MPa, obtendo-se de 7 a 10 injeções/min. Como cada matriz costuma ser do tipo

multi-cavidades isto gera uma elevada produtividade. O alto custo da matriz metálica viabiliza esse processo somente para lotes superiores a 5000 peças, sendo que uma matriz fabricada num aço resistente ao calor tem durabilidade de 100.000 ou mais injeções, no caso de se trabalhar com a liga - à base de zinco - ZAMAC.

A Figura III.6 mostra de forma esquemática a injeção de metal numa máquina do tipo "câmara fria" (o metal é transferido da panela para a máquina) com injeção horizontal, utilizada principalmente com ligas de alumínio ou de cobre. Peças produzidas por esse processo possuem paredes finas, apresentando excelente acabamento e boa tolerância dimensional.

Entretanto grande parte das peças produzidas por este processo (carcaça de máquina fotográfica, painéis e maçanetas de automóveis, interruptores, etc.) tem sido substituídas por similares de plástico injetado a um custo significativamente inferior, comprometendo, entretanto, a resistência e conseqüentemente a durabilidade da peça. Como o conceito de durabilidade tem se alterado ao longo das décadas, temos que nos preparar para conviver com a efemeridade desses componentes . Restam ainda - fabricados em metal - miniaturas metálicas e carburadores, entre outros.

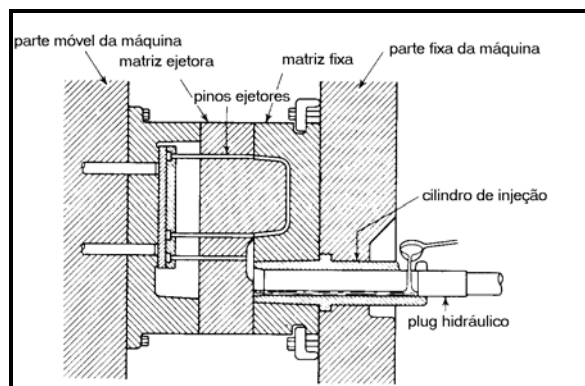


Figura III.6 - Máquina de Injeção do Tipo Câmara Fria
Fonte: *Ibidem*

III.4 - PROCESSOS HÍBRIDOS

Os processos que conjugam fundição e conformação mecânica tem tido cada vez mais penetração no mercado - principalmente na área de não-ferrosos - pela possibilidade de se fabricar peças com elevada resistência, seções mais finas e quase que total ausência de defeitos.

O processo "squeeze casting" - desenvolvido nos EUA na década de 60 - também é denominado de "liquid-metal forging", indicando que a pressão (da ordem de 70 MPa) é exercida sobre o metal durante a sua solidificação, o que garante uma peça com maior densidade do que o fundido convencional. Por esse processo - esquematizado na Figura III.7 - são atualmente produzidas peças como pistões, rodas e flanges em ligas de alumínio.

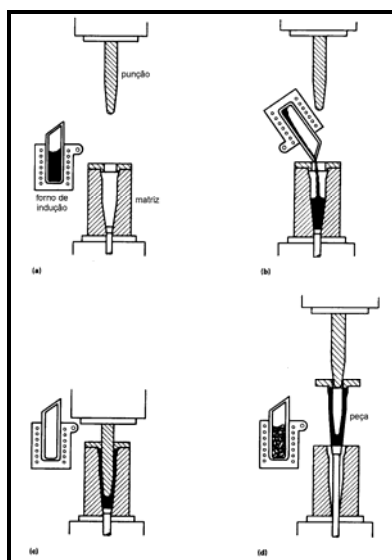


Figura III.7 - Etapas do Processo "Squeeze Casting"
Fonte: Metals Handbook, vol. 15

Já o processo " Semisolid Forging" - desenvolvido na década de 70 - se destina também à produção de peças "near net shape" ou "net shape", que dispensam acaba-

mento e consiste de duas etapas. Primeiramente o líquido é vigorosamente agitado no início da solidificação a fim de quebrar a estrutura dendrítica. Numa segunda etapa o bloco solidificado é novamente aquecido e então a peça é forjada. As etapas, mostradas na Figura III.8 de forma esquemática, podem ser totalmente automatizadas garantindo elevada produtividade.

Comparativamente ao processo de fundição em moldes permanentes por gravidade, este processo gera peças mais finas (e por conseguinte mais leves) e com maiores resistência e alongação, dada a microestrutura refinada. A produtividade chega a atingir 90 peças por hora; assim o alto custo da máquina pode - como será visto a seguir - ser diluído pelo elevado número de peças fabricadas, viabilizando o processo para grandes encomendas.

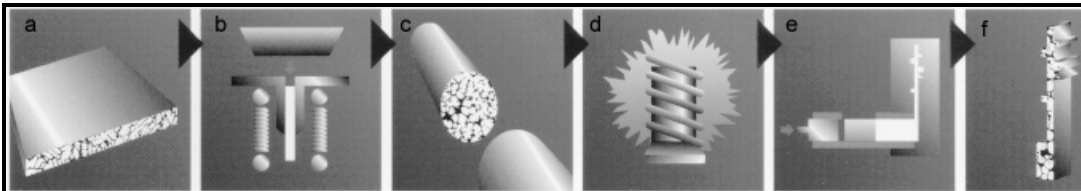


Figura III.8 - Etapas de Fabricação de uma Peça por "Semisolid Forging"

Fonte: Catálogo Bühler

III.5 - CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DO PROCESSO

Primeiramente é preciso verificar se cada um dos processos existentes - incluindo aí os de areia - é adequado ao:

- ◆ tamanho e geometria da peça
- ◆ tipo de liga a ser fundida
- ◆ acabamento e tolerância dimensional exigidas
- ◆ número de peças encomendadas

Restando dois ou mais processos tecnicamente viáveis, o critério de desempate será o econômico. A avaliação econômica deve considerar:

- ◆ custo de equipamento (incluindo amortização e manutenção) e material permanente: este custo é fixo e será rateado entre o número n de peças a produzir. Ex.: um modelo metálico pode não ser viável para um lote de 1.000 peças, mas certamente o será para a produção de 10.000 unidades.
- ◆ custo de produção: custos dos insumos (areia, metal, etc.), incluindo mão de obra, taxas de administração e lucro (over-head).

Cada processo apresenta um custo unitário que varia (inversamente) com o número de peças a produzir segundo uma dada equação. Assim podemos calcular a partir de quantas peças o processo **A** se torna mais viável economicamente que o processo **B**. O gráfico da Figura III.9 exemplifica como varia o custo para a produção de um determinado fundido, fabricado por diversos processos, *na hipótese de todos serem tecnicamente viáveis*. É importante que, nessa avaliação, sejam comparados processos que resultem em peças com acabamento e tolerância dimensional da mesma ordem de grandeza, ou que se inclua no custo unitário de produção os custos de usinagem, que é claro, serão maiores para o processo que confira à peça pior acabamento.

Não se pode esquecer que a competição, na ampla maioria dos casos, se dá não só entre os processos de fundição, mas entre esses e os demais processos de fabricação - como conformação mecânica, metalurgia do pó ou usinagem. Assim o processo escolhido será aquele que produza a peça (ou lote) dentro das especificações e com o mínimo custo. Exceção à regra do preço mínimo pode ocorrer no caso de produção de peças para a indústria aeronáutica/areoespacial quando o fator segurança supera o aspecto custo.

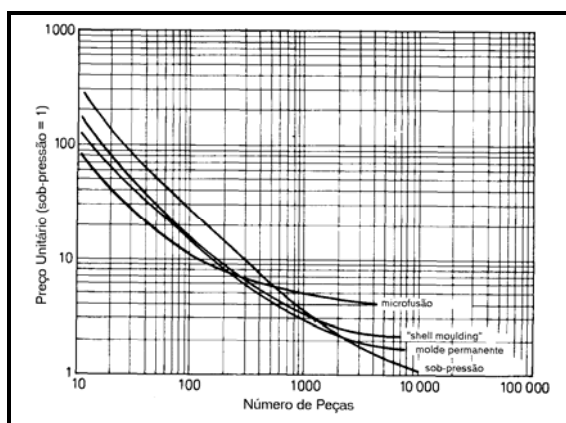


Figura III.9 - Preço Unitário Versus Número de Peças para Diversos Processos
Fonte: Foundry Technology

IV - TÉCNICAS DE FUSÃO

IV.1 - FORNOS

"Os fornos de indução aparecem com grande destaque quando o assunto é fusão de metais com alta qualidade"

Podemos classificar os fornos empregados para a fusão de metais e suas ligas em função do tipo de aquecimento empregado. Assim teremos:

- ◆ fornos elétricos: a arco (direto e indireto), de indução (a canal e a cadinho) e de resistência elétrica.
- ◆ fornos a combustível: carvão/coque; óleo combustível; G.L.P.; gás natural, entre outros.

Estes fornos podem ser do tipo cuba (alto forno; cubilô), reverberação ou rotativo; de cadinho (cadinho com aquecimento externo ao mesmo).

A Figura IV.1 - feita com dados sobre a performance do setor de fundição em 1980 mostra como os diversos fornos participavam da produção dos metais há quase duas décadas. Embora não se tenha pesquisa mais atualizada em termos da repartição dos diversos fornos pelos setores de metal, sabe-se que houve uma ampliação do uso do forno de indução - principalmente na área de ferrosos - que vem gradativamente substituindo os fornos a arco e o cubilô.

A análise dos resultados da última pesquisa da ABIFA sobre o parque de fundições (1997) mostra que cerca da metade das empresas utilizam mais de um forno de fusão. Dentre as que operam com um único tipo de forno, o forno elétrico de indução está presente em praticamente metade das instalações, sem considerar que a participação

desse equipamento nas fundições que operam com mais de um forno é também bastante significativa.

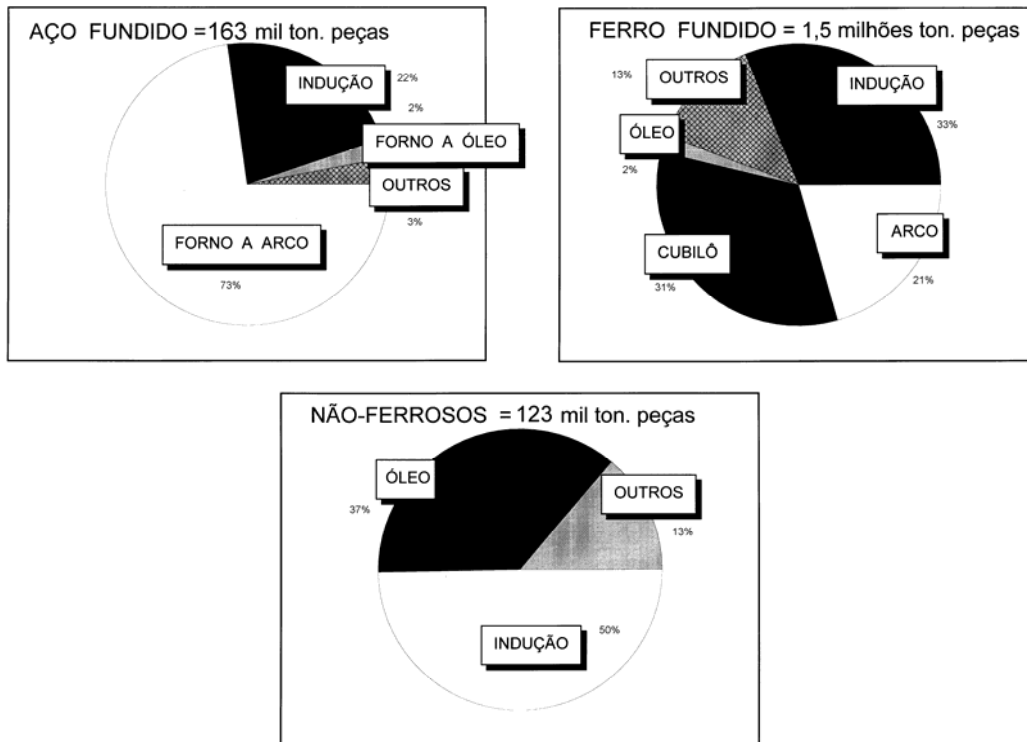


Figura IV.1 - Participação dos Diversos Tipos de Fornos na Produção de Metais
Fonte: Fundição e sua Performance

A seguir são fornecidos alguns detalhes sobre os fornos mais utilizados em fundições brasileiras:

IV.1.1 - FORNO A ARCO

O forno a arco indireto - o arco é formado entre os eletrodos e o calor irradiado para a carga - é um forno pouco utilizado, principalmente devido ao elevado custo dos eletrodos. Já o forno a arco direto tem sua maior aplicação em aciarias para fabricação de grandes quantidades de aço a partir de sucata (pelo processo ácido ou básico) e em fundições de grande porte.

IV.1.2 - FORNO DE INDUÇÃO A CANAL

Também chamado de forno de indução com núcleo magnético, este forno possui um núcleo de aço magnético - do tipo usado em transformadores - no qual é enrolada uma bobina, normalmente tubo de cobre refrigerado à água. A aplicação de uma diferença de potencial entre as extremidades da bobina gera uma corrente alternada (primária) que *induz* um campo eletromagnético alternado no canal preenchido pelo metal. Assim a potência gerada no secundário depende da corrente que circula, da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética do metal. A geometria do forno leva à formação de um canal, como esquematizado na Figura IV.2.

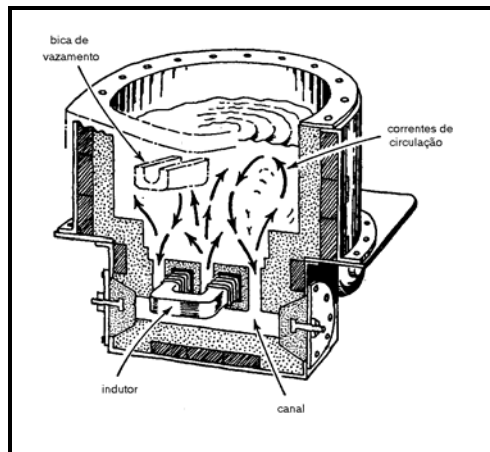


Figura IV.2 - Corte de um Forno de Indução com Núcleo

Fonte: *Foundry Engineering*

Estes fornos trabalham em frequência da rede (50/60 Hz) e o canal deve conter metal *líquido* para facilitar a fusão e evitar entupimento do mesmo. Isto vai exigir a existência de um forno de partida e reduzir a flexibilidade, limitando alterações constantes na

composição química. Assim considera-se que o forno a canal é viável para grandes cargas (maiores que 10 ton.), trabalhando continuamente (min de 16h/dia). Também pode ser utilizado em operação duplex com outro forno (por exemplo, o cubilô). Um exemplo deste forno em funcionamento é o forno para manutenção de zinco na linha de zincagem da CSN. Em 1983 haviam cerca de 200 equipamentos deste tipo instalados no Brasil, sendo que cerca de 60% operando como forno de espera (holding), para manutenção de temperatura e pequenos ajustes de composição.

IV.1.3 - FORNO DE INDUÇÃO A CADINHO

Também chamado de forno de indução sem núcleo. Como o nome diz, possui a geometria de um cadinho e ausência de núcleo magnético, quando o próprio metal que se deseja fundir funciona como secundário. Trabalha a diferentes freqüências e está esquematizado na Figura IV.3.

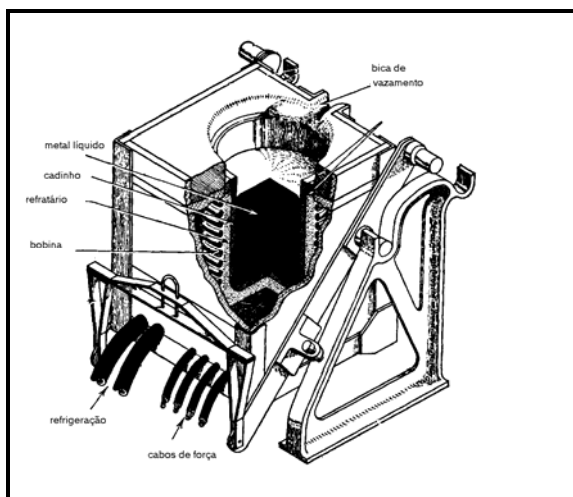


Figura IV.3 - Forno de Indução a Cadinho

Fonte: *Ibidem*

A corrente induzida no bloco metálico flui mais na periferia deste, apresentando um decaimento exponencial à medida que penetra no metal, como esquematizado na Figura IV. 4.

