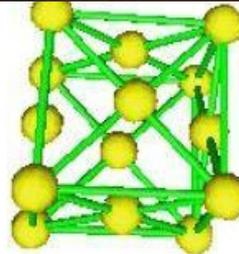
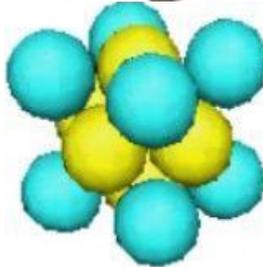


CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO  
TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA  
GERÊNCIA EDUCACIONAL DE METAL MECÂNICA  
CURSO TÉCNICO DE MECÂNICA INDUSTRIAL



# PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

## FUNDIÇÃO

Prof. Eng. Mec. Norberto Moro  
Téc. Mec. André Paegle Auras

[www.norbertocefetsc.pro.br](http://www.norbertocefetsc.pro.br)

FLORIANÓPOLIS - 2007

## Sumário

Apresentação .....	3
A Obtenção do Aço.....	4
<b>1. Generalidades .....</b>	<b>6</b>
1.1 Introdução .....	6
1.2 Etapas do processo de fundição .....	6
1.3 Seleção do processo.....	8
1.4 Características e defeitos dos produtos fundidos.....	8
1.5 Exercícios .....	8
<b>2. Processos de Fundição .....</b>	<b>9</b>
2.1 Areia verde.....	9
2.2 Em casca (shell molding) .....	11
2.3 Cera perdida (fundição de precisão) .....	14
2.4 Molde permanente .....	15
2.5 Injeção .....	17
2.6 Comparação entre processos .....	19
2.7 Automatização dos processos .....	19
2.8 Exercícios .....	20
<b>3. Teoria da Solidificação.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução .....	21
3.2 Nucleação (início da solidificação) .....	21
3.3 Estrutura cristalina .....	22
3.4 Defeitos na Estrutura Cristalina.....	23
3.5 Desenvolvimento da macroestrutura.....	24
3.6 Exercícios .....	25
Resposta dos exercícios.....	26
Referências Bibliográficas .....	28

## Apresentação

O processo de fundição é utilizado pelo homem há mais de 6.000 anos, iniciando-se com metais de baixo ponto de fusão (Cobre, Bronze) e posteriormente com o ferro. Em fornos rudimentares de pedras e cerâmicas, fundia-se minérios de metais para confecção de armas e adornos.

A fundição foi se desenvolvendo aos poucos, sendo que na Idade Média a produção tinha grande importância, especialmente para fins militares. Nessa época utilizava-se a “forja catalã”, desenvolvida na Península Ibérica, que consistia basicamente numa lareira industrial. Obtinha-se uma massa pastosa com um tipo grosseiro de ferro fundido pela redução direta do minério. Solidificado, tornava-se frágil e quebradiço, exigindo que os artefatos fossem grossos e pesados.

Por volta de 1450 iniciou-se a obtenção intermediária do ferro gusa, a partir de temperaturas mais altas e conseqüente absorção de maior quantidade de Carbono. O melhor desempenho mecânico do material obtido permitiu a fabricação de armas de fogo (canhões, baionetas, etc.). Mas o grande desenvolvimento do processo foi impulsionado pela revolução industrial inglesa, que incluiu o coque (derivado do carvão mineral) como substituto do carvão vegetal, fornos elétricos e a mecanização do processo. Ao século XX coube a tarefa de aperfeiçoar tais desenvolvimentos.

No Brasil, a produção em quantidade de ferro gusa deu-se na segunda guerra mundial (1938-45), quando foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional com o primeiro alto-forno, como incentivo norte-americano ao apoio de Getúlio Vargas pró aliados. Hoje conta com grande parque industrial que busca constante desenvolvimento frente à concorrência internacional.

A fundição se destaca dos outros métodos principais de processos de fabricação não só por ser um dos mais antigos, mas porque é um dos mais versáteis, principalmente quando se considera os diferentes formatos e tamanhos das peças que se pode produzir por esse processo. Pode ser considerado tanto um processo inicial, produzindo lingotes para laminação e forjamento, quanto intermediário, produzindo peças semi-acabadas que sofrerão posterior usinagem.

As generalidades da fundição, bem como os principais processos e noções sobre teoria da solidificação serão abordados nesta apostila. Somos gratos aos autores das apostilas, livros e artigos os quais foram fundamentais para esta apostila e que estão devidamente citados nas referências bibliográficas.

## A Obtenção do Aço

É comum comparar-se as siderúrgicas a cozinhas gigantes. A imagem procede – como na preparação de um prato, a fabricação do aço requer a mistura dos ingredientes em um forno, do qual se retira um produto que é a composição dos itens iniciais. A diferença principal entre os procedimentos está na ordem de grandeza da temperatura de “cozimento”. Enquanto o forno doméstico se limita a poucas centenas de graus Celsius, os alto-fornos das siderúrgicas rompem a fronteira dos milhares.

O aço é, basicamente, uma liga de ferro com carbono. Para preparar o aço, são três os componentes básicos: minério de ferro, coque e calcário (carbonato de cálcio). O coque é o resíduo resultante do aquecimento do carvão em um equipamento chamado câmara de coqueificação, na ausência de oxigênio. Os componentes mais voláteis do carvão (compostos orgânicos – formados por cadeias de carbono – de peso molecular variável) evaporam e sofrem decomposição térmica, separando-se da matéria original. O sólido que resta é o coque.

No alto-forno, o coque tem duas funções importantes: é o combustível (libera energia ao reagir com oxigênio) e “captura” o oxigênio que está associado ao ferro no minério. Assim, obtém-se o ferro livre de oxigênio. Ao se fornecer o aquecimento ao alto-forno, o carbono do coque reage com o oxigênio, gerando monóxido de carbono e intenso calor. Este monóxido então, reage com o oxigênio do minério de ferro. O resultado é o dióxido de carbono, também conhecido como gás carbônico.

O calcário serve para facilitar a separação entre o ferro fundido e a escória (componentes do minério de ferro que não interessam para a fabricação do aço). Aquecido, o calcário se decompõe em cal e dióxido de carbono. A cal se incorpora à escória (óxidos de silício e alumínio) e abaixa a temperatura na qual a escória se funde. Ela sai do forno líquida e por cima do ferro fundido, do qual é separada. Excessos de enxofre no carvão também são retirados, em boa parte, pela reação com a cal (forma-se sulfeto de cálcio).

O ferro que sai do alto-forno, ainda impuro e com teor de carbono alto, é chamado de ferro gusa. Esse ferro contém manganês, silício, enxofre e outros contaminantes. Alguns são até desejáveis em certos tipos de aço, mas no gusa estão em proporções descontroladas. O processo de refino mais usado hoje é o de oxigênio básico, ou LD (Linz-Donavitz, austríacos que o criaram na década de 1950). Um carro-torpedo recolhe periodicamente o gusa do alto-forno e o leva a um equipamento chamado conversor, onde a temperatura média é 1.600°C. Um sopro de oxigênio puro é injetado para dentro do conversor, através de um tubo de aço.

Controlando rigidamente a quantidade de oxigênio, fixa-se o teor de impurezas que se pretende eliminar. Os contaminantes reagem com o oxigênio e formam compostos voláteis. As reações que acontecem dentro do conversor

liberam muita energia. Por isso, o processo se auto-sustenta – é desnecessário “alimentá-lo” com energia externa.

O processo do oxigênio básico é um aperfeiçoamento do refino desenvolvido pelo engenheiro inglês Henry Bessemer (1812-1898). A diferença fundamental é que Bessemer trabalhava com fluxos de ar, não de oxigênio puro. Isso fazia aumentar a quantidade de nitrogênio do aço, o que o tornava quebradiço. Bessemer sabia que o uso de ar comprometia seu método, mas rendia-se às limitações tecnológicas de sua época – era impossível obter oxigênio com alta grau de pureza em 1856.