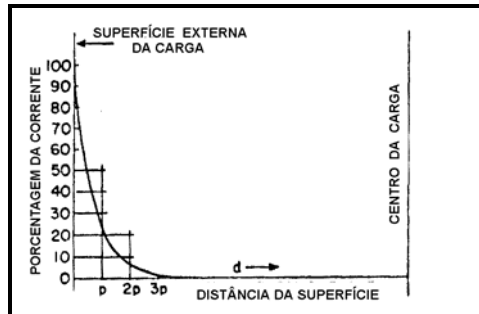


Figura IV.4 - Decaimento da Corrente Induzida

Define-se então espessura de penetração (**EP**) como a distância para a qual a corrente vale I_0 / e , ou seja, quando $I = 0,368 I_0$, onde I_0 é a corrente inicial. Isto significa que considera-se - para fins práticos - que não haja corrente circulando a distâncias maiores que **EP**. A **EP** depende da freqüência da corrente, da resistividade e da permeabilidade do metal de acordo com a equação:

$$EP = 1/2\pi \cdot [\sqrt{(\rho/\mu.f)}] \quad (IV.1)$$

onde ρ , μ e f são, respectivamente, resistividade elétrica, permeabilidade magnética e freqüência da corrente.

Assim, metais com maior resistividade elétrica possuem maior **EP**, ou seja, são mais fáceis de fundir e à medida que a freqüência da corrente aumenta, diminui a **EP**, com a potência se concentrando mais na periferia da carga.

Para maximizar os rendimentos elétrico e térmico, o bloco metálico - com diâmetro **d** e altura **h** - deve atender às seguintes relações:

$$d \cong 8 \cdot EP \quad (IV.2)$$

$$h = 1 \text{ a } 1,5 d \quad (IV.3)$$

Dessa forma, pode-se determinar a capacidade do forno em função da frequência, para cada tipo de metal. A capacidade do forno varia inversamente com a frequência como mostram os dados da Tabela IV.1, para aço.

TABELA IV.1 - CAPACIDADE DO FORNO EM FUNÇÃO DE SUA FREQUÊNCIA

<i>f</i> (Hz)	50	150	1000	4000	10.000
EP (cm)	10	5.8	2.3	1.1	0.7
capacidade (kg)	3700	700	40	5	1.4

Fonte: Fundição - ABM

Na prática trabalha-se com carga variável - em termos de tipo e quantidade - e os fornos apresentam também frequência variável, dentro de uma dada faixa; assim que parâmetros afetam a escolha do tipo de forno que será comprado?

De uma forma geral o preço do forno aumenta com o aumento da frequência. No entanto um fator importante a se considerar é potência máxima possível de ser aplicada, valor esse que é limitado pela agitação que provoca no banho. As correntes induzidas geram um movimento do banho - esquematizado na Figura IV.5 - que é positivo no sentido de garantir uma homogeneização da massa líquida, mas que, se excessivo leva a um desgaste acentuado do refratário.

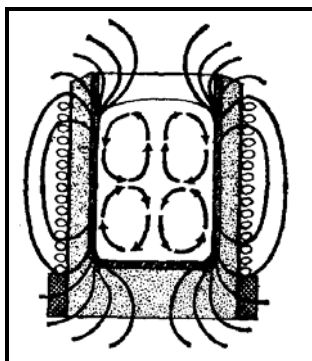


Figura IV.5 - Correntes Indutivas e Agitação do Banho
 Fonte: Foundry Engineering

Para uma dada frequência e capacidade do forno existe uma faixa de potência aplicada que corresponderá a uma agitação ideal, como mostrado na Figura IV.6 construída para uma frequência de 250 Hz. A utilização de uma frequência mais elevada significa poder aumentar a potência aplicada à carga, mantendo a agitação dentro dos níveis recomendados. Em outras palavras, isto significa diminuir o tempo de fusão, aumentando a produtividade. Por exemplo para uma carga de 5 ton. se o forno operar a 60Hz a potência não deverá ultrapassar cerca de 1500 KW, enquanto que se a frequência for 500 Hz poder-se-á aplicar até 3000 KW de potência sem que ocorra agitação excessiva. Isto significa praticamente duplicar a produtividade em kg/h, o que pode, à médio prazo, compensar o investimento num equipamento mais caro.

Desta forma cabe ao fundidor pesar todos estes aspetos na hora da compra do equipamento, não se esquecendo de incluir as despesas de instalação - obras civis, reforços em redes elétricas, etc. - no custo total. O consumo típico para fusão de ferro é da ordem de 550 kWh/ton.

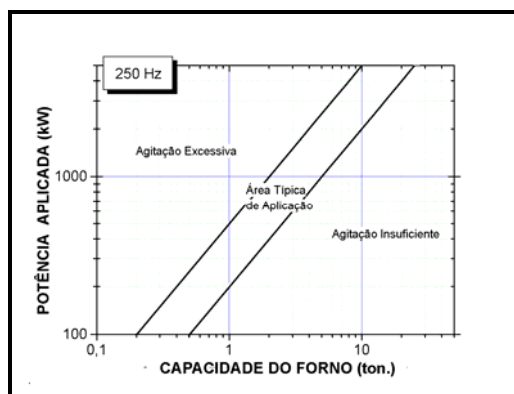


Figura III.6 - Variação da Potência Aplicada com a Capacidade do Forno
Fonte: Máquinas e Metais

A Figura IV.7 mostra um esquema de uma instalação industrial constando de sistema de pesagem e preparação da carga (A); carregador vibratório (B); dois fornos de fusão (C); panela de vazamento (D); painel de comando (E); transformadores (F) e esco-rificador (G).

Quando comparado ao forno a canal, o forno a cadinho ganha em versatilidade pela possibilidade de trabalho com carga totalmente fria e alteração da composição da carga, embora - para melhorar seu rendimento - rotineiramente não se esvazie o forno totalmente. Estes fatores explicam o amplo predomínio do forno de cadinho em fundições que operam com fornos elétricos. Grandes equipamentos com 10.000 KW de potência e produzindo até 20 ton./h de aço já estão operando em outros países, substituindo fornos a arco e fornos cubilô.

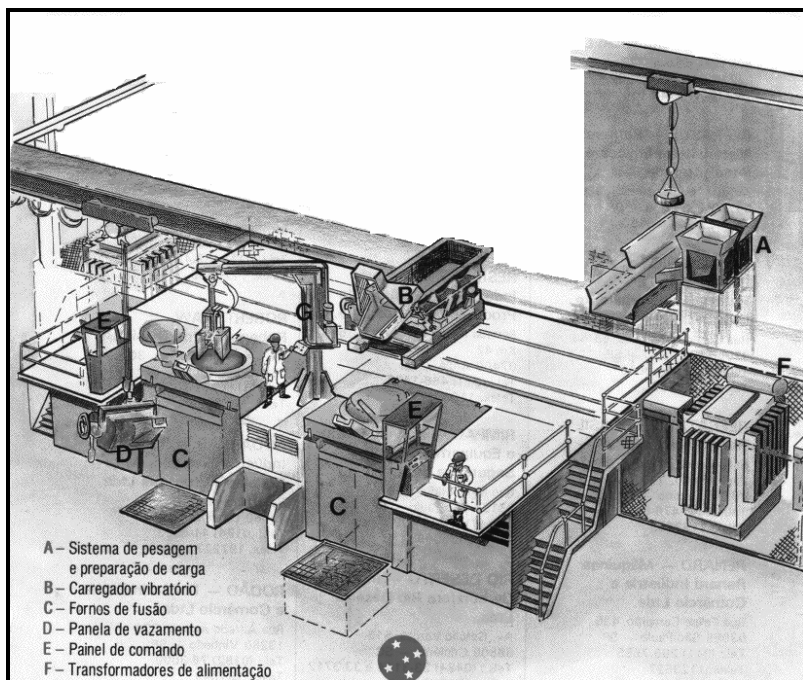


Figura III.7 - Instalação Industrial com Dois Fornos a Cadinho
Fonte: Catálogo Inductotherm Ind. e Com. Ltda.

IV.1.4 - FORNO À RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Tem sua utilização restrita a ligas de alumínio ou outras não-ferrosas, de baixo ponto de fusão. Pode funcionar bem como forno de espera - manutenção de temperatura e pequenos acertos - para essas mesmas ligas.

IV.1.5 - FORNO CUBILÔ

Embora seja considerado um forno em extinção ainda responde por cerca de 2% de todo o metal produzido - o que equivale dizer algo como 30.000 ton./ano. Esse percentual engloba *somente* a produção das fundições que utilizam um único equipamento de fusão e que correspondem - como visto anteriormente - à, aproximadamente, metade das empresas cadastradas.

O cubilô pode ser descrito como um forno de cuba, funcionando em contracorrente, onde o carvão/coque têm a função de ser o elemento combustível e o sustentáculo da carga metálica . A Figura IV.8 mostra o esquema construtivo e de funcionamento do forno. O consumo típico de coque é da ordem de 150 kg/ton. Com isso, o ferro produzido no cubilô pode custar até a metade do obtido em forno elétrico, o que explica a sua não-desativação. Ainda apresenta como vantagem o baixíssimo investimento inicial requerido para sua construção, pois é praticamente um forno artesanal.

Em contrapartida, é um forno altamente poluente, de difícil controle, principalmente quando se deseja produzir ferro com baixo carbono equivalente e baixo enxofre. Assim, esse equipamento opera bem para produção de ferros de baixa resistência ou em

operação duplex com o indução. Um forno com 0,5 m de diâmetro interno e cuba de 3,5 m pode produzir $\cong 1,5$ ton./h com cargas alternadas de 180 kg de metal, 20 kg de coque e 6,5 Kg de calcário. Já um forno com 1,5 m de diâmetro pode produzir até 13 ton./h.

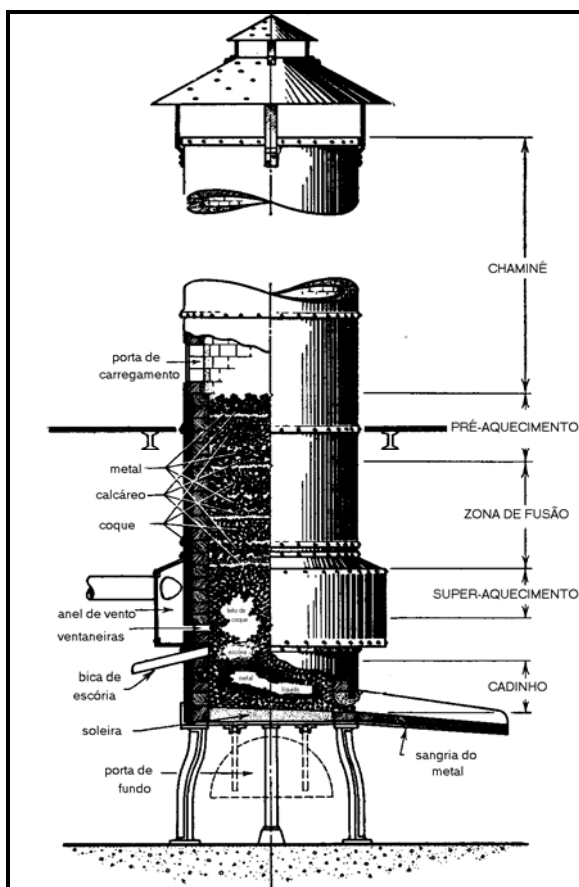


Figura IV.8 - Esquema Construtivo do Forno Cubilô
Fonte: Foundry Engineering

O mecanismo de fusão do cubilô se baseia na combustão do coque a partir do ar soprado nas ventaneiras e define no forno três regiões:

- ◆ zona de *combustão* (queima do coque) ou de *oxidação* de elementos como silício e manganês que provocam o superaquecimento do banho.
- ◆ zona de *redução* do coque ou de *fusão* do metal.
- ◆ zona de *pré-aquecimento* da carga metálica.

A posição relativa destas zonas depende de três variáveis de operação que são interligadas: pé - ou leito - de coque, coque entre cargas e vazão de ar. Alterando-se uma ou mais delas a resposta só se fará sentir a médio prazo, à medida que a carga for descendo. Daí advém a dificuldade de controle do produto no cubilô, que é feito de forma indireta: pela cor do metal que goteja (mais claro que o coque); pela cor da escória (à medida que se torna mais escura indica a presença de óxidos metálicos), etc. Nas áreas urbanas este tipo de equipamento já foi praticamente desativado, principalmente, devido à pressão exercida pelos órgãos de controle ambiental. Também a expansão da demanda do mercado por ferro nodular no lugar do ferro cinzento tem levado a substituição do cubilô pelo forno de indução a cadinho.

IV.1.6 - OUTROS FORNOS

Os fornos a cadinho com aquecimento a óleo diesel, gás liquefeito de petróleo - GLP - ou gás natural ainda encontram espaço junto a pequenas e médias fundições - principalmente na área de não-ferrosos. Há um incentivo governamental na opção pelo gás natural, menos poluente, porém isto demanda, muitas vezes, a realocação física da fundição para a proximidade de um gaseoduto.

Fornos rotativos e reverberatórios, normalmente de grande porte, são utilizados por algumas fundições que trabalham com grandes volumes de metais, como por exemplo, a Valesul para a produção de lingotes de ligas de alumínio.

IV.1.7 - CÁLCULO DE CARGA

Para se determinar um carregamento adequado à produção de uma dada especificação é preciso se conhecer:

- ◆ a faixa de teores admissíveis para o metal em questão.
- ◆ as matérias primas: sua disponibilidade; o custo e a análise química - por amostragem - de cada matéria prima.
- ◆ o equipamento de fusão: rendimento de cada elemento introduzido decorrente do processo de fusão, rendimento esse que depende do equipamento e de particularidades de operação do mesmo.

Assim, temos a seguinte fórmula:

$$\%E = \sum [(\%E_{(C_i)} / 100) \cdot (\%C_i) \cdot \eta_{E_{(C_i)}}],$$

(IV.4)

onde:

$\%E$ = % do elemento **E** introduzido

$\%E_{(C_i)}$ = % do elemento **E** no componente de carga adicionado **C_i**

$\% C_i$ = % do componente adicionado

$\eta_{E_{(C_i)}}$ = rendimento da incorporação do elemento químico **E** presente no componente **C_i** no banho metálico.

O rendimento de incorporação pode variar em função do tipo de carga C_i que está sendo adicionada e da forma de adição. Por exemplo o rendimento de incorporação do elemento silício através da adição de Fe-45%Si é menor do que no caso da adição de uma liga Fe-75%Si e - para uma mesma liga - pode variar pelo fato da adição ser feita no molde ou na panela.

Também é importante considerar todas as adições e os tratamentos feitos em panela - ou diretamente no molde - pois afetarão a composição química final, se não forem levadas em conta por ocasião do cálculo de carga.

Cada fundição utiliza os valores de rendimento tirados da sua prática de fusão. Quando são necessárias adições para correção dos teores de um dado elemento, estas adições são subdivididas em duas ou três parcelas, de forma a se evitar a ultrapassagem dos valores máximos permitidos para cada elemento. Assim, o monitoramento da composição química durante o processo de fusão é de fundamental importância para garantir a especificação requerida.

Atualmente diversas fundições já dispõem de programas para cálculo de carga que considerem a minimização dos custos e/ou a melhor utilização dos estoques. Como o preço dessas matérias primas - principalmente da sucata - oscila bastante, a utilização desses softwares pode permitir uma economia significativa.

IV.2 - ROTINAS DE FUSÃO

"A partir dos conceitos de perdas de fusão, fundibilidade e gases nos metais e do conhecimento das propriedades físicas dos elementos pode se estabelecer uma rotina de fusão para cada metal ou liga"

Muitos manuais de fundição discorrem sobre essas rotinas que podem parecer aos leigos perfeitas "receitas de bolo". Entretanto, com o conhecimento dos fenômenos que ocorrem quando da fusão, da manutenção do metal líquido e do comportamento do mesmo durante o vazamento é possível se estabelecer a técnica de fusão mais adequada a cada caso. Alguns desses aspectos são abordados a seguir:

IV.2.1 - PERDAS DE FUSÃO

São as perdas de metal contabilizadas durante a fusão, incluindo aí as perdas durante a transferência, o tratamento em panela (inoculação e nodulização, por exemplo) e o vazamento. É claro que estas perdas vão afetar o rendimento metálico global - definido como peso da peça usinada dividido pelo peso de metal carregado no forno - e a análise química final, uma vez que as perdas durante a fusão propriamente dita se concentram em cima de determinados elementos. As perdas durante a fusão podem ser subdivididas em:

- ◆ perdas por oxidação: são tão maiores quanto mais oxidável for o elemento em questão: assim num bronze silício, o elemento que terá diminuída sua concentração no banho será o silício. Estas perdas são também afetadas pelo tipo de forno e de atmosfera empregada e pela forma com que a carga metálica se apresenta, se em sucata ou em lingotes. Por exemplo, para ligas à base de alumínio estas perdas são maximi-

zadas para a fusão, de sucata de retalhos de chapas, em forno de reverberação ou rotativo com atmosfera oxidante.

- ◆ perdas por volatilização: são restritas aos elementos zinco, cádmio e magnésio, que devem ser adicionados por último. Todo cuidado em se evitar superaquecimentos desnecessários é positivo no sentido de minimizar as perdas por volatilização.

IV.2.2 - FUNDIBILIDADE

É um dado importante a se considerar por ocasião do projeto de uma peça fundida. O conceito de fundibilidade engloba fluidez e tensão superficial, uma vez que o metal líquido terá que escoar dentro dos canais até chegar à cavidade do molde. De uma forma geral quanto maior a fluidez da liga maior será a tendência a que ela apresente boa fundibilidade. Também o intervalo de solidificação e a % de contração da liga afetam a sua fundibilidade que pode ser definida como “capacidade de um metal preencher seções finas e reproduzir detalhes do molde”.

A alteração da composição de uma dada liga pode afetar a fundibilidade, sendo que essa propriedade pode ser medida - de forma comparativa - através do vazamento de corpos-de-prova padrões. O ensaio consiste em se vazarem o metal num molde padronizado - o mais utilizado possui a forma de uma espiral, Figura IV.9 - e em condições equivalentes de vazamento. Após a solidificação se mede o comprimento de espiral preenchido, sendo que quanto maior o comprimento maior será a capacidade do metal de preencher seções finas do molde.

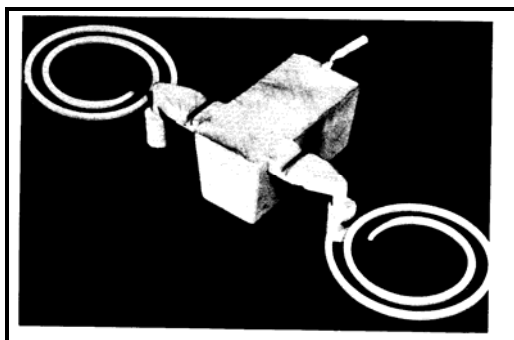


Figura IV.9 - Espiral de fluidez
Fonte: *Fundamentals of Metal Casting*

IV.2.3 - GASES NOS METAIS

Do ponto de vista do fundidor é muito importante conhecer quais são os gases solúveis no banho e em que quantidade e de que forma eles são incorporados, uma vez que gases são uma causa importante de defeitos das peças fundidas. Isto por que a solubilidade dos gases tende a diminuir com a queda de temperatura, obrigando o gás a se recombinar durante o resfriamento, gerando bolhas e porosidades na peça fundida. Se as medidas tomadas visando a minimização da absorção de gases não forem suficientes para eliminar os defeitos citados, pode ser preciso desgaseificar o metal líquido antes do vazamento.

Os gases bi-atômicos (H, N) são absorvidos numa quantidade que é proporcional à raiz quadrada da pressão parcial deste gás na atmosfera segundo a Lei de Sieverts. A Figura IV.10 mostra a variação da solubilidade do hidrogênio - que é considerado um dos mais nocivos - com a temperatura, para vários metais. Dos metais que aparecem nesta figura o mais crítico em relação a defeitos ocasionados pelo hidrogênio é o alumínio, pois como a solubilidade do hidrogênio no alumínio sólido é praticamente nula o gás tem que se recombinar gerando microporosidade em toda a peça. Já nas ligas ferrosas a presença do gás CO efetua um arraste do hidrogênio dissolvido, atuando como um

desgaseificante. As ligas de cobre são mais - ou menos - sensíveis ao hidrogênio dependendo de sua composição química.

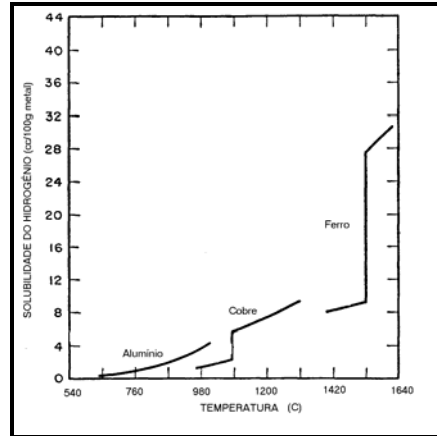


Figura IV.10 - Solubilidade do Hidrogênio nos Metais Versus Temperatura
Fonte: Fundição - ABM

A presença de nitrogênio dissolvido no banho não se constitui numa fonte de defeitos de fundição. Nos aços, esse elemento normalmente se combina na forma de nitretos ou carbonitretos que atuam como endurecedores da matriz. Nas ligas não-ferrosas a solubilidade do nitrogênio é praticamente nula; daí ele ser usado - principalmente em ligas de cobre e de alumínio - como desgaseificante, quando promove o arraste do hidrogênio dissolvido.

Gases complexos como CO (em aços) e H₂O e SO₂ (em ligas de cobre) também podem estar presentes nestes materiais. No caso de aços a presença de oxigênio (na forma de FeO) em contacto com o carbono dissolvido no banho leva à formação de CO que é responsável pelo aspecto característico das bolhas dos aços efervescentes. Por causa disso na produção de peças fundidas se utiliza sempre aço acalmado. A Figura IV.11 apresenta, de forma esquemática, lingote efervescente (a), semi-acalmado (b) e acalmado (c), com redução gradual da porosidade de a para c. Em ligas à base de cobre a solubilidade simultânea de hidrogênio e oxigênio costuma dar origem a porosidades, devendo-se evitar que o hidrogênio se dissolva no metal líquido.

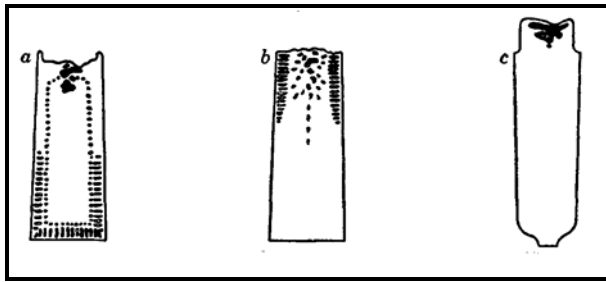


Figura IV.11 - Lingote: (a) Efervescente; (b) Semi-acalmado e (c) Acalmado
Fonte: Foundry Engineering

Como o hidrogênio e outros gases penetram no banho? A umidade presente no ar, nos refratários, na carga metálica ou nas ferramentas se dissocia a altas temperaturas com conseqüente absorção de hidrogênio e oxigênio pelo banho metálico. Assim é importante pré-aquecer ferramentas e cadinhos, restringir o contato metal - gás através de uma escória ou fluxo protetor (cuidado pois os fluxos são geralmente higroscópicos) e, mais importante ainda, utilizar a menor temperatura possível.

Se ainda assim restar uma quantidade de gases dissolvidos que gerem porosidade será preciso recorrer aos processos de eliminação desses gases. São eles:

- ◆ **Oxidação - redução:** recomendado para sistemas que apresentem solubilidade simultânea de hidrogênio e oxigênio, como por exemplo algumas ligas à base de cobre. A liga é fundida sob atmosfera oxidante, para minimizar a absorção de hidrogênio, e desoxidada energicamente instantes antes do vazamento.
- ◆ **Pré-solidificação:** utilizado principalmente quando se dispõe de muita sucata miúda. Ao solidificar, parte do gás forma bolhas e na segunda fusão o teor de gases será menor (Figura IV.12a)
- ◆ **Borbulhamento de um gás:** Inerte (nitrogênio, Figura IV.12b) ou ativo (através de pastilhas ricas em cloro, Figura IV.12c): abaixa simultaneamente o hidrogênio e o oxigênio dissolvidos pela redução da pressão parcial desses gases na mistura. Mais im-

portante ainda é o efeito de arraste que provoca quando é borbulhado no fundo da panela e as bolhas que sobem vão incorporando os gases dissolvidos. Indicado para ligas de cobre (com nitrogênio) e ligas de alumínio (com nitrogênio ou gás cloro).

- ◆ **Refino a vácuo:** usado para a produção de aços e ligas especiais, diminui simultaneamente o teor de carbono e de oxigênio (Figura IV.12d). A diminuição de pressão na câmara desloca as reações no sentido de formação dos gases que são removidos pelo bombeamento.

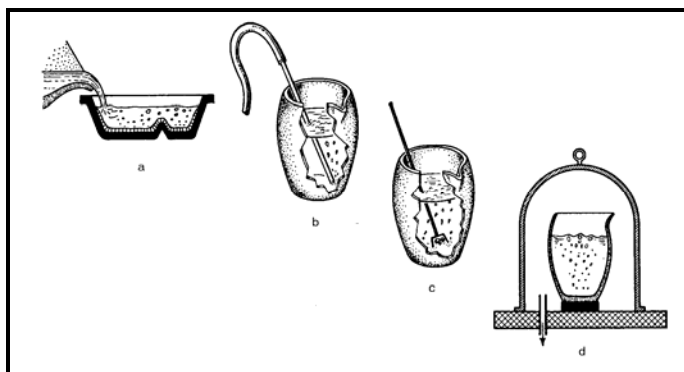


Figura IV.12 - Métodos de Degaseificação do Banho Metálico
Fonte: *Ibidem*

IV.2.4 - PROPRIEDADES FÍSICAS

É importante se conhecer as propriedades físicas como temperaturas de fusão e de vaporização, tendência à oxidação e densidade dos metais ou ligas metálicas pois estas influenciam na ordem de adições e na forma pela qual estas adições serão feitas. Elementos (ou ligas) de menor densidade que o banho são colocados no fundo do forno ou panela, amarrados numa haste ou envelopados de forma a garantir sua completa dissolução no banho.

Uma outra opção ao preparo de ligas a partir dos elementos puros é a utilização de ferro-ligas ou ligas auxiliares (ligas-mãe, ou ante-ligas) que são comercializadas com o intuito de uniformizar, dentro de certos limites, a temperatura de fusão e as densidades dos diversos elementos. Com isso, a rotina de fusão é facilitada, mas especial atenção deve ser dada ao monitoramento da composição química, uma vez que as ligas auxiliares apresentam variações de composição em torno dos teores nominais e contém - às vezes - certas impurezas que podem ser nocivas a determinados materiais.

IV.2.5 - ROTINAS DE FUSÃO

A seguir são descritas - de forma resumida - as técnicas de fusão para a obtenção de ferros fundidos e algumas ligas não-ferrosas.

A. Ferro Fundido:

A nomenclatura da ABNT para ferros fundidos cinzentos segue o modelo FCxx, onde xx é o valor mínimo do limite de resistência em kg/mm^2 para uma barra padrão de diâmetro igual a 30 mm bruta e 20 mm após usinagem. Assim, uma barra fundida - em separado - com $\varphi = 30\text{mm}$ com ferro da classe FC25 exibirá uma resistência à tração igual ou superior a 25 kg/mm^2 (cerca de 245MPa), sendo que barras mais finas apresentarão, por conseguinte, maior resistência. A nomenclatura ASTM é similar, registrando as classes em função da resistência mínima em psi ($\times 1000$). Dessa forma a classe 20 da ASTM (L.R. $> 20.000 \text{ psi}$) é equivalente ao FC15 (L.R. $> 15 \text{ kg/mm}^2$).

A Figura IV.13 mostra como a resistência do ferro decai com o aumento da espessura, para as diversas classes ASTM e a Figura IV.14 mostra a variação do Limite de Resistência com o carbono equivalente, sendo que quanto maior o carbono equivalente menor será a resistência do ferro.

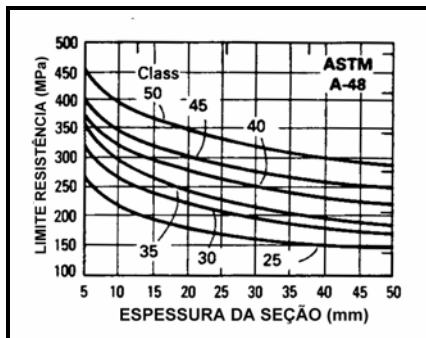


Figura IV.13 - Influência da Espessura na Resistência da Peça Fundida.
Fonte: Metals Handbook, vol. 1

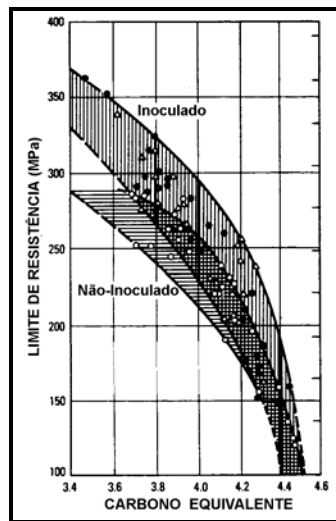


Figura IV.14 - Variação do L.R. com o Carbono Equivalente
Fonte: Ibidem

Para os ferros nodulares é adotada a nomenclatura $F_{xx}0_{yy}$, onde xx se refere ao limite de resistência mínimo (em kg/mm^2) e yy à porcentagem de alongação. As classes mais empregadas são as ABNT FE 38017 e a ABNT FE 42012 com, respectivamente, limite de resistência igual ou superior a 370 e 410 MPa e alongação mínima de 17 e 12%.

A fusão de ferros fundidos é feita a partir de um carregamento consistindo basicamente de ferro-gusa, retorno de fundição (ou sucata interna) e sucata de aço, devidamente balanceados para obtenção da composição desejada. Além disso são adicionados ferro-ligas para correção de teores dos diversos elementos, sendo que o forno mais indicado para a preparação do metal é o forno de indução. Após a fusão, o metal é inoculado - normalmente com liga Fe-Si - em panela ou diretamente no molde, com o intuito de garantir uma microestrutura de células eutéticas pequenas e homogêneas. A inoculação tem um efeito positivo sobre a resistência do ferro, conforme mostrado na Figura IV.14.

A produção de ferros fundidos nodulares tem crescido bastante pois este material apresenta propriedades intermediárias entre o ferro cinzento e o aço. Entretanto, a produção de ferro nodular acrescenta à rotina de fusão do cinzento duas etapas - dessulfuração e nodulização - o que encarece o produto, quando comparado ao ferro cinzento. A nodulização é a etapa mais crítica do processo por empregar magnésio puro ou ligas contendo esse elemento.

O magnésio apresenta baixo ponto de fusão e de volatilização, baixa densidade, é um dessulfurante forte, além de ser extremamente oxidável (é empregado, inclusive na fabricação de fogos de artifício). Assim é que diversos processos de nodulização foram patenteados, sendo mais comumente utilizados a adição do elemento puro em panelas herméticas ou a adição de ligas Fe-Si-Mg pelo processo "sanduíche" ou "tundish cover".

A porcentagem de grafita em nódulos depende, entre outros fatores, do teor *residual* de magnésio - da ordem de 0,04% - e já que o Mg apresenta grande afinidade com o enxofre, a dessulfuração deve anteceder à nodulização. A fórmula abaixo mostra a dependência da quantidade de magnésio adicionado com o teor de enxofre e o rendimento de incorporação (η):

$$\text{Mg}_{\text{adic.}} = (0,75 \cdot \%S + \% \text{Mg}_{\text{resid.}}) / \eta$$

(IV.5)

Atualmente praticamente toda a pesquisa em ferro fundido tem se concentrado no desenvolvimento dos ferros nodulares austemperados - ferros nodulares ligados e submetidos a tratamentos térmicos de austêmpera - também chamados ADI (austempered ductile iron), que conjugam resistência mecânica de 800 e 1400 MPa com alongação entre 20 e 2%.

O requisito de se partir de um ferro desoxidado, dessulfurado e com elevada temperatura para proceder à nodulização praticamente elimina a opção de se usar o cubilô como forno de fusão único.

B. Ligas Não-ferrosas:

♦ Ligas à base de alumínio:

Ligas à base de alumínio tem tido seu campo de aplicação ampliado, substituindo, muitas vezes, componentes tradicionalmente fabricados em ferro fundido ou aço. Projeções indicam que o consumo de ligas de alumínio em automóveis médios passe de cerca de 67kg/veículo em 1996 para cerca de 84kg no ano 2000.

A *Aluminum Association* designa as ligas de alumínio por 4 dígitos sendo que o primeiro se refere ao elemento de liga principal, conforme mostrado na Tabela IV.2. Os dois dígitos seguintes se referem ao teor aproximado de alumínio na liga, enquanto que o quarto dígito assume 0 para fundidos e 1 para lingotes.