O aço líquido é vazado em moldes, nos quais esfria e se solidifica. Daí resultam os lingotes, de massa variável. O lingote irá para processos de conformação mecânica, como forjamento ou laminação, para formar perfis planos (chapas) e não planos (trilhos, tubos, perfis, etc.).

O conversor produz o aço comum e alguns tipos de aço baixa liga; é um processo rápido ( $\pm 20$  minutos) e de alta produção. Mas quando há necessidade de um aço com características especiais, como por exemplo resistência ao calor, corrosão, impacto e etc., o processo para sua obtenção é feito em fornos elétricos que atingem temperaturas de até  $3.500^{\circ}\text{C}$ . Isso significa eliminação de uma maior quantidade de impurezas, principalmente o “S” (enxofre). O processo é mais lento, porém isso é necessário para os elementos de liga adicionados reagirem com o Fe-C, dando origem a um aço especial, também chamado de aço liga com elevada resistência mecânica.

# 1. Generalidades

## 1.1 Introdução

O processo de fundição consiste em vaziar (despejar) metal líquido num molde contendo uma cavidade com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada. Não se restringe apenas às ligas de aço, mas a vários tipos de ligas metálicas, desde que apresentem temperatura de fusão<sup>1</sup> não elevada e fluidez<sup>2</sup> adequada. Os mais utilizados são: aços, ferros fundidos, alumínio, cobre, zinco, magnésio e respectivas ligas.

A fundição permite obter, de modo econômico, peças grandes ou de geometria complexa, sua principal vantagem em relação a outros processos. Porém existem também desvantagens. Os aços fundidos, por exemplo, podem apresentar elevadas tensões residuais, microporosidade e variações de tamanho de grão. Tais fatores resultam em menor resistência e ductilidade, quando comparados aos aços obtidos por outros processos de fabricação, como conformação a quente.

Existem muitas variantes no processo de fundição (grau de automação, produtividade, precisão dimensional, acabamento superficial, etc.), entretanto destaca-se a influência do tipo de molde nas propriedades físicas do material resultante. Por exemplo, a taxa de dissipação de calor através do molde determina o tamanho final de grão, e portanto a característica de resistência mecânica da peça. Logo, é o tipo de molde que determina a qualidade da peça.

Por este motivo os processos de fundição são muitas vezes classificados de acordo com o tipo de molde utilizado. Além disso, podem também ser classificados pela força ou pressão usada para preencher o molde com o metal líquido (por gravidade ou por pressão). Os processos típicos podem ser classificados em cinco grupos:

<i><b>Tipo de Força</b></i>	<i><b>Tipo de Molde</b></i>
Por gravidade	Areia verde (molde descartável)
	Em casca (shell molding)
	Molde permanente (molde metálico, bipartido)
	Cera perdida (molde e modelo são descartáveis)
Por pressão	Injeção (molde metálico).

## 1.2 Etapas do processo de fundição

Apesar do grande número de variantes dos processos de fundição, a obtenção dos diferentes tipos de peças pode ser resumida nas seguintes operações (processo de fundição por gravidade em areia):

<sup>1</sup> Temperatura de fusão: temperatura em que o metal passa do estado sólido para o líquido.

<sup>2</sup> Fluidez: capacidade de uma substância escoar com maior ou menor facilidade. A água tem mais fluidez que o óleo, porque escorre com mais facilidade.

1. Confecção do modelo (modelação): consiste em construir um modelo com o formato da peça a ser fundida. Serve para construção do molde, e suas dimensões devem prever a contração do metal quando ele se solidificar, bem como um eventual sobremetal para posterior usinagem da peça (ver tabela ao lado). Pode ser feito de madeira, metal, plástico, gesso, etc.

Material	Contração
Aços	1,5 a 2,0%
Ferro fundido cinzento	0,8%
Ferro fundido dúctil	0,8 a 1,0%
Alumínio 355 e 356	1,5%
Alumínio 13	1,0%
Cobre-Cromo	2,0%
Bronze ao Estanho	1,0%
Bronze ao Silício	1,0%
Bronze ao Manganês	1,5%
Bronze Alumínio	1,5%

Tabela: Contração em função do material

2. Confecção do molde (moldagem): é o dispositivo no qual o metal fundido é colocado para que se obtenha a peça desejada. É feito de material refratário<sup>3</sup> e é moldado sobre o modelo que, após retirado, deixa uma cavidade com o formato da peça.
3. Confecção do macho (macharia): é um dispositivo, também feito de refratário, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. São colocados nos moldes antes que eles sejam fechados para receber o metal líquido.



Moldes prontos

4. Fusão: aquecimento do metal para fundi-lo, deixando-o em estado líquido.
5. Vazamento: é o enchimento do molde com metal líquido.
6. Desmoldagem: é a retirada do molde e macho após a solidificação da peça, podendo ser manualmente ou por processos mecânicos.
7. Rebarbação e limpeza: é a retirada dos canais de alimentação<sup>4</sup>, massalotes<sup>5</sup> e rebarbas que se formam



Vazamento no molde

- durante a fundição, além da retirada das incrustações do molde na peça fundida, geralmente por meio de jatos abrasivos.
8. Controle de qualidade: verificação da conformidade da peça (ausência de defeitos).

<sup>3</sup> Material que pode resistir às altas temperaturas dos metais líquidos. São usadas nas paredes de fornos e moldes de fundição, e são geralmente cerâmicas, como dolomita, magnesita e sílica.

<sup>4</sup> Canais de alimentação são os canais ou condutos por onde o metal líquido passa para chegar ao molde.

<sup>5</sup> Massalote é uma reserva de metal para compensar a contração do material líquido que vai se resfriando. Para compensar a contração da peça sólida, o molde é construído com sobremetal.

### 1.3 Seleção do processo

O tipo de processo a usar deve ser escolhido adequadamente. Os mais importantes fatores a considerar são:

- Quantidade de peças a produzir;
- Projeto da fundição;
- Tolerâncias requeridas;
- Grau de complexidade;
- Especificação do metal;
- Acabamento superficial desejado;
- Custo do ferramental;
- Comparativo econômico entre usinagem e fundição;
- Limites financeiros do custo de capital;
- Requisitos de entrega.

### 1.4 Características e defeitos dos produtos fundidos

As peças fundidas possuem algumas características inerentes a este processo, tais como:

- Sobremetal, que será desbastado na usinagem;
- Ausência de furos pequenos e detalhes complexos, pois dificultam o processo e podem ser realizados mais facilmente por usinagem;
- Cantos arredondados e paredes mais grossas, para evitar trincas e melhorar o preenchimento com metal líquido.

Os defeitos mais comuns das peças fundidas são:

- Inclusão de material refratário do molde na peça, causando defeitos superficiais e problemas para usinagem (formam abrasivos para as ferramentas da usinagem);
- Heterogeneidade na composição da liga metálica, causando o aparecimento de partículas, segregações, etc.;
- Rechupe, que é a falta de material causado por projeto de massalote mal feito;
- Porosidade, originado nos gases não eliminados durante o processo de vazamento e solidificação, causando fragilidade e defeitos superficiais.

### 1.5 Exercícios

1. Defina molde e modelo.
2. O que são massalotes e qual sua importância?
3. Cite 3 fatores a considerar para a escolha de um processo de fundição.
4. Cite duas características que uma peça fundida possui.