TABELA IV.2 - DESIGNAÇÃO DAS LIGAS SEGUNDO A ALUMINUM ASSOCIATION

Designação	Elemento Principal	Outros Elementos
1xx.x	alumínio não-ligado	--
2xx.x	cobre	--
3xx.x	silício	Mg e/ou Cu
4xx.x	silício	--
5xx.x	magnésio	--
7xx.x	zinco	Cu e/ou Mg e/ou Cr e/ou Mn
8xx.x	estanho	--

Fonte: *Metals Handbook, vol. 1*

As ligas que contém silício são extensivamente utilizadas na produção de peças fundidas, dada sua elevada fundibilidade. Entretanto quando o teor de silício na liga se aproxima do valor do eutético do sistema Al-Si ($\approx 12\%$) costuma ser necessário um tra-

tamento de modificação do banho - através da adição de sódio - que consiste numa "nodulização" do eutético, como forma de evitar uma drástica redução de ductilidade.

Outras composições bastante empregadas na indústrias automobilística e de auto-peças são as ligas da família 300 como a 356.0 com (6,5-7,5)%Si - 0,6%Fe - 0,25%Cu - 0,35%Mn - (0,20-0,45)%Mg que contém ainda pequenos teores de zinco, estanho, chumbo e titânio. As ligas desta família podem ser vazadas por diferentes processos - sendo utilizados principalmente os processos sob-pressão, molde permanente e areia - e podem ser tratadas termicamente. Processos como "squeeze casting" e "semi-solid forging" também tem sido empregados na fabricação de peças em ligas de alumínio.

A fusão das ligas de alumínio é feita sob atmosfera neutra com fluxo protetor que minimize a oxidação do banho e a absorção de hidrogênio. Mesmo assim quase sempre é preciso recorrer à degaseificação com adição em panela de pastilhas de hexacloretano, que liberam gás cloro, promovendo um arraste do gás hidrogênio. Como os vapores de gás cloro são altamente tóxicos é importante o operador usar máscara para proteção de gases. A Figura III.15 mostra a associação porosidade com o teor de hidrogênio na liga. Muito cuidado deve-se ter durante o vazamento pois a presença de filme de óxido à frente do jato líquido triplica a tensão superficial aparente do alumínio, prejudicando o preenchimento de seções finas.

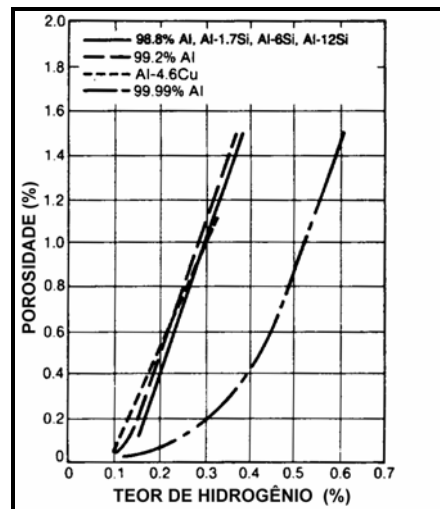


Figura IV.15 - Influência do Hidrogênio Dissolvido na Porosidade de Ligas de Alumínio.
Fonte: *Metals Handbook*, vol. 2

◆ Ligas à base de magnésio:

Ligas à base de magnésio são utilizadas nas indústrias automotiva mecânica e aeroespacial. Neste último caso, é importante a elevada relação resistência / peso em temperaturas moderadas apresentada pela maioria das composições. As ligas à base de magnésio mais empregadas hoje em dia incorporam em sua composição zircônio - para reduzir o intervalo de solidificação e por conseguinte a porosidade - e terras raras ou tório para aumentar a resistência à fluência. Injeção sob pressão, moldes em areia e moldes permanentes são bastante empregados na produção de peças fundidas, sendo que essas ligas são também passíveis de serem tratadas termicamente.

A fusão de ligas de magnésio é bastante similar a de ligas de alumínio com o agravante que os fluxos utilizados para proteção do banho metálico precisam ser menos densos, sendo normalmente empregados fluxos contendo fluoreto de lítio - LiF. A proteção do banho de magnésio também pode ser feita com a adição de enxofre em pó a fim de criar uma atmosfera protetora rica em SO₂. O mesmo enxofre pode ser adicionado

- como dito anteriormente - à areia de moldagem com o intuito de minimizar a reação molde-areia.

♦ **Ligas à base de cobre:**

É praticamente impossível se determinar uma rotina única para todas as ligas à base de cobre, uma vez que elas apresentam características bastantes distintas. A classificação dessas ligas engloba os seguintes grupos:

- ♦ ligas de alta condutividade: Cu - 0,9%Cd;
Cu - 2,4%Co - 0,6%Si;
Cu - 0,5%Cr - 0,05%Si
- ♦ latões: latão com chumbo (ou 85-5-5-5, Cu/Zn/Pb/Sn) - a liga mais utilizada
- ♦ bronzes: bronze de estanho: Cu - 20%Sn;
bronze fosforoso: Cu - 8%Sn - 10%Pb - 0,8%Zn - 0,35%P;
bronze Manganês (latão especial): Cu - 26%Zn - 3%Fe - 5,5%Al - 3,5%Mn;
bronze de Silício: Cu - 14%Zn - 3,5%Si;
bronze de Alumínio: Cu - 10%Al - (1 a 4)%Ni;
bronze de berílio: Cu - 1%Al - 2,5%Be;
alpaca: Cu - (1 - 5)%Sn - (1 - 9)%Pb - (2 - 20)%Zn - (12 - 25%)Ni

A rotina de fusão dependerá também das propriedades físicas dessas ligas listadas na Tabela IV.3 e - principalmente - da tendência à oxidação e à absorção de gases. Assim atmosferas oxidantes devem ser evitadas em ligas contendo alumínio, silício e berílio. Nas demais pode-se usar fluxo oxidante - para prevenir da absorção de hidrogênio - promovendo uma desoxidação enérgica nos momentos que antecedem ao vazamento. O desoxidante universal é o Cu-P, mas nas ligas de elevada condutividade costuma-se empregar a liga Cu-Li como desoxidante, que tem efeito menos negativo sobre a

condutividade elétrica do cobre. A desgaseificação - opcional - é normalmente feita com nitrogênio.

Projetos de peças em ligas com elevada % de contração - como o bronze-manganês - devem receber especial atenção a fim de evitar a formação de trincas durante o resfriamento. Os bronzes de estanho que apresentam intervalo de solidificação de até 150°C, são o exemplo típico de ligas que se solidificam por camadas espessas, sendo de difícil alimentação.

Ainda de acordo com a Tabela IV.3 os bronze-alumínio e as alpacas são as ligas que possuem pior fundibilidade, dificultando o preenchimento de seções finas.

TABELA IV.3 - PROPRIEDADES DE ALGUMAS LIGAS DE COBRE FUNDIDAS EM AREIA.

<i>Liga</i>	<i>% de contração</i>	<i>Temperatura Líquidus (°C)</i>	<i>Fundibilidade</i>	<i>Fluidez</i>
Latão vermelho com Chumbo	1,7	1010	2	6
Latão amarelo com Chumbo	1,5-1,8	940	4	3
bronze manganês	1,9-2,3	880-920	4-5	2
bronze estanho	1,5-1,8	980	3	6
bronze estanho com alto chumbo	1,5-2,0	925-930	6-2	7-6
bronze alumínio	1,6	1045-1060	8	3
alpaca	1,6-2,0	1180-1145	8	7

fundibilidade e fluidez variam de 1 a 8, sendo 1 a melhor condição

Fonte: Metals Handbook, vol.2 (adaptação)

Também a usinabilidade das ligas à base de cobre varia bastante, sendo os bronzes manganês e alumínio os de pior usinabilidade, enquanto que as ligas contendo chumbo são fácil ou moderadamente usináveis.

♦ **Ligas à base de zinco:**

Praticamente só é utilizada a liga ZAMAC com (3,5-4,5)%Al - (0,02-0,10)%Mg - (0-3,5)%Cu associada ao processo de injeção sob pressão. Como característica a liga ZAMAC apresenta baixo ponto de fusão; excelente fundibilidade e fácil usinagem, podendo ser recoberta com tintas ou eletroliticamente. É, entretanto, muito sensível a impurezas (Pb, Cd, Sn), exigindo o emprego de zinco de elevada pureza.

A rotina de fusão consiste em se fundir, em separado, sucata interna (com refino da mesma) e posteriormente - normalmente num outro equipamento de fusão - adicionar lingotes de Zn de alta pureza (4 noves) + Al - 50%Cu + Al - 10%Mg + Mg (se for o caso), sendo que não é necessário o emprego de um fluxo escorificante.

Recentemente ligas com composição hipereutética (> 5% Al) - desenvolvidas para a utilização em moldes permanentes começaram a ser empregadas também em máquinas sob pressão, produzindo fundidos com maior resistência do que as tradicionais ZAMAC.

V - SOLIDIFICAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE PEÇAS

V.1 - SOLIDIFICAÇÃO

"O conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a mudança de estado líquido → sólido é fundamental para se entender as estruturas de solidificação"

Dentre os modelos de solidificação unidirecional, dois modelos em condições de não-equilíbrio se adequam razoavelmente ao fenômeno que ocorre dentro do molde. São eles:

- ◆ com mistura total no líquido: a mistura pode ocorrer por convecção ou agitação mecânica.
- ◆ com mistura parcial no líquido: se a velocidade de solidificação for elevada e não houver grande agitação, pode haver concentração de soluto na interface.

Em ambos os casos a velocidade de solidificação não é constante, sendo mais elevada no início - quando o efeito do molde é intenso - e no fim, quando resta pouco líquido. Além disso a solidificação só pode ser considerada como unidirecional em poucas aplicações como no caso de fabricação de tubos de paredes finas por centrifugação. Outra situação em que se pode considerar a solidificação unidirecional é na fabricação de palhetas de turbinas. Devido à sua geometria e acabamento exigido, o processo utilizado é o de microfusão (ou fundição de precisão), sendo que a microestrutura das palhetas evoluiu de grãos equiaxiais para grãos colunares e mais recentemente as palhetas são produzidas com um único cristal (monocristal), com o intuito de maximizar as propriedades de fluência.

A nucleação será sempre heterogênea, sendo que as paredes do molde funcionam como ponto de partida para a solidificação. A velocidade de aquecimento, a temperatura e o tempo em que o metal permanece superaquecido podem afetar a formação ou dissolução de eventuais núcleos heterogêneos formados a partir de impurezas presentes.

A velocidade de resfriamento até à temperatura de início de solidificação determina o número total de núcleos - ativos - que podem crescer. Quanto maior for a velocidade de resfriamento maior será o número de núcleos e maior o refinamento da microestrutura. Assim moldes metálicos - que possuem elevada capacidade de extração de calor - produzem microestruturas bastante refinadas. Principalmente na moldagem em areia, é importante adicionar ao metal líquido inoculantes - núcleos externos - para garantir homogeneidade microestrutural. Os inoculantes devem ser escolhidos dentre aqueles que possuam elevada temperatura de fusão, alta molhabilidade (θ o menor possível) e compatibilidade de parâmetro cristalino com o metal fundido. Na literatura existem Tabelas com indicações de inoculantes para diversas ligas.

O tipo de interface sólido-líquido depende da concentração de soluto, do gradiente de temperatura - G - em $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ e da velocidade de resfriamento ou velocidade de avanço da interface sólido-líquido - R -, como pode ser visto na Figura V.1. Para as composições e velocidades de resfriamento usualmente encontradas nos processos de fundição, a interface será quase que sempre dendrítica.

O gradiente de soluto na interface sólido-líquido gera microsegregação - também chamada de zonamento ou de segregação de curto alcance - que é confirmada através de análise em microrregiões. Como geralmente o crescimento da interface de ligas fundidas é do tipo dendrítico a microsegregação ocorre principalmente no sentido perpendicular aos braços de dendrita, possibilitando a precipitação, nessa região, de segundas fases não previstas pelo diagrama de equilíbrio. É comum também que o ataque metalográfico revele - nas regiões próximas aos contornos de grão - manchas decorrentes da segregação de soluto.

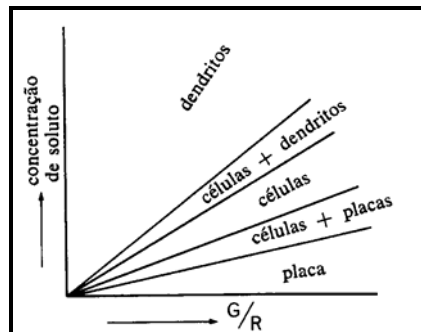


Figura V.1 - Morfologia da Interface Sólido - Líquido
Fonte: *Princípios Metalúrgicos de Fundição*

O somatório das microsegregações individuais dá origem à macrosegregação, detectável por análise química convencional. O fato do metal se contrair durante o resfriamento pode gerar um fluxo de líquido no caminho inverso ao da frente de solidificação, dando origem à *segregação inversa*. Em algumas ligas com elevada contração volumétrica - como em ligas à base de estanho - o retorno do líquido pode inclusive provocar a quebra da camada solidificada, aflorando à superfície da peça.

As variações volumétricas experimentadas pelo metal desde a temperatura de superaquecimento até à temperatura ambiente estão esquematizadas - para o aço - na Figura V.2. Para análise de como essa alteração é sentida pelos diversos setores da fundição a variação volumétrica é subdividida em três partes, a saber:

- ◆ contração no estado líquido: não tem importância prática, pois sempre é fundido metal suficiente para completar todos os moldes, acrescido de uns 10% para compensar perdas durante a transferência do metal e o vazamento.
- ◆ contração durante a solidificação: dá origem aos vazios internos - rechupe e/ou porosidade - que podem comprometer a sanidade da peça fundida. Para evitar estes

defeitos é preciso se dimensionar cuidadosamente o sistema de alimentação, que será o assunto abordado no item V.3.

- ◆ contração no estado sólido: como visto anteriormente, o projeto do modelo deve levar em conta a variação volumétrica da peça para garantir a adequação da mesma aos requisitos dimensionais. Outra consequência da contração no estado sólido é a tendência ao trincamento, principalmente em locais onde o molde se oponha à livre contração do metal como em cantos vivos, em mudanças abruptas de espessura, etc. Assim, para ligas elevadas a percentagem de contração, especial ênfase deve ser dada à fase do projeto.

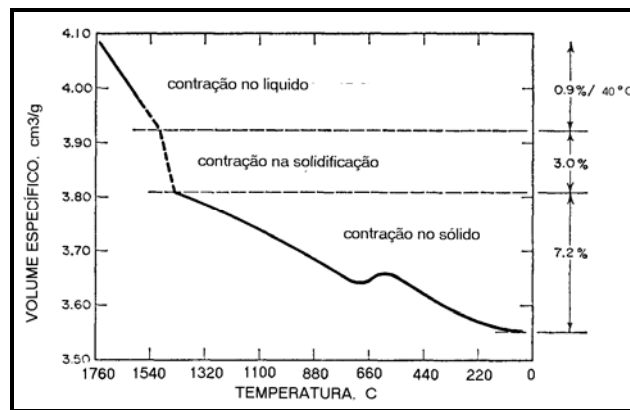


Figura V.2 - Variação Volumétrica do Aço ao se Resfriar a partir da Fase Líquida

Fonte: Foundry Engineering

O modo de solidificação da liga depende de seu intervalo de solidificação afetando a formação do rechupe e a sensibilidade à trinca à quente. Normalmente as ligas se subdividem em ligas que se solidificam por:

- ◆ camadas finas: ex. aços, latões, Al-13%Si, Cu-Al
- ◆ camadas espessas: ferro fundido, bronze, outras ligas de Al.

O modo de solidificação afetará o projeto dos sistemas de canais e massalotes, e será abordado novamente adiante.

V.2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR

"A velocidade de solidificação depende da capacidade de extração de calor do molde, sendo máxima para moldes refrigerados à água e mínima para moldes em areia e gesso"

Os modos de transferência de calor envolvidos por ocasião do vazamento do metal no molde e da solidificação do metal vão definir a velocidade de solidificação - e por conseguinte - o refino da estrutura. Essa análise permite formular equações que definam o perfil de temperaturas de uma peça e/ou como a espessura solidificada varia com o tempo. Em muitas aplicações isto pode ser ignorado, mas em outras esse tipo de estudo é fundamental. Um exemplo é a produção de cilindros fundidos com dupla camada, quando a segunda camada deve ser adicionada à primeira antes dessa se solidificar por completo, necessitando assim, de um monitoramento do tempo entre os dois vazamentos. Também no lingotamento contínuo, o comprimento do primeiro estágio está relacionado com a obtenção de uma espessura solidificada que garanta uma resistência adequada da placa para a continuação do processo.