## 2. Processos de Fundição

### 2.1 Areia verde

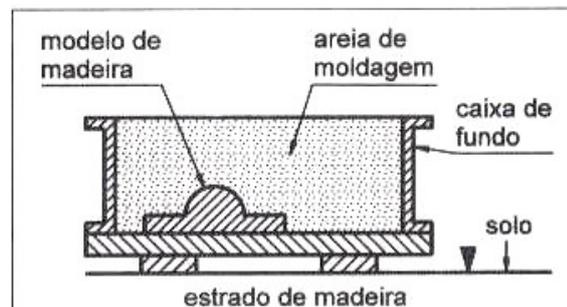
Existem muitos processos de fundição com molde de areia (aglomerada com cimento; com resinas de cura a frio; com resinas de cura a quente; com silicato de sódio, etc.), mas o mais conhecido e empregado é a fundição em areia verde.

É chamado de areia verde porque a mistura mantém sua umidade original, ou seja, o molde formado pela mistura não passa por processo de secagem. A composição do agregado granular refratário (molde) é feita por areia-base que pode ser sílica ( $\text{SiO}_2$ ), cromita ou zirconita, mais argila (como aglomerante) e água.

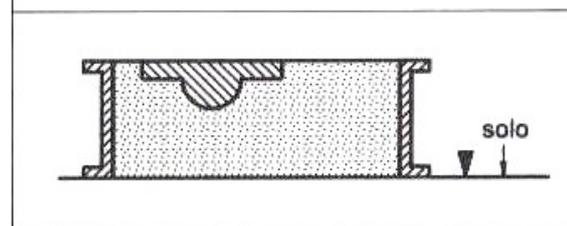
Os moldes são preparados compactando a mistura de areia numa caixa sobre um modelo com formato da peça a ser fundida. Tal processo pode ser mecanizável, sendo realizado por máquinas automáticas. Preparado o molde, o metal é vazado e as peças são desmoldadas durante rápidos ciclos de produção. Após a utilização, praticamente toda a areia (98%) pode ser reutilizada.

#### Etapas da moldagem

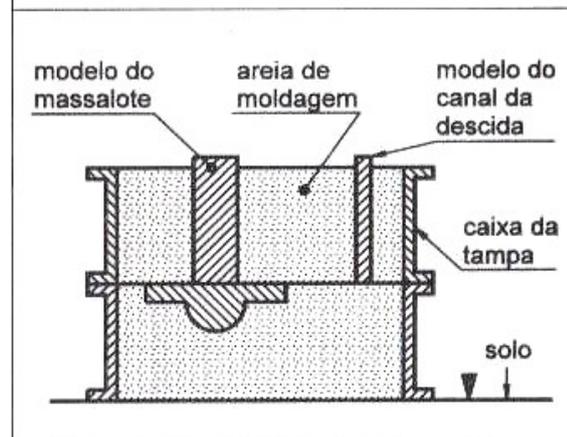
1. A caixa de moldar é colocada sobre uma placa de madeira ou no chão. O modelo, coberto com talco ou grafite para evitar aderência da areia, é colocado no fundo da caixa. A areia é compactada sobre o modelo manualmente ou com o auxílio de marteletes automáticos.



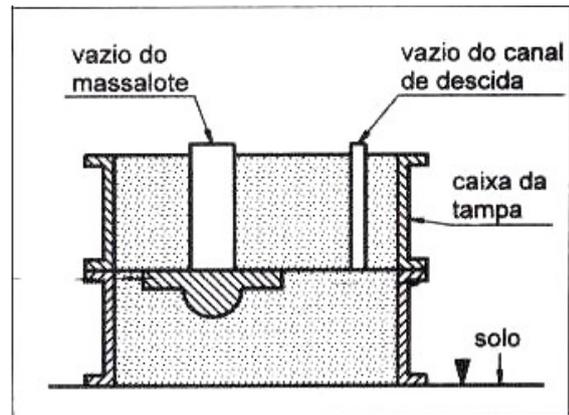
2. Essa caixa, chamada de caixa-fundo, é virada de modo que o modelo fique para cima.



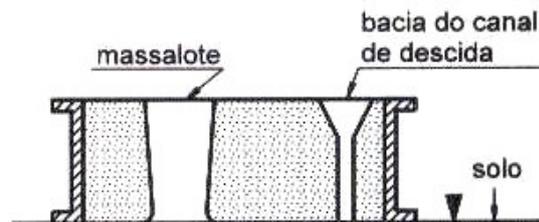
3. Outra caixa de moldar, chamada de caixa-tampa, é posta sobre a primeira caixa. Em seu interior são colocados o massalote e o canal de descida. Enche-se a caixa com areia que é socada até que a caixa fique completamente cheia.



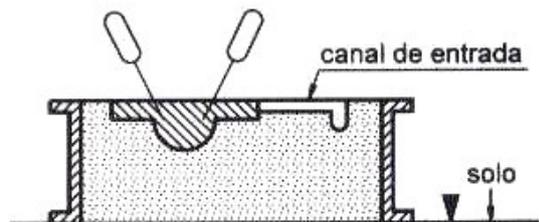
4. O canal de descida e o massalote são retirados e as caixas são separadas.



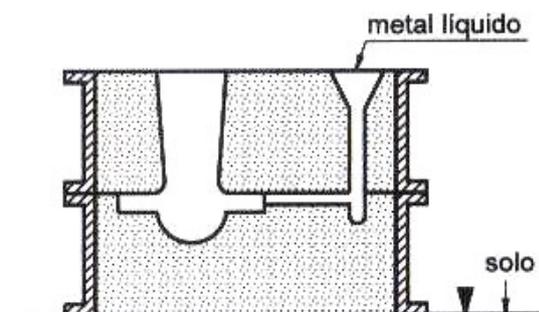
5. Abre-se o copo de vazamento na caixa-tampa.



6. Abre-se o canal de distribuição e canal de entrada na caixa-fundo e retira-se o modelo.



7. Se há machos, são colocados nesta etapa. Coloca-se a caixa de cima sobre a caixa de baixo. Para prender uma na outra, usam-se presilhas ou grampos.



Depois disso, o metal é vazado e após a solidificação e o resfriamento, a peça é desmoldada, com o canal e o massalote retirados. Obtém-se, assim, a peça fundida que depois é limpa e rebarbada.

As vantagens do processo são:

- Tem o mais baixo custo dentre todos os métodos;
- Facilidade de reparo dos moldes;
- Equipamentos mais simples.

As desvantagens são:

- A areia natural é normalmente heterogênea, ou seja, sua composição varia para cada parte, influenciando na qualidade das peças;
- Acabamento superficial inferior;

- Maior deformação do molde (erosão) com peças de maior tamanho.

## 2.2 Em casca (shell molding)

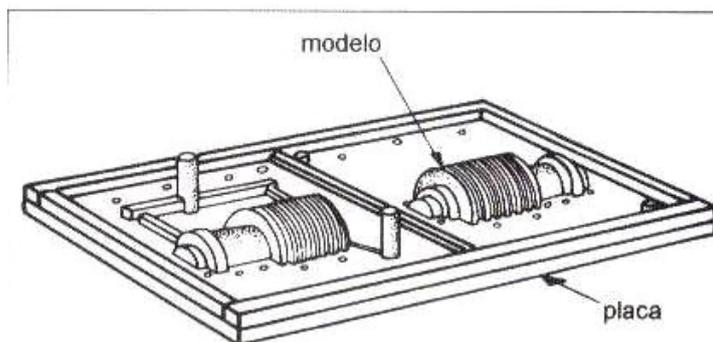
As desvantagens do processo em areia verde levaram os engenheiros a desenvolverem novos tipos de molde. E o uso das resinas foi um grande aperfeiçoamento na utilização de areia para a produção de moldes de fundição. A areia não precisa mais ser compactada porque o aglomerante, que é como uma espécie de cola, tem a função de manter juntos os grãos de areia.