O metal superaquecido ao encontrar o molde à temperatura ambiente transfere calor para este, aquecendo-o e iniciando o processo de solidificação. Que modos de transferência de calor aí estão envolvidos? Inicialmente são feitas algumas simplificações como, por exemplo, considerar que o molde é bastante espesso - portanto sua temperatura externa permanece inalterada - e que o metal é vazado à temperatura de fusão (sem superaquecimento). Assim o calor se propaga no metal já solidificado e no molde, da forma esquematizada na Figura V.3. Nesta Figura a letra **K** se refere à transferência de calor por condução e a letra **N** se refere à transferência de calor Newtoniana que age na interface metal-molde - normalmente recoberta com tintas - retardando a solidificação.

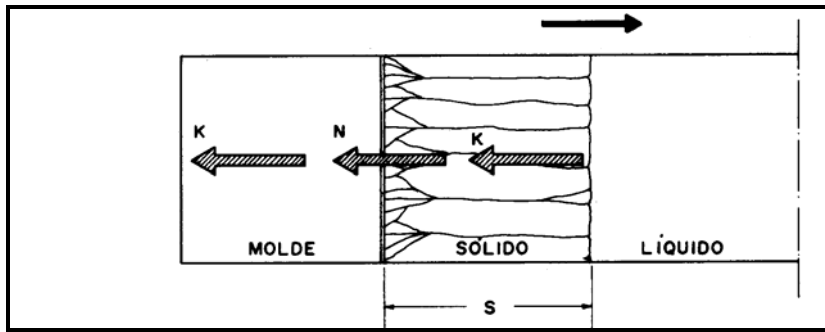


Figura V.3 - Transferência de Calor durante a Solidificação
 Fonte: *Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas*

Em 1953 Paschkis propôs representar a transferência de calor de modo análogo ao utilizado em diagramas de circuito elétrico, como pode ser visto na Figura V.4, onde o fluxo de calor q decorre da diferença de temperaturas T_f e T_0 e das resistências térmicas envolvidas (R_m - do molde; R_i - da interface; R_s - do metal solidificado).

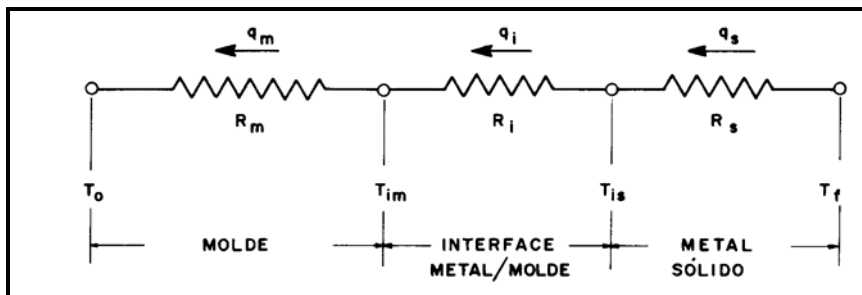


Figura V.4 - Analogia com um Circuito Elétrico
 Fonte: *Ibidem*

Baseado nesse esquema podemos fazer simplificações adicionais de forma a facilitar os cálculos e enquadrar todos os processos de fundição em três grupos de transferência de calor, a saber:

V.2.1 - RESISTÊNCIA TÉRMICA DO METAL PREDOMINANTE

É o caso dos moldes refrigerados à água ou com ar, quando todo o calor que chega ao molde é dissipado instantaneamente, ou seja, $R_m \approx 0$. Se enquadrarmos neste caso os tubos e cilindros fundidos por centrifugação, quando o molde - coquilha - é refrigerado e a solidificação é praticamente unidirecional. A equação que define a espessura solidificada em função do tempo é apresentada a seguir:

$$t = [(H \cdot \rho_s) / (2 \cdot k_s \cdot (T_f - T_0))] s^2 + [(H \cdot \rho_s) / (h_i \cdot (T_f - T_0))] \cdot s \quad (V.1),$$

onde:

H - calor latente de fusão, cal / g

ρ_s - densidade do metal, g / cm³

k_s - condutividade térmica do metal, cal / cm . °C . s

T_f - temperatura de fusão, °C

T_0 - temperatura ambiente, °C

h_i - condutância da interface, cal / cm² . °C . s

ou

$$t = \alpha \cdot s^2 + \beta \cdot s, \quad (V.2)$$

caso se considere - para simplificar - que as propriedades do metal e da interface independem da temperatura.

Já que o primeiro termo depende somente do metal e o segundo depende do metal e da interface podemos associar estes termos a t_K - tempo devido à condução de calor e t_N - tempo devido à transferência newtoniana. Teríamos então que:

$$t = t_K + t_N$$

(V.3)

A Figura V.5 esquematiza a equação V.2 quando o tempo de solidificação é desmembrado em dois - t_K e t_N .

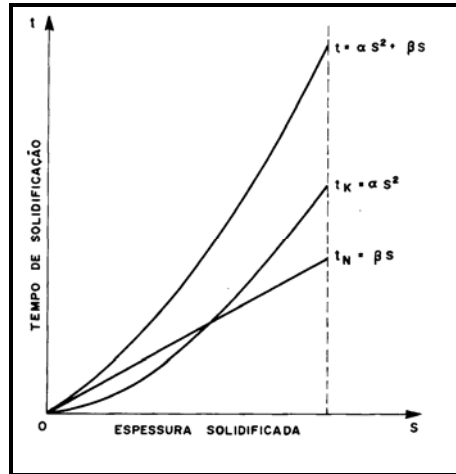


Figura V.5 - Variação da Espessura Solidificada com o Tempo de Solidificação
 Fonte: *Ibidem*

Como a resistência da interface (proporcional a s) atua apenas nos primeiros instantes da solidificação, o segundo termo da equação (V.1) pode ser desprezado - principalmente se a peça for espessa - e então a solidificação prosseguirá em decorrência da condução de calor no metal que esta se solidificando (proporcional a s^2).

V.2.2 - RESISTÊNCIA TÉRMICA DA INTERFACE PREDOMINANTE:

Em moldes não-refrigerados porém metálicos (moldes permanentes e sob-pressão) a equação V.1 ainda pode - de forma aproximada - ser considerada. Como os moldes são pintados - os valores de h são bastante baixos (da ordem de 10^{-2} cal/cm².°C.s) pois há uma forte oposição à transferência de calor - resultando num coeficiente angular β elevado. Some-se a isso o fato de que, principalmente no processo sob-pressão, as peças injetadas tem paredes finas e temos o predomínio da resistência térmica da interface (R_i). Isto significa olhar - com uma lente de aumento - para um pequeno trecho

da Figura V.5 correspondente à região de espessura próxima de zero, quando t_N é maior que t_K .

V.2.3 - RESISTÊNCIA TÉRMICA DO MOLDE PREDOMINANTE

A condutividade térmica do cobre, do ferro fundido, da areia e do gesso é, respectivamente, 0.90; 0.10; 0.002 e 0.001 cal / cm.°C.s, o que significa dizer que a capacidade de extração de calor de um molde em areia ou em gesso é bastante inferior a de um molde metálico. De acordo com o esquema elétrico mostrado na Figura V.4 essa baixa capacidade de extração de calor pode ser representada pela predominância da resistência térmica do molde - $R_m \gg R_i + R_s$ - resultando em estruturas grosseiras.

O perfil de temperaturas ao longo do molde não pode ser linearizado - como é feito no caso de moldes metálicos - e a resolução passa pela aplicação da equação de Fourier, já que a transferência de calor se dá em regime não estacionário, tendo como solução a equação V.4, apresentada a seguir.

$$t = [(\sqrt{\pi} \cdot H \cdot \rho_s) / (2 \cdot b_m \cdot (T_f - T_0))]^2 \cdot s^2 + [(H \cdot \rho_s) / (h_i \cdot (T_f - T_0))] \cdot s \quad (V.4),$$

onde: b_m , difusividade de calor no molde = $\sqrt{k_m \cdot c_m \cdot \rho_m}$, sendo k_m , c_m e ρ_m , respectivamente, condutividade térmica, calor específico e densidade do molde, em unidades CGS. Os demais termos já haviam sido definidos na expressão (V.1).

Mesmo aqui é possível considerar o desmembramento do tempo de solidificação em duas parcelas: uma dependente das propriedades do metal / molde e outra dependente das propriedades do metal / interface. Teríamos então que:

$$t = \alpha' \cdot s^2 + \beta \cdot s \quad (V.5)$$

$$\text{ou } t = t'_K + t_N \quad (V.6)$$

Na prática - $t_N \ll t'_K$ - poderia ser desprezado, como esquematizado na Figura V.6, principalmente para o caso de peças espessas.

Ignorando a participação da interface, ou restringindo-a aos primeiros instantes da solidificação, podemos resumir dizendo que:

$$t = cte \cdot s^2 \quad \text{expressão de Chvorinov, (V.7)}$$

ou, como preferem outros autores,

$$s \propto \sqrt{t} \quad \text{(V.8)}$$

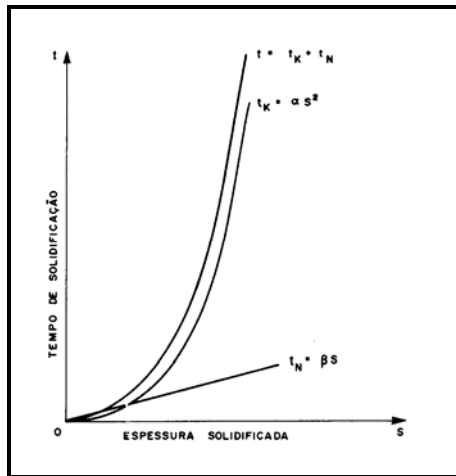


Figura V.6 - Predominância da Resistência Térmica do Molde
Fonte: *Ibidem*

Essa correlação é tão mais verdadeira quanto maior for a resistência térmica do molde. Na prática a espessura s é substituída pela relação volume / área, já que a solidificação não se processa numa única direção, sendo que essa expressão servirá como base ao cálculo de massalotes, assunto a ser abordado no próximo item.

V.3 - SISTEMA DE MASSALOTES

"Massalote - montante ou alimentador - é definido como uma reserva de metal líquido que tem por objetivo suprir as necessidades adicionais de metal decorrente da contração que ocorre durante a solidificação"

Uma vez que o metal se contrai ao passar do estado líquido para o sólido, é razoável imaginar que se mais metal líquido não for colocado no molde, a peça ficará incompleta. Quando essa falta de material é concentrada numa região damos o nome de rechupe, reservando o termo porosidade para micro-rechupes distribuídos por toda a peça ou - melhor ainda - para buracos decorrentes da evolução de gases. Para evitar que a presença de rechupe possa afetar a sanidade do fundido, lança-se mão de um sistema de alimentação, que será tão mais necessário quanto mais maciça for a peça em questão.

Assim, para ser efetivo o massalote deve atender aos seguintes requisitos:

- ◆ estar localizado junto à região que se solidifica por último - denominada de *ponto quente*.
- ◆ solidificar após a região que está alimentando, ou seja, o tempo de solidificação do massalote deve ser maior que o tempo de solidificação do ponto quente.
- ◆ conter quantidade de metal suficiente para compensar a contração metálica.
- ◆ atuar com pressão máxima durante o tempo de solidificação, empurrando o metal em direção à zona quente da peça.
- ◆ ter peso mínimo em relação à peça para maximizar o rendimento metálico.

Os massalotes são do tipo cilíndricos (massalote aberto) ou cilindro encimado por uma esfera (massalote cego - também chamado de atmosférico) e em relação ao molde podem se posicionar lateralmente ou no topo da peça, sendo que os mais empregados são o de topo aberto ou o lateral cego.

Como para maximizar o tempo de solidificação a relação altura / diâmetro do massalote deve ser da ordem de 1 a 1.5, praticamente todo massalote lateral será do tipo

cego. O massalote cego possui um acessório - chamado de macho atmosférico - que age pressionando o metal em direção ao molde; o massalote aberto por contar com a pressão atmosférica - dispensa esse recurso. Além disso, no massalote aberto é possível se adicionar elementos - exotérmicos - que reaqueçam o metal, retardando sua solidificação. A opção por um ou outro tipo de massalote - ou mesmo a utilização dos dois tipos numa mesma peça - como pode ser observado na Figura V.7, implica no conhecimento da tendência à oxidação e da forma pela qual o metal se solidifica, sendo que esses dois parâmetros definem o sistema de canais e de massalotes.

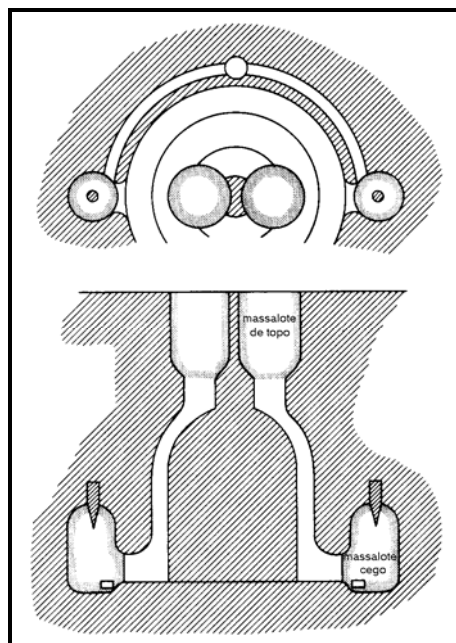


Figura V.7 - Massalotes De Topo-Aberto e Lateral-Cego numa Mesma Peça
Fonte: Foundry Technology

V.3.1 - PROJETO DO SISTEMA DE CANAIS E MASSALOTES

A definição de um sistema de alimentação passa pela definição da posição, quantidade, forma e dimensões do(s) massalote(s) e do projeto do sistema de canais, ou seja,

de que forma o metal entrará na peça e qual a posição dos masalotes em relação ao sistema de canais.

A natureza da liga a ser fundida influi no modo de vazamento e ataque. O modo de vazamento está relacionado com o grau de oxidação da liga, recomendando-se para ligas mais oxidáveis o vazamento por baixo e lento. As demais ligas costumam ser atacadas pelo plano de apartação - mais fácil - ou diretamente por cima, se a peça for bastante simples.

Já o modo de ataque depende, como dito anteriormente, do modo de solidificação da liga.

A Figura V.8 esquematiza a solidificação de uma liga de composição hipotética **A**. A zona "pastosa" - onde coexistem fase sólida e fase líquida é denominada de camada de solidificação. Assim metais puros ou ligas de composição próximas ao eutético pertenceriam ao grupo "camadas finas" enquanto as demais se enquadrariam nas ligas que se solidificam por "camadas espessas".

Neste último caso, com espessa camada pastosa (algumas ligas apresentam intervalo de solidificação superior a 100°C) ocorre nucleação independente e o líquido aprisionado ao se contrair durante o resfriamento vai deixando porosidades ao longo da peça. Alguns bronzes, por exemplo, não apresentam rechupe único, mas sim pulverizado na forma de porosidade. Na alimentação desses moldes opta-se por minimizar o tempo de enchimento da peça, lançando mão de múltiplos ataques.

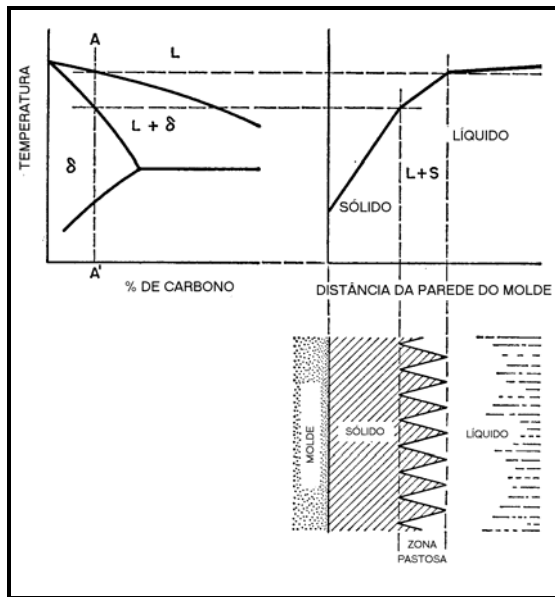


Figura V.8 - Esquema de Solidificação de uma Liga Hipoeutética
 Fonte: Foundry Engineering

Já no caso de ligas do grupo "camadas finas" procura-se direcionar a solidificação da seção mais fina para a mais espessa. A colocação de um massalote entre o canal de vazamento e a seção espessa da peça "puxará" o rechupe para o massalote, garantindo a sanidade da peça fundida. A solidificação de ferros fundidos é um caso à parte pois, durante o resfriamento, a grafita se expande compensando, *por vezes*, a contração da matriz. Assim, peças finas de ferro fundido podem prescindir de massalotes.