A cura (secagem) pode ser a quente ou a frio. A cura a frio é mais caro e utiliza substâncias ácidas e corrosivas como catalisadores da reação química, que exigem muito cuidado na manipulação porque são tóxicas. Por estas desvantagens é pouco utilizado.

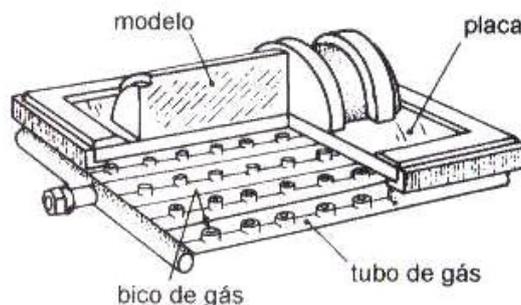
A cura a quente é chamada de “shell molding” (moldagem em casca). As resinas empregadas são normalmente do tipo poliéster, uréia formaldeído ou fenolformaldeído. A resina constitui-se de 3 a 10% do molde, sendo o restante constituído de areia-base, que deve ser isenta de argila ou impurezas e ser fina. Quanto mais fina a areia, maior será a permeabilidade da casca.

A moldagem é realizada da seguinte maneira:

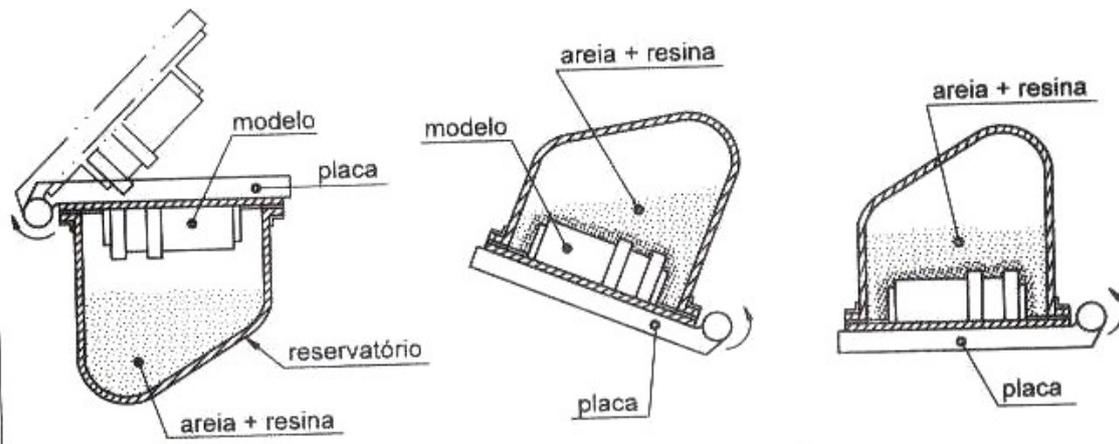
1. Os modelos, feitos de metal para resistir ao calor e ao desgaste, são fixados em placas juntamente com os sistemas de canais e os alimentadores.



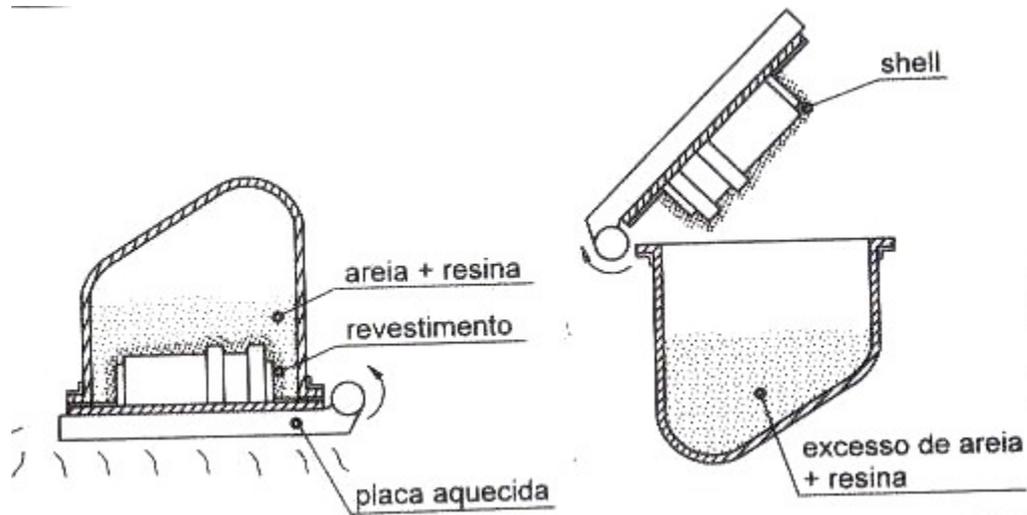
2. A placa é presa na máquina e aquecida por meio de bicos de gás até atingir a temperatura de trabalho (entre 200 e 250°C).



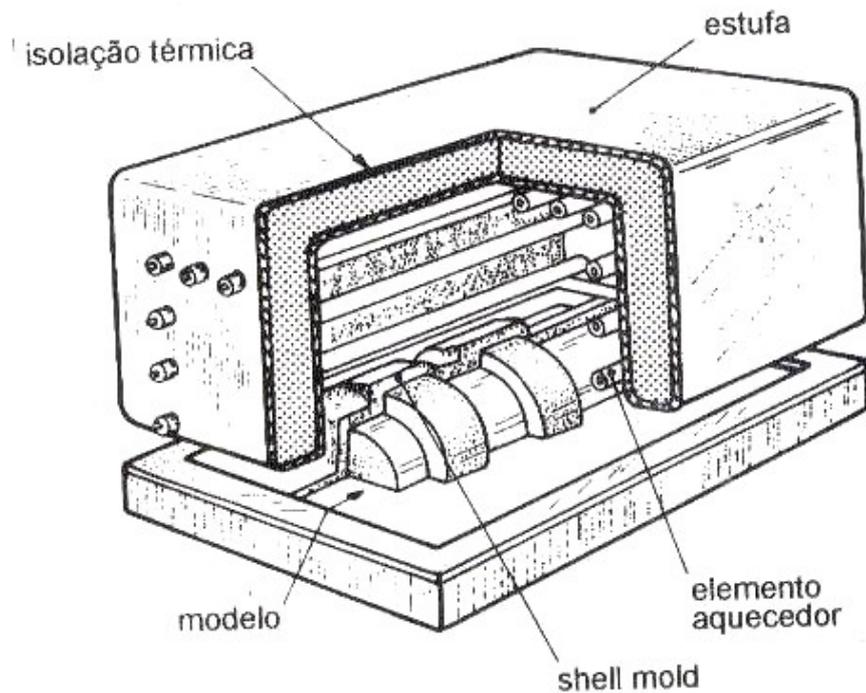
3. A placa, que geralmente é pintada com tinta à base de silicone para evitar aderência da casca, é então girada contra um reservatório contendo uma mistura de areia/resina de modo que o modelo fique envolto por essa mistura.



4. O calor funde a resina que envolve os grãos de areia e essa mistura, após algum tempo ( $\pm 15$  segundos), forma uma casca ("shell") com a espessura necessária (entre 10 e 15 mm) sobre o modelo.



5. A "cura" da casca, ou seja, o endurecimento da resina se completa quando a placa é colocada em uma estufa em temperaturas entre 350 e 450°C.