Conjugando as opções decorrentes do *modo de vazamento* e do *modo de ataque* resultam quatro sistemas de alimentação:

- ◆ SISTEMA 1: ataque por cima (ou pelo meio) através do massalote: recomendado para peças de aço, cobre e ferro fundido branco.
- ◆ SISTEMA 2: ataque por cima (ou pelo meio) nas partes finas: recomendado para ferro fundido cinzento e bronze.

- ◆ SISTEMA 3: ataque por baixo através do massalote: recomendado para latão, Cu-Al e liga Al-13%Si.
- ◆ SISTEMA 4: ataque por baixo nas partes finas: recomendado para ferro fundido nodular e outras ligas de Al.

V.3.2 - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MASSALOTES

O dimensionamento do sistema de massalotes pode ser feito através de diversos métodos - praticamente todos - baseados na expressão de Chvorinov (equação V.7) que relaciona tempo de solidificação com espessura solidificada, para solidificação unidirecional. A diferença entre os diversos métodos - Caine e Bishop, entre outros - está nas fórmulas adotadas ao passar do sistema unidirecional para a solidificação de peças tridimensionais. As etapas que devem ser seguidas são as seguintes:

A. Determinação das partes a serem alimentadas:

Dentre os critérios existentes para a determinação dos pontos quentes, o Método dos Módulos é um dos mais utilizados. Este processo também se baseia na equação de Chvorinov onde s - espessura - é substituído por V / A e recebe o nome de **módulo**. Nesta expressão V é o volume da peça (ou de parte da peça) em cm^3 e A a área em cm^2 que *efetivamente* participa do resfriamento, ou seja, a área superficial que está em contato com o molde. Assim peças de mesmo módulo M se solidificam no mesmo tempo, independente de sua geometria.

Pelo cálculo dos módulos das diversas partes que compõem uma peça, pode-se determinar a ordem de solidificação (quanto menor M , menor o tempo de solidificação) e os pontos quentes que se solidificam por último e que serão alimentados pelos massalotes.

Peças de geometria simples - como placas, cilindros, etc. - tem seu módulo Tabelado. O módulo - e por conseguinte o tempo de solidificação - diminui na seguinte seqüência: esfera ($d/6$) → cilindro ($d=h$, $h/6$) → barra semi-infinita ($t/4$) → placa semi-infinita ($t/2$). Daí a escolha da geometria cilíndrica para os massalotes, que conjuga elevado tempo de solidificação com facilidade de moldagem.

Quando uma junta é um ponto quente? A união (ou junta) de duas placas ou barras costuma apresentar pontos quentes por conterem mais massa metálica. Quanto mais próximos forem os valores das espessuras de duas placas maior será a tendência a que a junta seja efetivamente um ponto quente, ou seja, que se solidifique por último. Nestas regiões pode se efetuar uma alteração no projeto - vide capítulo VI.3 - ou proceder a um resfriamento localizado - através da colocação de resfriadores como forma de acelerar a solidificação da junta.

B. Determinação da quantidade mínima de massalotes:

Utiliza-se a Regra da Zona de Ação que se baseia em que a ação de um massalote é restrita a uma região no seu entorno que pode ser definida como um círculo de raio r . Existem Tabelas para alguns metais indicando qual o raio de ação de um massalote, ou seja, a que distância mínima deve ser colocado outro massalote para garantir a sanidade da peça. Normalmente o raio de ação é expresso em termos de espessura equivalente de placa ou barra semi-infinita, nas quais a transferência de calor é restrita às faces principais das placas ou barras. Neste caso é preciso se determinar primeiramente que espessura teria uma placa que se solidificasse no mesmo tempo que a seção da peça, isto é, qual a espessura da placa fictícia que possui o mesmo módulo da peça: a isto chamamos de espessura equivalente de placa.

Algumas Tabelas - como a V.1 mostrada a seguir para ferro nodular - podem considerar outros aspectos como o material do molde - não-rígido (areia-verde) ou rígido (os demais processos em areia) - e que tipo de defeito se pretende eliminar. Isto é importante

pois algumas peças admitem pequenas porosidades, enquanto outras não. Por exemplo a Tabela V.1 indica que se a peça - na forma de uma placa - for vazada em molde rígido o raio de ação poderá ser infinito - um massalote é suficiente - caso se admita um pequeno rechupe ou no caso do molde rígido pode ser nulo - nem 100 massalotes eliminarão totalmente a porosidade. Estas Tabelas devem ser vistas com certa ressalva pois elas são apenas indicativas de como o sistema deve se portar, sendo a experiência prática em projeto imprescindível.

TABELA V.1 - RAIOS DE AÇÃO PARA FERRO FUNDIDO NODULAR

TIPO DE MOLDE	DEFEITO MÁXIMO	PLACAS	BARRAS
rígido	pequeno rechupe	∞	∞
rígido	porosidade	0	∞
não-rígido	pequeno rechupe ou porosidade	0	0

Fonte: Determinação do Sistema de Massalotes e Canais - SENAI

C. Dimensionamento do(s) massalotes(s):

Como o tempo de solidificação do massalote deve ser maior do que o tempo de solidificação da região da peça que está sendo alimentada - **requisito térmico** - o módulo do massalote tem que ser maior que o módulo calculado para essa região, ou seja:

$$M_m = k' \cdot M_p \quad (V.9)$$

onde k' depende do tipo de liga, do tipo de massalote e do material do molde, como mostrado na Tabela V.2.

TABELA V.2 - VALORES DE k' PARA DIVERSAS CONDIÇÕES

CONDIÇÕES DO MASSALOTE	k'
caso geral	1.2
aquecido pelo ataque	1.1
com luva exotérmica	0.8 a 0.9
para ferro fundido em molde rígido	0.6
idem com luva exotérmica	0.5

Fonte: *Ibidem*

O que significa um valor de k' menor que 1, como os apresentados na Tabela V.2? Se adicionarmos ao massalote algo que retarde a sua solidificação - como uma luva exotérmica - poderemos ir diminuindo seu tamanho, mantendo o requisito térmico inalterado. Num massalote com luva, o rechupe pode corresponder a até 67% do volume total do mesmo, o que significa economia de metal. Luvas isolantes e/ou exotérmicas, como as mostradas na Figura V.9, são bastante empregadas como material de consumo, sendo que o custo da luva - que se situa entre R\$ 0,20 e R\$ 2,00, dependendo do tipo e tamanho - é compensado pelo aumento do rendimento metálico.

A Figura V.10 mostra como a utilização de uma luva exotérmica ($k < 1$) pode reduzir o tamanho do alimentador, sem afetar a eficiência do mesmo, ou seja, em ambos os casos o rechupe está totalmente contido no massalote, mas com a utilização da luva foi possível reduzir bastante as dimensões do mesmo.

Outra opção para melhorar o rendimento metálico e direcionar a solidificação é isolar termicamente regiões finas - através da colocação de materiais isolantes junto a essas regiões - e resfriar as seções maciças, com o auxílio de materiais com maior capacidade de extração de calor do que o molde. Desta forma é possível reduzir o tamanho do(s) massalote(s) e ao mesmo tempo garantir a sanidade da peça.

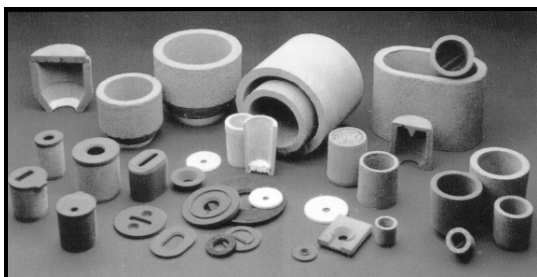


Figura V.9 - Luvas de Formatos e Tamanhos

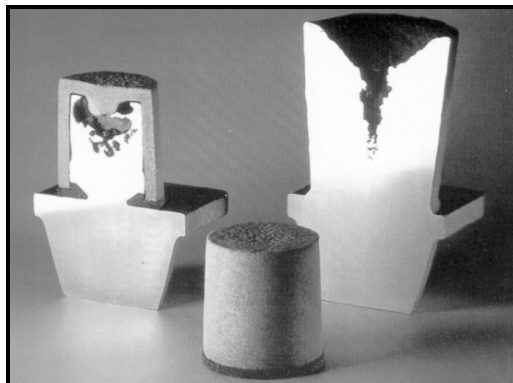


Figura V.10 - Aumento do Rendimento Metálico

Diversos
 Fonte: Catálogo Foseco

pelo Emprego de Luva no Massalote
 Fonte: *Ibidem*

A Figura V.11 mostra que a colocação de somente um massalote pode não ser suficiente para eliminar rechupes em toda a peça. As alternativas seriam a colocação de um segundo massalote (Figura V.11b), a utilização de resfriadores (Figura V.11c) ou o isolamento térmico da seção mais fina (Figura V.11d).

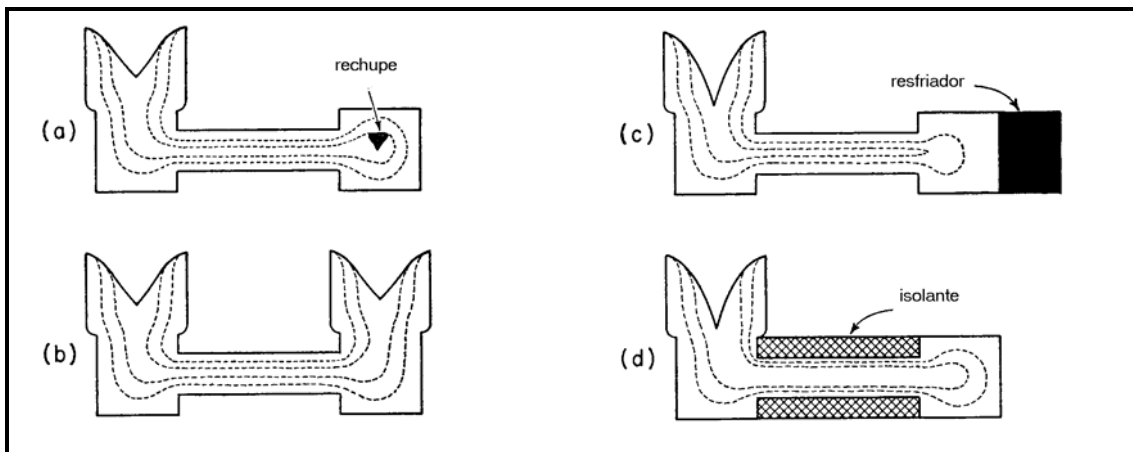


Figura V.11 - Formas de se Alimentar Seções Maciças e Isoladas
 Fonte: Foundry Engineering

O resfriador também pode ser empregado para aumentar - artificialmente - o raio de ação do massalote. A Figura V.12 exemplifica como a distância entre dois massalotes pode aumentar devido à colocação de um resfriador entre eles.

O dimensionamento desses resfriadores parte do princípio que ao reduzir o tempo de solidificação, o resfriador estará provocando uma redução do módulo *aparente* da região, ou seja, seria como se a seção nas proximidades do resfriador contivesse menor quantidade de metal. Assim posto, fica claro que o resfriador também possui um *raio de ação* e que resfriamentos bruscos (dependendo do material escolhido) podem provocar o aparecimento de trincas de contração.

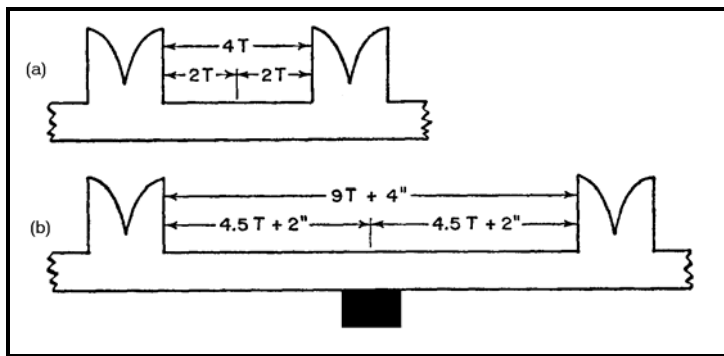


Figura V.12 - (a) - Raio de Ação em Função da Espessura de uma Placa de Aço e (b) - Efeito do Resfriador
 Fonte: Foundry Technology

Em resumo, pode-se afirmar que o projetista pode - e deve - utilizar todos esses recursos disponíveis como forma de garantir uma peça sã a baixo custo.

De posse do valor do módulo do massalote pode-se determinar o diâmetro **d** e as demais dimensões, a partir das seguintes fórmulas:

- ♦ massalote de topo aberto, com pó isolante:

$$d = 4.M_m \quad (V.10)$$

- ♦ massalote lateral cego:

$$d = h = 4,56.M_m; \quad H = 1,5.d; \quad I = (\pi.d^2) / 10 \quad (V.11)$$

onde **h**, **H** e **I** são, respectivamente, distância do topo da peça ao fim da seção cilíndrica; distância do topo da peça ao topo do massalote e área da seção estrangulada.

D. Aplicação da Regra da Contração:

Por fim resta aplicar a regra da contração, que diz que o massalote deve conter metal líquido suficiente para compensar a contração metálica. Os massalotes dimensionados através da regra dos módulos normalmente satisfazem amplamente esse requisito. A eficiência do massalote varia de 14% - massalote simples - a cerca de 70%, quando se usa luva e cobertura exotérmica, ou seja, há sempre sobra de metal. Entretanto costuma-se aplicar a regra da contração para confirmar esse requisito - **requisito volumétrico**.

$$V_m = k'' \cdot r \cdot V_p , \tag{V.12}$$

onde V_m = volume do massalote

r = coeficiente de contração volumétrica, vide Tabela V.3

V_p = volume da peça

De forma análoga ao ocorrido com k' , k'' também depende das condições do massalote conforme mostra a Tabela V.4.

TABELA V.3 - CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA DIVERSAS LIGAS

MATERIAL	% de contração
aço-carbono	2,5-3,5
alumínio	6,5
cobre	5,0
ferro fundido branco	4,0-5,5
ferro cinzento	0-2,0

Fonte: Sistema de Enchimento de Alimentação de Peças Fundidas - ABM

TABELA V.4 - VALORES DE k'' PARA DIVERSAS CONDIÇÕES

CONDIÇÕES DO MASSALOTE	k''
caso geral	6
aquecido pelo ataque	5

com luva exotérmica	4
para ferro fundido em molde rígido	3
idem com luva exotérmica	2

Fonte: *Determinação do Sistema de Massalotes e Canais - SENAI*

Outros autores apresentam Tabelas diferentes incorporando maior detalhamento, quando aparece o efeito da composição da liga e do nível de superaquecimento.

A regra da contração também pode ser usada para a determinação do número de massalotes, principalmente em peças de revolução, uma vez que Tabelas como a V.1 em muitas situações não permitem resultados quantitativos. Primeiramente se calcula o volume total de massalotes pela Regra de Contração (expressão V.9) e se divide esse volume total pelo volume de 1 massalote obtido a partir do dimensionamento de um massalote pela Regra dos Módulos (expressão V.12). Este procedimento gera uma conveniente distribuição de massalotes num dado perímetro.

Uma vez que o(s) massalote(s) será(ão) removido(s), sua localização deve ser planejada de forma a facilitar as operações de rebarbação e usinagem. A Figura V.13 mostra três opções de colocação de um dado massalote numa peça, sendo que a opção (c) é a mais conveniente, por envolver acabamento em superfície plana.

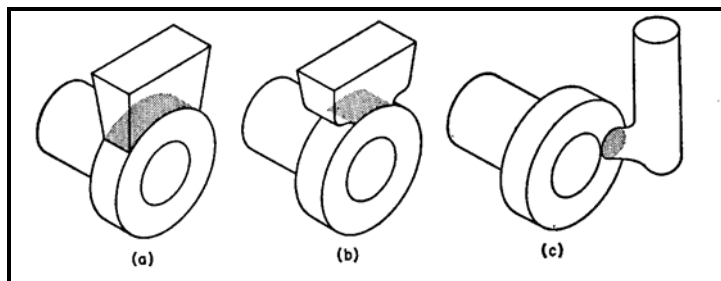


Figura V.13 - Três Opções de Posicionamento do Massalote, sendo a (c) mais Indicada
Fonte: *Foundry Technology*

O projeto de alimentadores requer muita vivência, mas esse trabalho pode ser facilitado pelo emprego de softwares que simulem - utilizando métodos de elementos finitos - o vazamento e a solidificação das peças. A partir do modelamento em 3D, é feita a simulação do enchimento da cavidade e da solidificação, o que possibilita a identificação de pontos quentes e a correção do posicionamento e dimensionamento dos massalotes. Com o perfil de temperaturas durante o resfriamento da peça também é possível avaliar a susceptibilidade da mesma ao trincamento. É importante que os softwares levem em conta - entre outros - fenômenos como a expansão gráfica e o fato de o molde ser considerado, ou não, rígido. Esses programas exigem máquinas robustas, principalmente em termos de memória RAM, e de forma alguma substituem o projetista - apenas agilizam o seu trabalho.