6. Após 2 ou 3 minutos, a casca é extraída do modelo por meio de pinos extratores.

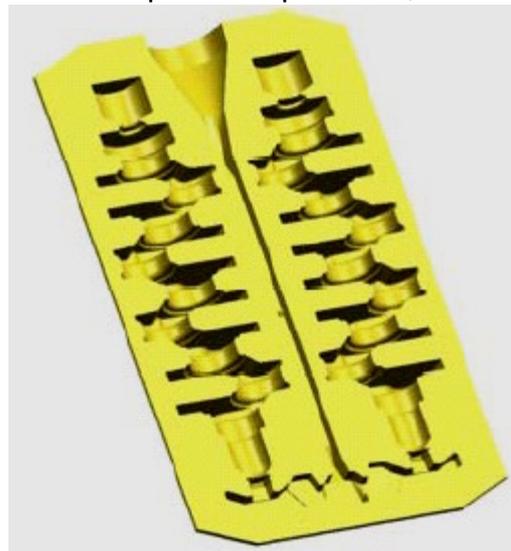
Por causa da característica do processo, a casca corresponde a uma metade do molde. Para obter o molde inteiro, é necessário colar duas metades e inserir os machos, se existentes. O vazamento é feito por gravidade.

As vantagens do processo são:

- Permite que moldes e machos sejam estocados para uso posterior;
- Bom acabamento superficial;
- Estabilidade dimensional do molde;
- Tolerâncias mais estreitas;
- Facilidade de liberação de gases durante a solidificação;
- Mecanizável e automatizável;
- Adequado para peças pequenas e de formatos mais complexos.

As desvantagens são:

- Custo mais elevado em relação à fundição em areia verde;
- Dimensões mais limitadas em relação à fundição em areia verde.



**Molde para virabrequim fundido**



**Vazamento em molde de casca**

### 2.3 Cera perdida (fundição de precisão)

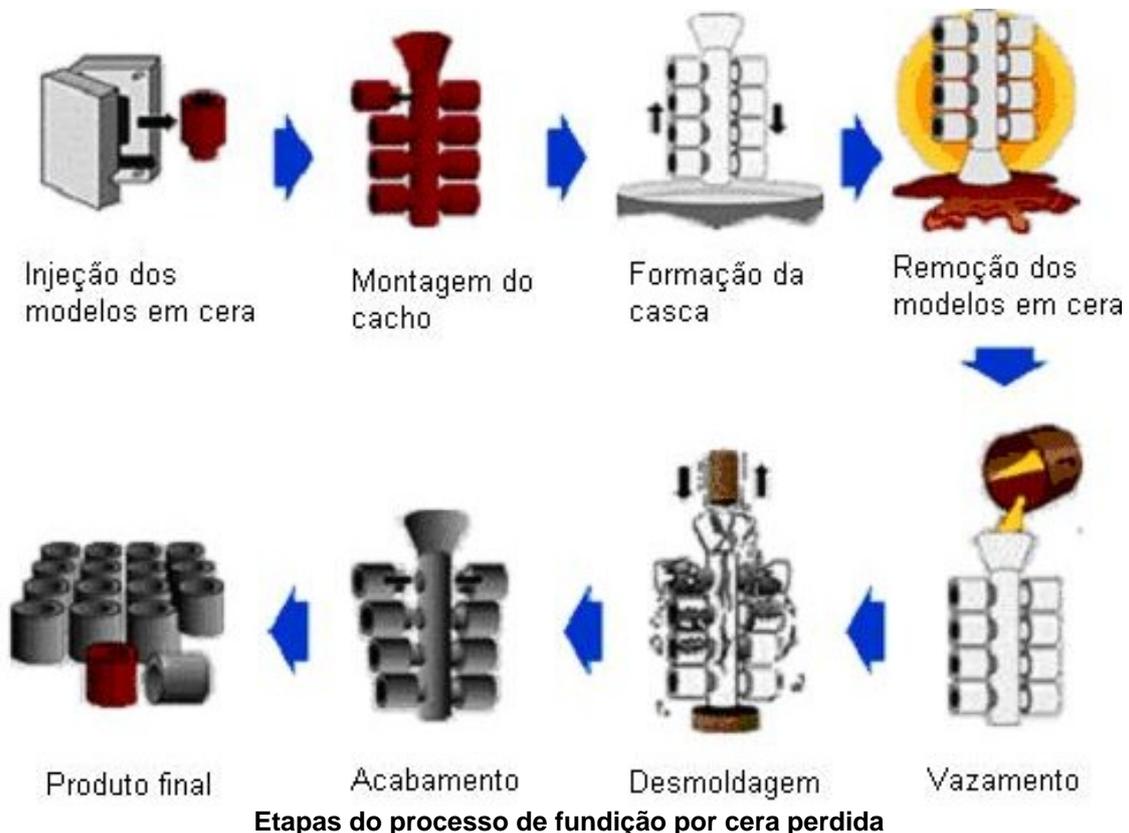
Também chamada de fundição de precisão, produz peças com peso máximo de 5 kg, formato complexo, melhor acabamento superficial, tolerâncias menores e geralmente sem macho. São produzidas ligas de alumínio, de níquel, de magnésio, de cobre, de cobre-berílio, de bronze-silício, latão ao silício, ligas resistentes ao calor, além do aço comum e inoxidável. Este processo é bastante eficaz na produção de peças pequenas e aparentemente inviáveis por outros processos (pelo formato complexo e custo).

Os modelos para a confecção dos moldes são produzidos em cera a partir do vazamento de cera líquida em uma matriz formada por uma cavidade com o formato e dimensões da peça desejada. O modelo de cera é mergulhado numa pasta ou lama refratária feita com sílica ou zircônia, na forma de areia muito fina, misturada com um aglomerante de água, silicato de sódio e/ou silicato de etila. Essa lama endurece em contato com o ar e, após endurecida, o molde é aquecido e o modelo derrete. Permanece só a casca, que recebe o metal líquido. Assim que a peça é solidificada, o molde é quebrado para retirada da peça. Portanto, tanto o molde quanto o modelo são inutilizados no processo.



Mergulho em lama refratária

Veja as etapas do processo abaixo:



As vantagens do processo são:

- Produção em massa de peças de formato complexo;
- Reprodução de detalhes, cantos vivos, paredes finas, etc.;
- Maior precisão dimensional e melhor acabamento superficial;
- Utilização de praticamente qualquer liga.

As desvantagens são:

- Peso limitado, máximo 5kg, devido à elevação do custo;
- Custo se eleva à medida que a peça aumenta de tamanho.

Deve-se lembrar que cada processo tem uma aplicação mais específica. A escolha de um processo é definida pelo produto (dimensões, complexidade, acabamento, etc.). No caso da fundição de precisão, aplicações específicas compensam os altos custos da produção.

## 2.4 Molde permanente

Dependendo da peça a ser fabricada, da quantidade e do tipo de liga metálica que será fundida, a melhor opção é a fundição em molde permanente. Este processo evita problemas comuns aos processos que utilizam moldes descartáveis, como quebras e deformações dos moldes, inclusões de material do molde, entre outros.

São utilizados moldes metálicos de ligas de aço ou ferro fundido, cuja vida útil permite a fundição de até 100 mil peças. Mas sua utilização está restrita a ligas metálicas com ponto de fusão mais baixo que ligas de aço, como chumbo, zinco, alumínio, magnésio, bronze e excepcionalmente, o ferro fundido.

Comparado às peças produzidas em moldes de areia, apresentam maior uniformidade, melhor acabamento superficial, tolerâncias menores e melhores propriedades mecânicas. Por outro lado, as peças devem ser de tamanho pequeno, produzidas em grande quantidade, e devem possuir formatos simples.

Os moldes possuem duas ou mais partes unidas por grampos, os quais são fechados manualmente ou automaticamente. Antes de fechados para receberem o material fundido por gravidade, a cavidade é coberta com uma pasta adesiva de material refratário para proteger os moldes e facilitar a desmoldagem das peças.