V.4 - SISTEMA DE CANAIS

"Um sistema de vazamento eficiente deve evitar a absorção de gases, a entrada de partículas estranhas e ter peso mínimo em relação à peça"

A Figura V.14 exemplifica um sistema de canais de alimentação com ataque no plano de apartação e as diversas partes que o compõem. Em sistemas verticais, utilizados principalmente nos processos shell e de precisão, o canal de distribuição pode ser eliminado.

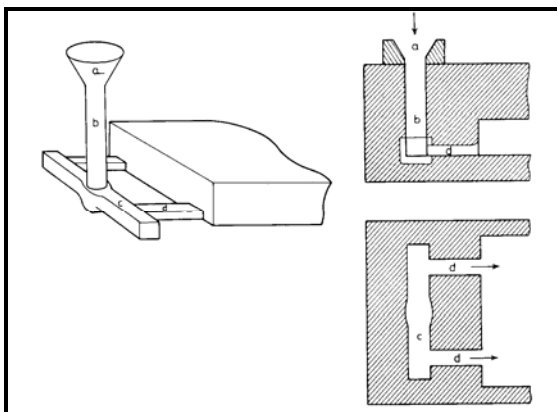


Figura V.14 - Sistema de Canais Horizontal Composto de: **(a)** - Copo ou Funil; **(b)** - Canal de Descida; **(c)** - Canal de Distribuição e **(d)** - Canais de Ataque
 Fonte: Foundry Technology

No lugar do copo de vazamento (Figura V.15) - que tem como única função facilitar a introdução do metal no molde - costuma-se usar uma bacia contendo dispositivos para minimizar a turbulência e/ou reter drosses, como pode ser visto na Figura V.16 que mostra alguns tipos de bacias.

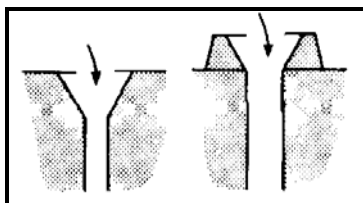


Figura V.15 - Copo interno (esquerda) ou externo (direita) ao molde
 Fonte: Fundamentals of Metal Casting

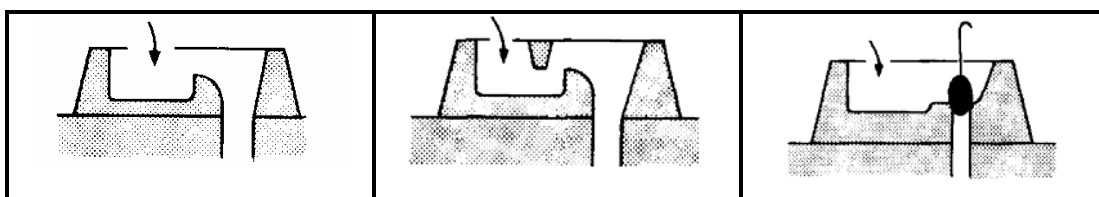


Figura V.16 - Diferentes Tipos de Bacias
 Fonte: Ibidem

Quando são colocadas várias peças num mesmo molde estas costumam ser acopladas a um único canal de distribuição, melhorando assim, o rendimento metálico. A extensão do canal de distribuição além do último ataque tem como função reter filmes de óxidos que possam ter penetrado nos canais. O canal de descida tem a forma cônica para conferir uma certa pressurização - e por conseguinte evitar que haja aspiração de ar - e a sua base costuma ter formato de um ovo, servindo como amortecedor da turbulência.

O dimensionamento do sistema de canais tem como ponto de partida a área da base do canal de descida, levando em consideração os seguintes aspectos:

- ◆ hidráulica do sistema de canais
- ◆ tempo de enchimento da peça
- ◆ grau de pressurização do sistema

V.4.1 - HIDRÁULICA DO SISTEMA DE CANAIS

Pode se aplicar as regras de hidráulica aos sistemas de vazamento de um metal num molde, principalmente quando este é constituído de poucos e simples elementos. Isto permite calcular a velocidade e a pressão em qualquer ponto do sistema, embora, de uma maneira geral, o cálculo de sistemas de canais seja feito empiricamente.

A primeira lei que pode ser aplicada é a de *conservação de massa* que - considerando-se um sistema ideal sem perdas - estabelece que:

$$a_i \cdot v_i = \text{constante} \quad (\text{V.13})$$

onde:

a_i = área do canal num ponto i

v_i = velocidade do fluxo metálico no ponto i

Assim, reduções de área de canal em qualquer ponto significam um aumento de velocidade do metal, gerando quase sempre turbulência excessiva e formação de áreas de baixa pressão que se traduzem por aspiração de ar do molde, como esquematizado na Figura V.17. Cantos vivos são outra fonte de turbulência e aspiração de ar como pode ser visto nas Figuras V.17 e V.18. A solução adotada para ambos os casos é se evitar alterações bruscas de espessura e adoçar os cantos vivos.

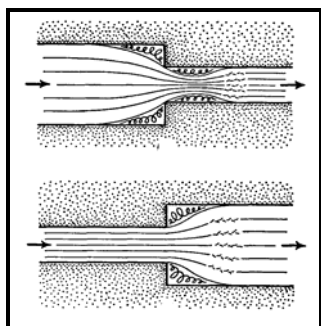


Figura V.17 - Alteração Brusca de Seção Gera Turbulência e Arraste de Ar
Fonte: Foundry Engineering

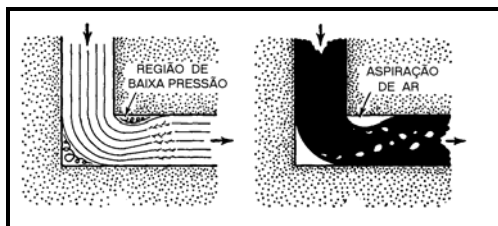


Figura V.18 - Cantos Vivos Também Geram Turbulência e Arraste de Ar
Fonte: Ibidem

Outra lei que é bastante empregada diz respeito a equação de *conservação de energia* e é conhecida como equação de Bernoulli.

$$h_i + (v_i^2 / 2g) + (p_i / \rho) = \text{constante} \quad (\text{V.14})$$

onde,

h - altura metalostática

v - velocidade

p - pressão

ρ - densidade do líquido

Segundo esta expressão a energia potencial se transformará em energia cinética e pressão, caso não hajam perdas no sistema. Com isto devem ser evitados canais muito longos que geram turbulência e elevada pressão metalostática. Além do aumento de velocidade há o efeito de erosão do molde, que também é prejudicial.

Em resumo, um sistema que pretenda minimizar turbulência e aspiração de ar deve conter:

- ◆ bacia de vazamento
- ◆ fundo de canal
- ◆ canal de descida cônico
- ◆ cantos arredondados

Além da utilização de bacias, uma opção, bastante empregada para a minimização de óxidos e partículas estranhas na peça fundida é o emprego de filtros descartáveis. Os filtros podem ser do tipo telas ou blocos padronizados. Os filtros tipo tela (Figura V.19a) são feitos a partir de fibras trançadas, enquanto que os filtros em blocos (Figura V.19b) são produzidos em espumas cerâmicas revestidas - ou não - com tintas refratárias.

Filtros tridimensionais são encontrados no mercado com geometria e tamanhos diversos, devendo se adequar ao dimensionamento dos canais e apresentar porosidade

tão menor quanto maior for a fluidez do metal a ser vazado. O posicionamento desses filtros também pode variar de acordo com o projeto e, além de funcionar como retentores de escórias, eles podem atuar minimizando a turbulência nos canais (Figura V.20). Seja qual for o tipo escolhido e sua localização, não se pode esquecer de alargar a região onde o filtro será colocado de forma a manter a área útil de vazamento constante, evitando assim, problemas mencionados anteriormente.

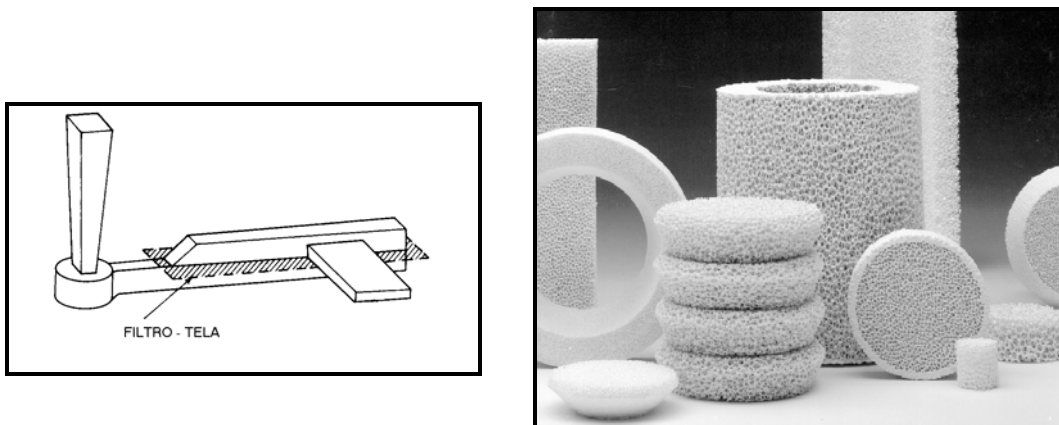


Figura V.19 - Utilização de Filtros no Sistema de Canais
(a) filtro-tela *Fonte: Foundry Technology*
(b) filtro em espuma cerâmica *Fonte: Catálogo Udicell*

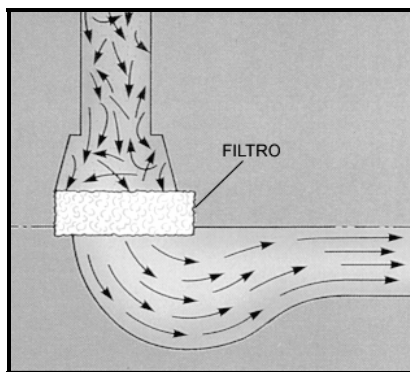


Figura V.20 - Filtro Posicionado junto à Base do Canal de Descida
Fonte: Catálogo Foseco

V.4.2 - TEMPO DE ENCHIMENTO DA PEÇA

O tempo de enchimento da peça (**t**) pode ser calculado de forma empírica - ou a partir de ábacos - e confrontado com fórmulas como a V.15 que levam em conta o peso da peça (**W**), a densidade do metal (**ρ**), a área de seção do canal (**a**) e a altura na seção considerada (**h**):

$$t = W / (\rho \cdot a \cdot \sqrt{2gh}) \quad (V.15)$$

Esta fórmula também poderia ser usada para - uma vez conhecido o tempo de enchimento - se determinar a seção do canal de descida. De posse da área da base do canal de descida faltaria apenas definir a seção dos demais canais, levando em conta a opção ou não pela pressurização do sistema.

V.4.3 - PRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA

A princípio pode ser interessante se adotar o sistema pressurizado de canais, sistema este que pressupõe uma diminuição gradativa da área (ou somatório de áreas) dos canais ao se passar do canal de descida para o de ataque. Como vantagem há uma maior certeza de se manter os canais sempre cheios, sendo isso fundamental para evitar aspiração de ar. Entretanto, com o aumento da velocidade do líquido e da pressão aumentam os riscos de turbulência e lavagem da areia. A Figura V.21 mostra um exemplo de sistema pressurizado (a) e um não pressurizado (b). A opção pelo sistema não-pressurizado normalmente é sugerida para o vazamento de ligas fortemente oxidáveis, quando se prioriza o enchimento lento, a fim de evitar formação e arraste de filmes de óxidos.

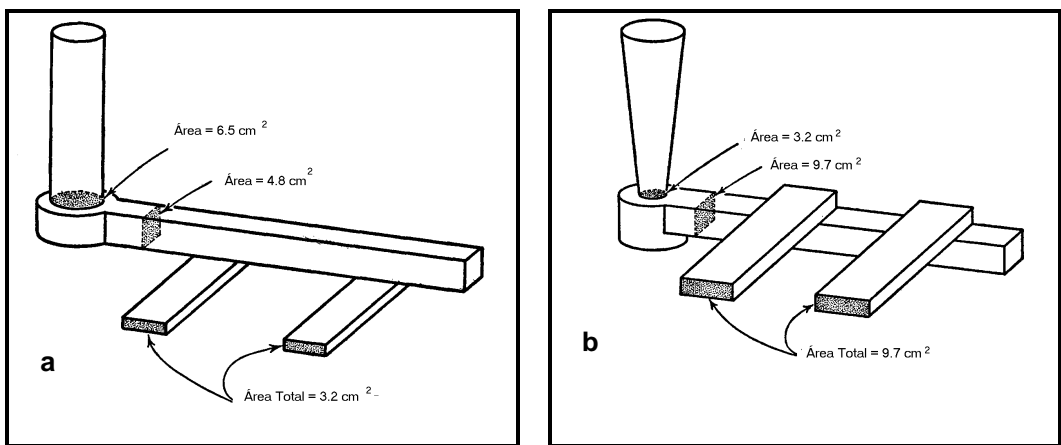


Figura V.21 - (a) - Sistema Pressurizado - razão 1 : 0.75: 0.5 e
 (b) - Sistema Não-Pressurizado - razão 1 : 3 : 3
 Fonte: Foundry Engineering

Atualmente tem vindo à tona a idéia de se dispensar o sistema de canais, vazando diretamente pelo massalote, metodologia antes restrita a peças simples e pequenas. Neste caso é importante utilizar luvas e sistemas de filtragem especialmente desenvolvidos para tal. A Figura V.22 mostra, de forma esquemática, a substituição do sistema convencional de canais e alimentadores pelo sistema de vazamento direto, com aumento óbvio do rendimento metálico.

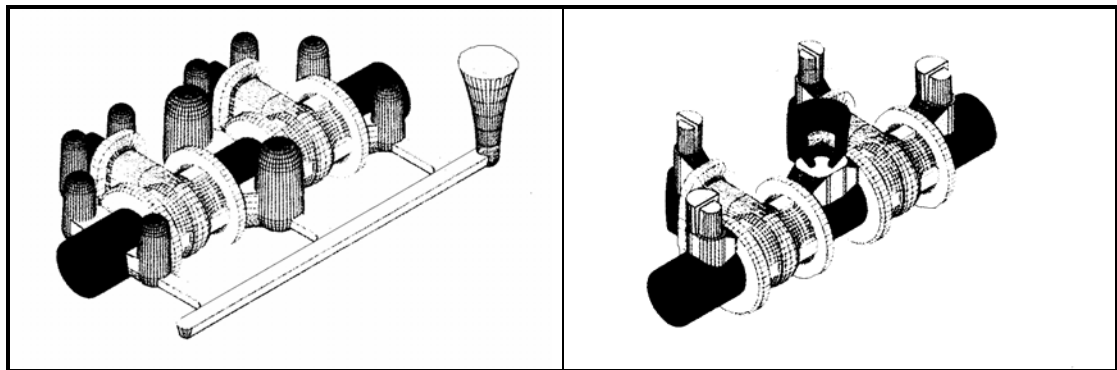


Figura V.22 - Vazamento Convencional (esquerda) versus Vazamento Direto (direita)
 Fonte: Catálogo Foseco

VI. ACABAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE

VI.1 - ACABAMENTO E INSPEÇÃO

"O controle de qualidade não se restringe à verificação da sanidade da peça pronta; ao contrário deve acompanhar todo o processo, da encomenda à expedição "

Após a solidificação as peças são desmoldadas e encaminhadas ao setor de acabamento. A desmoldagem pode ser feita manualmente com martelos e vergalhões ou com o auxílio de desmoldadores vibratórios. Esses equipamentos são constituídos de uma grade com um mecanismo vibratório; assim a areia passa pela grade, caindo em silos, quando se inicia a reciclagem da mesma.

As etapas de acabamento compreendem o seccionamento dos canais (por impacto, prensa ou corte); a limpeza da peça por jateamento de areia ou de granalha de aço, seguido de rebarbação, tratamento térmico (opcional) e acabamento propriamente dito (usinagem, furação, etc.). Após cada uma dessas etapas as peças são inspecionadas e as com defeitos visíveis são separadas do lote.