Após o fechamento, ocorre o vazamento por gravidade. Depois da solidificação da peça, o molde é aberto e a peça é ejetada por pinos de acionamento hidráulico (quando o processo não é manual).

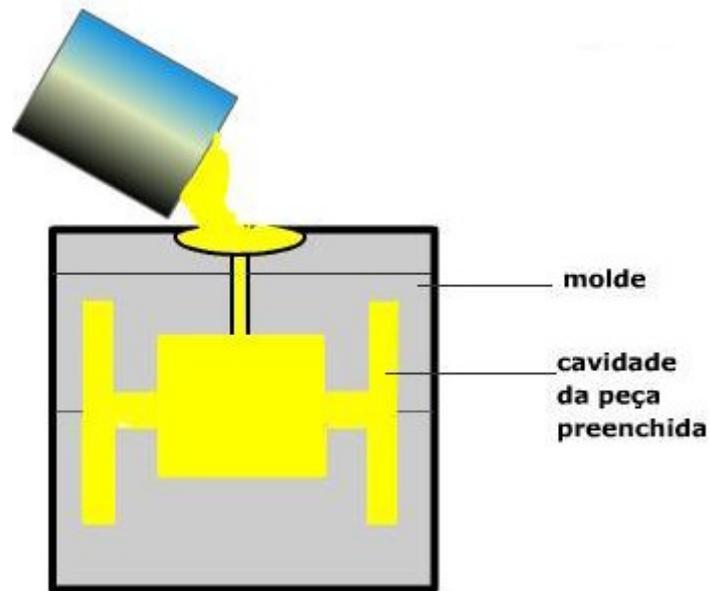
As vantagens do processo são:

- Alta capacidade de produção;
- Grande automação do processo.

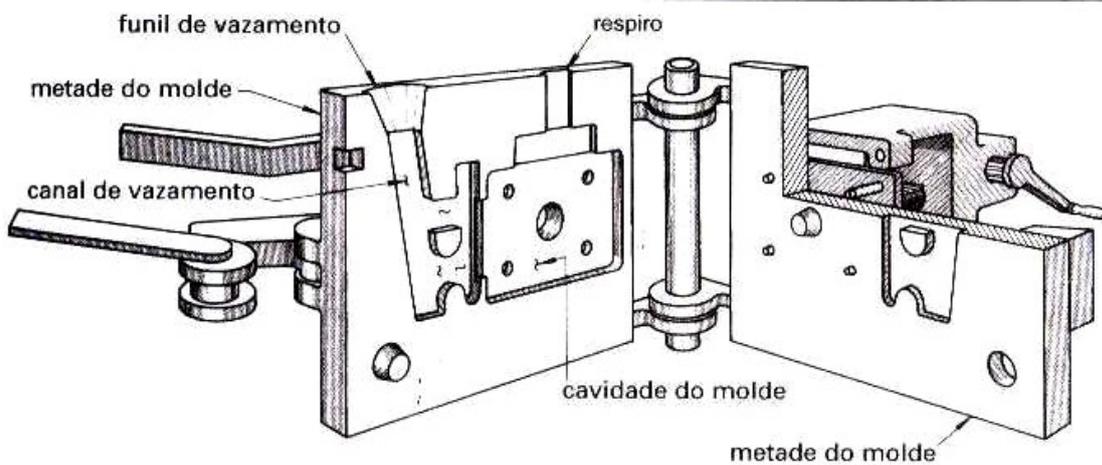
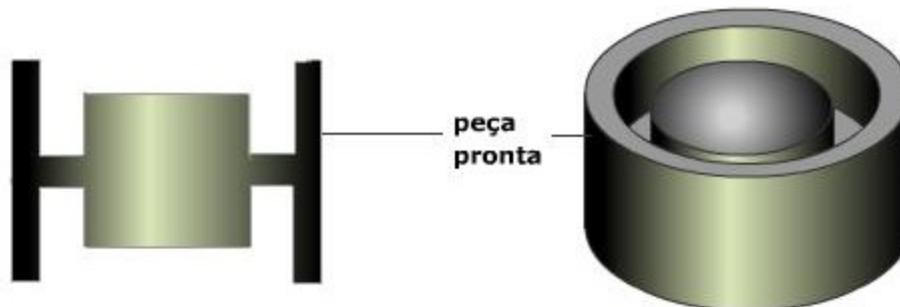
As desvantagens são:

- Não permite materiais com alto ponto de fusão;
- Dimensões e pesos limitados;

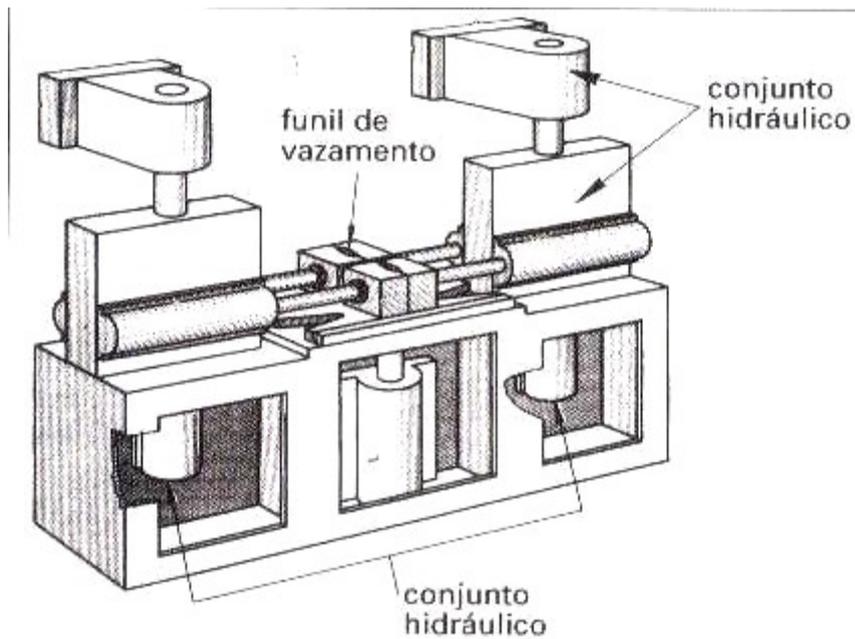
- A produção deve ser grande para compensar o custo do molde;
- Retenção de ar no interior da matriz, gerando peças incompletas e porosas.



Vazamento em molde permanente



Molde permanente de fechamento manual



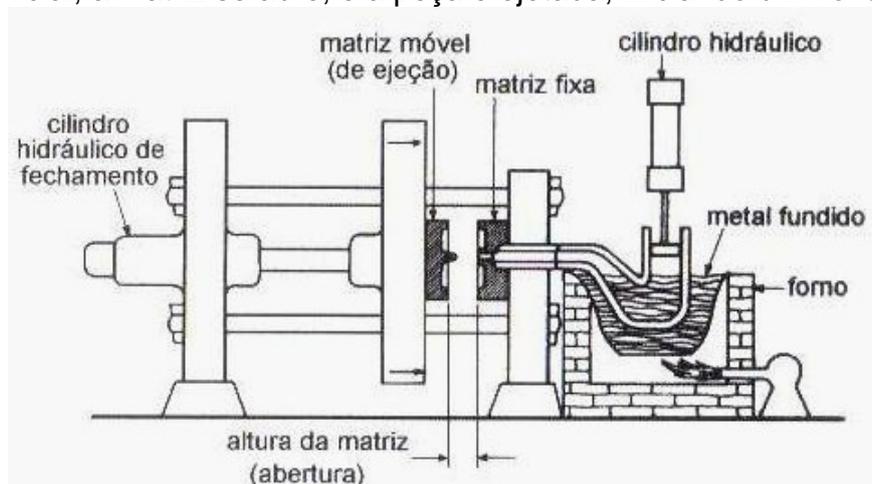
**Molde permanente de fechamento automático (hidráulico)**