Dependendo da extensão dos defeitos e da especificação da peça, essas falhas podem ser reparadas por solda, por impregnação com resinas (para "fechar" porosidades) ou significar o sucateamento e posterior refusão da peça.

A inspeção da peça fundida abrange um ou mais dos seguintes métodos:

- ◆ visual

- ◆ dimensional (traçagem): tolerância de $\approx 2\%$ para peças comuns e $< 0,5\%$ para peças de precisão

- ◆ por pesagem: tolerância de $\approx 2,5\%$

- ◆ metalúrgica: dureza, ensaio de tração e microestrutura.

- ◆ líquidos penetrantes ou partículas magnéticas.

- ◆ ultra-som ou Raios-X .

A inspeção visual - pela sua simplicidade - é realizada em todas as peças e em diferentes etapas.

As inspeções dimensional, por pesagem e metalúrgica são feitas em pequenos lotes-teste quando se está acertando parâmetros de projeto e - por amostragem - durante a produção propriamente dita.

Para os ensaios mecânicos muitas vezes é fundido um corpo de prova em separado - como apêndice da peça - para que se possa avaliar o comportamento da mesma a partir dos resultados dos ensaios. É preciso se ter cuidado nessas extrapolações pois o fundido é sujeito a alterações de microestrutura provenientes de diferentes velocidades de solidificação e outros aspectos como microsegregações ou porosidade que irão afetar o comportamento mecânico.

Já os ensaios não-destrutivos devido a sua complexidade, principalmente na interpretação dos resultados, normalmente são feitos por terceiros e somente se acordados entre fundição e cliente. Os ensaios de *líquidos penetrantes* ou *partículas magnéticas* são

empregados na detecção de defeitos superficiais, como por exemplo, trincas. Já o *ultrassom* e o *Raios-X* são mais adequados para a identificação de defeitos internos como porosidade, juntas frias ou rechupe.

Recentemente foram desenvolvidos métodos de controle microestrutural por ensaios não-destrutivos, como ultrassom e correntes parasitas. Embora a implantação dessas técnicas demandem um grande volume de trabalho para se correlacionar sinais com parâmetros microestruturais como tipo de grafita e/ou fases presentes, apresentam como vantagem a possibilidade de se examinar a peça toda (ou regiões críticas da mesma) e não somente - como normalmente é feito - amostras fundidas em separado. Para fundições que produzam pequena variedade de peças em grandes lotes, o custo de implantação desses ensaios pode ser compensado a curto ou médio prazo.

VI.2 - DEFEITOS

"Os defeitos de fundição raramente podem ser atribuídos a uma única causa"

A minimização da taxa de refugo de uma fundição passa pelo acompanhamento do histórico da peça - da encomenda à expedição - com registros detalhados das rotinas de fusão empregadas e da composição de todos os materiais envolvidos (areia, resina, metal, etc.). A confecção, a partir da experiência de cada fundição, de atlas descrevendo os defeitos mais comuns, as causas encontradas e a solução adotada podem ajudar bastante na elucidação de novos casos. Além disso a viabilidade de qualquer solução proposta deve ser testada primeiramente num pequeno número de peças antes de ser implementada em todo o lote de peças. Formalmente podemos classificar os defeitos em externos ou internos:

VI.2.1 - DEFEITOS EXTERNOS

A. Movimentação de caixas e machos (Figura VI.1): dependendo de sua extensão podem levar a peça ao sucateamento

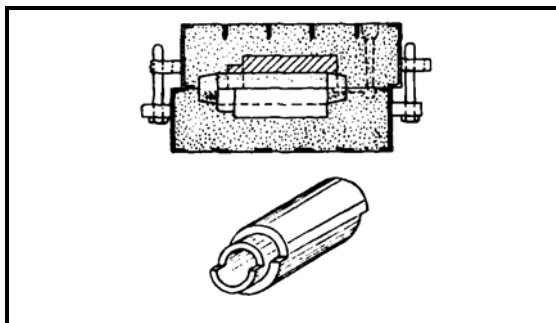


Figura VI.1a - Movimentação da Caixa de Moldagem

Fonte: *Tecnologia de la Fundicion*

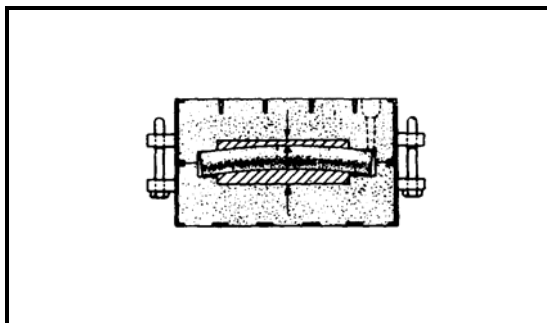


Figura VI.1b - Movimentação do Macho

Fonte: *Ibidem*

B. Mau acabamento:

Esse defeito decorre da reação metal-areia ou da inadequação da granulometria da areia base, podendo gerar um mau acabamento em toda a peça ou ser um defeito localizado. Por exemplo, alumínio vazado em molde feito com areia grossa resultará numa peça com rugosidade elevada.

Para uma areia corretamente escolhida, a densidade do molde poderá ser a causa desse tipo de defeito. Uma areia fracamente socada facilita a lavagem da mesma pelo metal - Figura VI.2, enquanto que a excessivamente socada também pode ser a causa do defeito. Com resistência excessiva a areia pode trincar devido à dilatação térmica favorecendo a erosão (Figura VI.3) ou formar um sulco na peça - denominado "rabo de rato" - como mostrado na Figura VI.4. É lógico que a extensão da dilatação depende também da temperatura de vazamento e do projeto do fundido, que pode criar regiões superaquecidas.

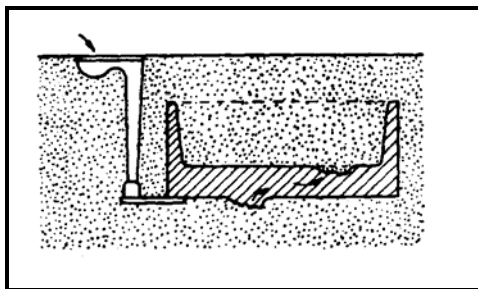
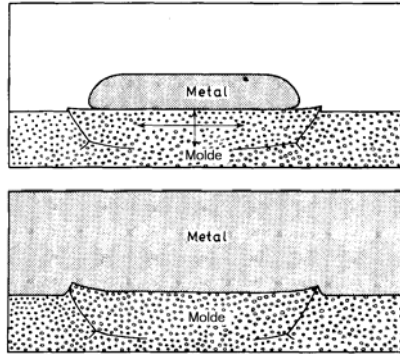
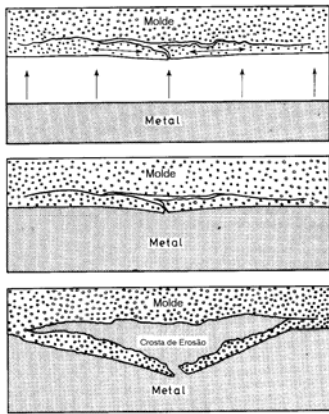


Figura VI.2 - Erosão do Molde Decorrente de Lavagem
Fonte: Ibidem



VI.3 - PROJETO

"O projeto deve visar economia e simplificação garantindo, porém, a qualidade da peça"

O engenheiro ou técnico projetista normalmente possui conhecimentos de projeto mecânico, de metalurgia e de informática. Cabe a ele adaptar o desenho inicial do cliente de modo a produzir peças sãs, que possam ser produzidas a um baixo custo e no prazo solicitado. Principalmente na fundição de aço os cuidados com o projeto devem ser intensificados já que as temperaturas envolvidas são maiores e esse metal apresenta elevada contração volumétrica, aumentando a tendência ao trincamento. Daí que praticamente toda a bibliografia que aborda análise de projetos é voltada para a fundição de aço.

Durante a fase do projeto deve ser escolhida a posição da peça no molde que definirá a maior ou menor facilidade na extração do modelo, o número e a complexidade de cada um dos machos, dificuldades de montagem e rebarbas mal posicionadas e problemas na alimentação. Às vezes uma simples alteração da posição da peça no molde pode resolver defeitos de alimentação persistentes. Tudo isso é determinado levando em conta o metal a ser fundido (propriedades mecânicas, características físicas, etc.), o molde (material empregado, características do processo, etc.) e principalmente o número de peças a serem produzidas. Por fim, uma determinada opção pode ser conveniente para um lote de peças reduzido e não o ser para grandes tiragens.

Em resumo, as definições de projeto devem considerar os seguintes tópicos:

- ◆ processo de moldagem
- ◆ apartação do modelo
- ◆ contração do metal
- ◆ sobremetal para acabamento
- ◆ temperatura de vazamento
- ◆ número de peças encomendadas

Alguns sugestões de alterações de projeto visando economia de material e boas propriedades metalúrgicas são apresentados a seguir, devendo, entretanto, serem negociadas previamente com o cliente:

A. Substituição de paredes grossas por paredes finas e nervuradas: como visto na Figura VI.5, essa modificação pode significar economia de metal, maior leveza da peça e minimização de pontos quentes.

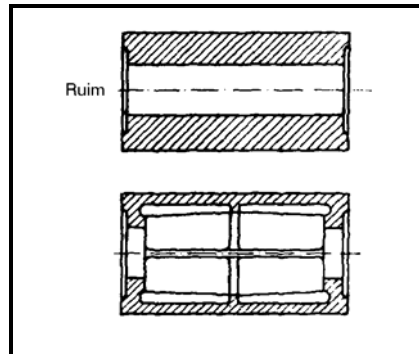


Figura VI.5 - A Modificação Resulta numa Peça mais Leve e Compacta
Fonte: Tecnologia de la Fundicion

B. Equalização de espessuras: Figura VI.6a e Figura VI.6b - da mesma forma pode significar menor porosidade e menor tendência ao trincamento.

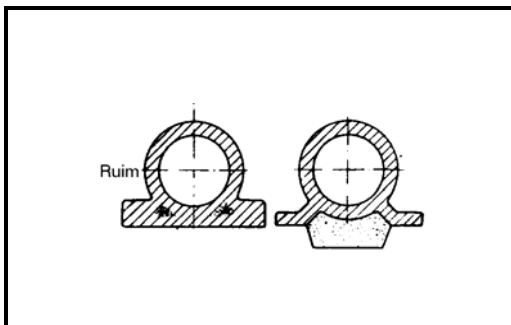


Figura VI.6a - Com a Modificação os Rechupes são Minimizados
Fonte: Ibidem

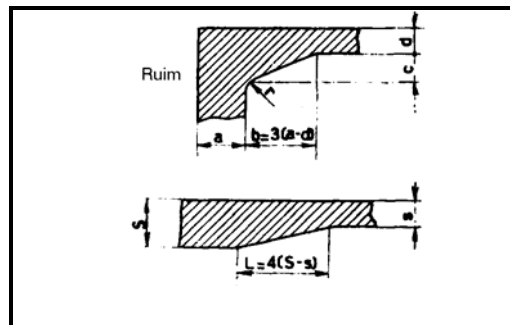


Figura VI.6b - Minimização de Rechupes e de Trincas de Contração
Fonte: Ibidem

C. Minimização de pontos quentes: Figura VI.7 - pequenas modificações de projeto podem ser efetivas - ao lado da utilização de resfriadores - no sentido de minimizar os pontos quentes.

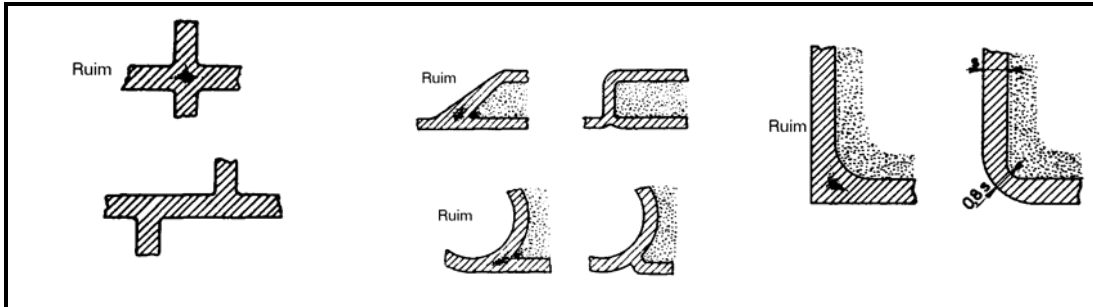


Figura VI.7 - Formas de Eliminar Pontos Quentes por Alteração de Projeto
Fonte: *Ibidem*

D. Minimização das tensões internas: peças com elevada simetria tendem a concentrar mais as tensões durante o resfriamento, podendo levar a peça ao trincamento. A Figura VI.8 mostra formas de - através de modificações no projeto - se reduzir as tensões no material.

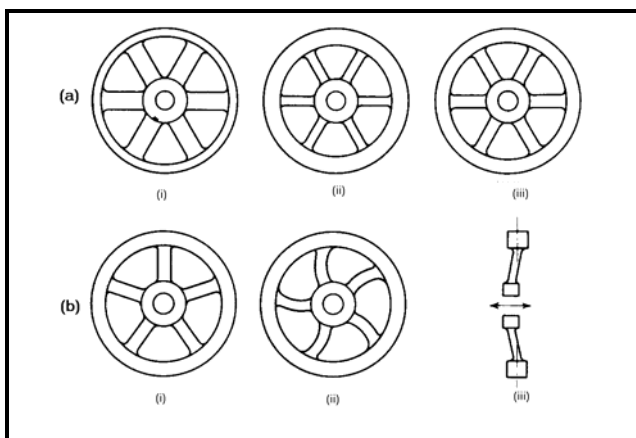


Figura VI.8 - **(a)** - Situação (iii) Melhor que (i) e (ii) pois Apresenta Espessura Uniforme
(b) - Número Ímpar de Aros (i), Raios Curvos (ii) e Falta de Axialidade (iii) Minimizam as Tensões Durante o Resfriamento
Fonte: *Foundry Technology*

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. Catálogos Técnicos de Fabricantes de Maquinários e Insumos para Fundição.
2. Associação Brasileira de Fundição – ABIFA – <http://www.abifa.org.br>
3. Fundição e Matéria Prima – Revista veiculada pela ABIFA
4. Determinação dos Sistemas de Massalotes e Canais - Publicação Técnica número 17, vol. 4, SENAI-MG, 1987.
5. Estudo de Moldagem-Tipo - L. Laine e H. Coste; ABM, São Paulo, 1973, 82 pps.
6. Foundry Engineering - H.F. Taylor, M.C. Flemings e J. Wulff; John Wiley & Sons, Inc.; 1965, 407 pps.
7. Foundry Technology - P. R. Beeley; London Butterworths, 1972, 544 pps.
8. Fundamental in the Production and Design of Castings, Marek, Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1961, 383pps.
9. Fundamentals of Metal Casting - R.A.Flinn; Addison-Wesley Pub. Co., 1963, 324pps.
10. Fundição - M. Siegel, ABM, São Paulo, 1981.
11. Fundição e sua Performance, ABIFA / CONSIDER, 1982, 81 pps.
12. Heat Treatments, Structure and Properties of Nonferrous Alloys - Charlie R. Brooks; ASM, 1995, 420 pps.
13. Metals Handbook - 10ª edição, vol. 1, 2 e 15, ASM.
14. Operação de Fornos de Indução - L. Fernandes Jr.; ABM, 1986, 539 pps.
15. Padrões de Fabricação para Aços Fundidos, vol. 1: Projetos de Fundição - Y. Maehara; ELF Com. e Ind. de Produtos Químicos, 1989, 175 pps.
16. Princípios Metalúrgicos da Fundição - V. Kondic; Editora Polígono (USP), São Paulo, 1973, 340 pps.
17. Principles of Metal Casting, R.W. Heane, C.R. Lopes Jr. e P.C. Rosenthal, McGraw-Hill, 2nd ed., 1967.
18. Processo Shell: Materiais e Tecnologia, H. Berndt, Série ABIFA, 1989, 240 pps.

19. Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos - M.R. Gomes e E. Bresciani Filho; ABM, São Paulo, 1985, 279 pps.
20. Revista Fundição e Matérias Primas - Informativo Oficial da ABIFA (Associação Brasileira de Fundição).
21. Sistemas de Enchimento e Alimentação de Peças Fundidas, C.L. Mariotto; E. Albertin e R. Fuoco, ABM, 1987, 134 pps.
22. Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas - M.P. Campos Filho e G.J.Davies, São Paulo, 1978, 246 pps.
23. Tecnologia de la Fundicion - E. Capello; Ed. Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1974, 493 pps.