## 2.5 Injeção

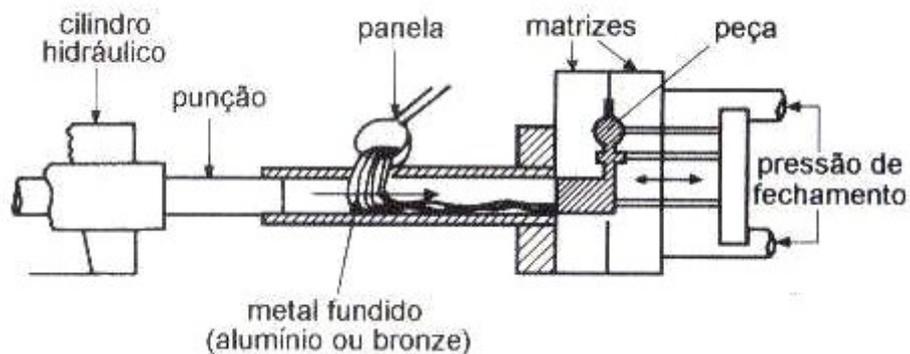
A fundição em molde permanente pode ser feita também sob pressão (injeção). Consiste em forçar a penetração do metal líquido na cavidade do molde, também chamado de matriz. A pressão garante o preenchimento total da matriz. O processo é automatizado, garantindo fechamento, pressão do líquido, abertura e desmoldagem por pinos ejetores. Muitas matrizes são refrigeradas à água, evitando superaquecimento e elevando sua vida útil. São capazes de confeccionar entre 50 mil e 1 milhão de injeções.

A unidade de fusão do metal pode estar junto da máquina de fundição por injeção ou não, dependendo da temperatura de fusão do material. No primeiro caso, o equipamento é chamado de máquina de câmara quente, e no segundo, de câmara fria.

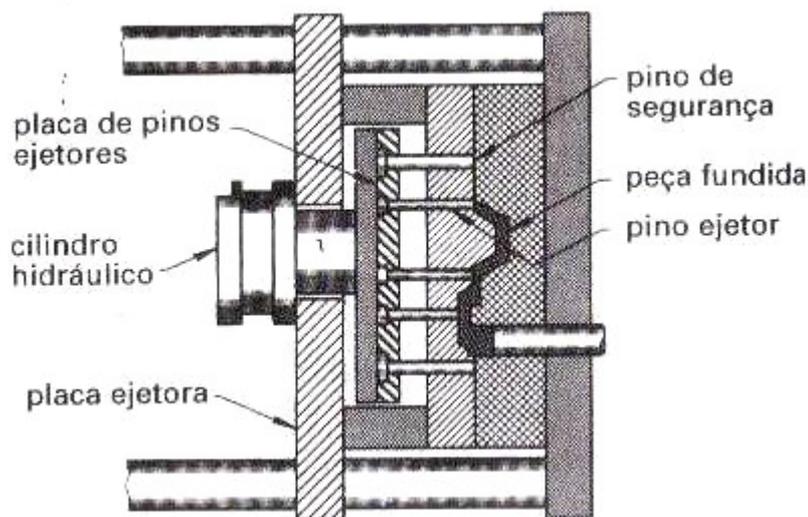
No equipamento de câmara quente, há um recipiente aquecido onde o metal líquido está depositado. Em seu interior, há um pistão hidráulico que força o metal líquido para dentro da matriz. Após a solidificação o pistão volta à posição inicial, a matriz se abre, e a peça é ejetada, iniciando um novo ciclo.



No equipamento de câmara fria, o princípio de funcionamento é o mesmo, sendo que o forno recipiente de metal líquido é uma unidade independente. O recipiente recebe apenas a quantidade de material para a peça. Veja a máquina a seguir.



Veja o esquema abaixo da matriz, com seus pinos ejetores:



As vantagens do processo são:

- Possibilidade de produção de peças mais complexas em relação ao molde permanente por gravidade;
- Possibilidade de peças com paredes mais finas;
- Alta produção e automatização no processo.

As desvantagens são:

- Limitações de materiais;
- Limitação de peso e dimensões;
- A produção deve ser grande para compensar o custo da máquina.

## 2.6 Comparação entre processos

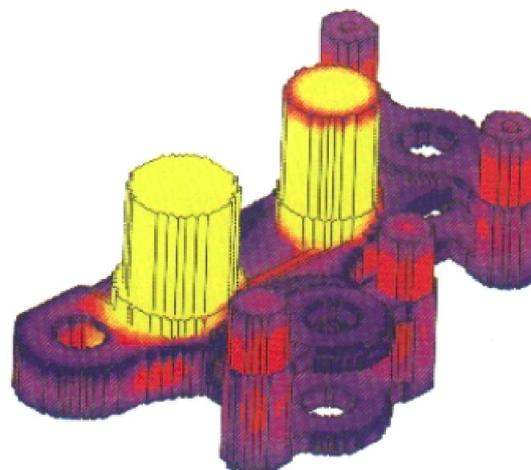
Resumo das características dos principais processos de fundição, incluindo os grupos: fundição em areia verde, shell molding, cera perdida, molde permanente por gravidade e injeção.

	<b>Areia Verde</b>	<b>Shell Molding</b>	<b>Cera perdida</b>	<b>Molde permanente</b>	<b>Injeção</b>
<b>Tolerância dimensional</b>	±1,2 mm ±3,8 mm	±0,25 mm ±5 mm	±0,02 mm ±3,8 mm	±2,5 mm ±7,5 mm	±2,5 mm ±12,5 mm
<b>Custo relativo (grande quantidade)</b>	Baixo	Médio alto	Mais alto	Baixo	Mais baixo
<b>Custo relativo (pequena quantidade)</b>	Mais baixo	Médio alto	Médio	Alto	Mais alto
<b>Peso fundido</b>	Ilimitado	250lb	100lb	100lb	75lb
<b>Espessura mínima</b>	2,5 mm	2,5 mm	1,6 mm	3,2 mm	0,8 mm
<b>Acabamento superficial relativo</b>	Razoável bom	Bom	Bom	Bom	Melhor
<b>Facilidade de fundição de peça complexa</b>	Razoável	Bom	Melhor	Razoável	Bom
<b>Facilidade de alteração de projeto</b>	Melhor	Razoável	Razoável	Ruim	Pior
<b>Ligas que podem ser fundidas</b>	Ilimitada	Ilimitada	Ilimitada	Melhor base Al e Cu	Melhor base Al

## 2.7 Automação dos processos

A automação dos processos proporciona flexibilidade à empresa, o que garante que o processo seja mais rapidamente alterado para garantir a adaptação às mudanças no mercado consumidor. Portanto, quanto mais automatizado é o processo de fundição, mais rápida será a inserção dos produtos no mercado, o que significa que a empresa venderá mais e terá uma imagem de competência no mercado frente às concorrentes.

A automação começa pelo modelo, cujo projeto é feito em programas CAD (Desenho Auxiliado por Computador). Também são utilizados softwares que simulam o resfriamento dentro do molde, de uma determinada peça, permitindo através da diferenciação de cores, determinar-se a melhor localização dos canais de alimentação, massalotes, etc. Dessa forma podemos otimizar o projeto do sistema de alimentação, garantido menor gasto de metal e ótima qualidade para a peça.



A construção do modelo, que convencionalmente se confecciona manualmente, passa a ser feito em centros de usinagem por comando numérico, que garante maior precisão dimensional, rapidez, facilidade de alteração de projeto e formas mais complexas.

Na confecção dos modelos, até processos mais difíceis para serem automatizados, como o de areia verde, tem sido atualizados. Existem máquinas que recebem as caixas, preenchem com areia, compactam, posicionam o macho, confeccionam os canais, e fecham a caixa. Ou seja, todo o processo que seria manualmente confeccionado pode ser realizado pela máquina, garantindo maior agilidade.

Na etapa de vazamento, é cada vez mais comum a utilização de braços mecânicos (hidráulicos), que trazem mais vantagens do que simplesmente a rapidez no processo: a segurança ocupacional dos trabalhadores. Dessa forma, evita-se a exposição de funcionários ao calor, repetição monótona da operação, contato com gases tóxicos, etc.

Enfim, a automatização dos processos de fundição tem sido quesito para sobrevivência de uma indústria. Aquelas que não forem se adequando estão se tornando cada vez mais obsoletas e perdem rapidamente o mercado. Para um exemplo de sucesso citamos o exemplo da Fundição Tupy, de Joinville. Fundada em 1938, produz atualmente meio milhão de toneladas anuais em peças de ferro fundido, empregando mais de 8.000 colaboradores e exportando metade de sua produção para países como Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra, Itália, Japão e outros. Um dos segredos de seu sucesso é justamente a automatização. Foi a Tupy, que em 1975 introduziu no Brasil o processo de fundição contínua, uma espécie de produção em linha que consiste em fundir, moldar e conformar o produto final em uma linha de operações, eliminando tempos intermediários e garantindo controle rigoroso da qualidade do produto. Foram ações corajosas como esta que tornaram a Tupy uma das líderes mundial no segmento.

## 2.8 Exercícios

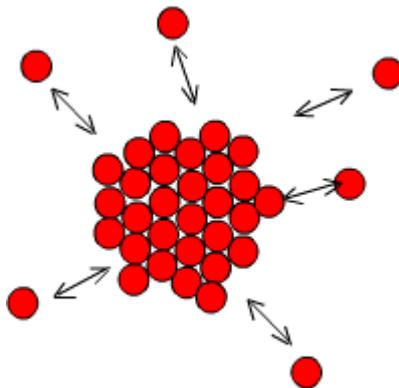
1. Cite resumidamente a moldagem da fundição em areia verde.
2. Porque a cura a frio é menos utilizada que a cura a quente (shell molding)?
3. Cite uma vantagem e uma desvantagem do processo shell molding sobre o de areia verde.
4. Porque se diz que tanto o molde quanto o modelo não são permanentes no processo por cera perdida? Explique.
5. Qual tipo de peça se encaixa bem com o processo de fundição em cera perdida?
6. Porque, na fundição por molde permanente, utiliza-se quase totalmente materiais com baixo ponto de fusão?
7. Cite a grande vantagem do processo de molde permanente sobre os processos que inutilizam o molde.
8. Cite uma vantagem da máquina de câmara quente para a câmara fria.
9. Explique com suas palavras o valor da automatização para uma indústria.

### 3. Teoria da Solidificação

#### 3.1 Introdução

Um metal no estado sólido possui átomos que vibram com uma certa frequência em torno de posições geométricas definidas (determinadas pelo tipo de arranjo cristalino específico do metal em questão). No estado líquido, tais átomos, além de vibrarem, não possuem posição definida, pois estão em movimento dentro do líquido. Por se movimentarem, os átomos no estado líquido entram em colisão, envolvendo milhares de átomos simultaneamente.

Pode-se imaginar que nesta colisão, surge um agrupamento momentâneo de átomos, formando um núcleo, com um dado arranjo atômico (CCC, CFC, HC, etc). O núcleo é um sólido que pode crescer ou se dissolver, dependendo da temperatura do sistema. O crescimento do sólido se dá por migração de átomos do líquido para o sólido, acoplando os átomos nas posições de equilíbrio do reticulado que é específico do metal em questão, conforme indicado na figura.



A temperatura na qual ocorre equilíbrio termodinâmico entre um sólido e seu respectivo líquido é a temperatura de fusão. Contrariamente ao senso comum, tal definição não significa que a solidificação se inicia nesta temperatura. A temperatura só será a mesma em apenas em substâncias puras e sistemas eutéticos (perfeitos).

#### 3.2 Nucleação (início da solidificação)

A nucleação é um fenômeno que pode ocorrer com a formação de núcleos diretamente a partir do líquido (nucleação homogênea) ou com a formação de núcleos sobre superfícies pré-existentes (nucleação heterogênea), abordadas abaixo:

##### *Nucleação Homogênea*

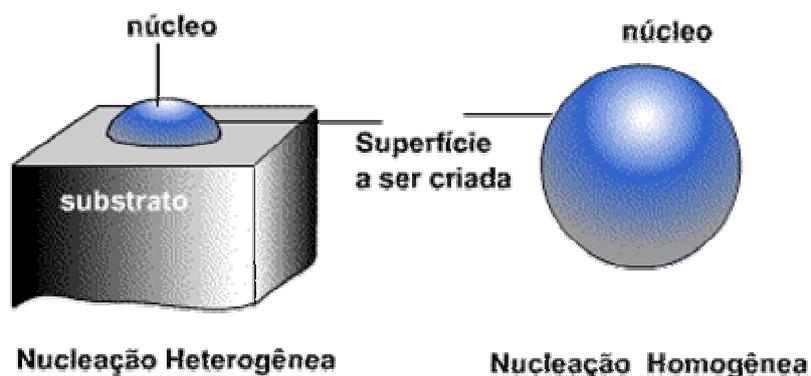
O início da solidificação ocorre com a formação de núcleos sólidos estáveis que posteriormente crescem. Qualquer núcleo momentaneamente

formado com um certo tamanho tende a crescer. Este tamanho mínimo recebe o nome de raio crítico ( $R_c$ ).

### *Nucleação heterogênea*

A nucleação heterogênea se dá quando a solidificação ocorre a partir de superfícies pré-existentes, tais como as paredes do molde ou quando da presença de substratos, que são partículas sólidas no líquido (impurezas).

A figura abaixo ilustra que a superfície a ser criada pela nucleação a partir de um substrato é menor, (comparada a da nucleação homogênea) podendo facilitar o processo pois exige menor energia de interface (barreira energética). Observa-se também que o núcleo resultante da presença de um substrato possui menor volume e portanto menor número de átomos.



A presença de qualquer tipo substrato não é garantia de facilitar a nucleação, pois depende da tensão superficial entre núcleo e substrato, isto é, depende da molhabilidade entre ambos que, por sua vez, depende da composição química do núcleo e do substrato. Caso haja molhabilidade entre líquido e substrato, a energia crítica para nucleação torna-se menor. E então a presença de um substrato facilita a nucleação.

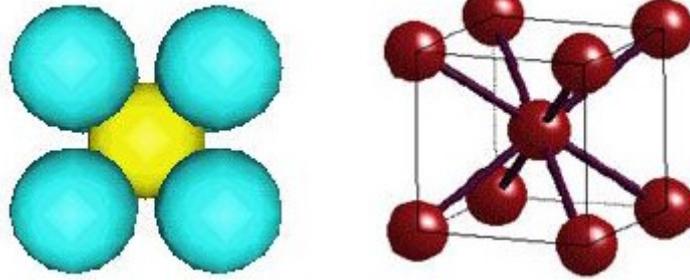
A presença de um substrato portanto, como visto, causa nucleação heterogênea, que se constituirá em defeito microestrutural e causará heterogeneidade nas propriedades do material.

### **3.3 Estrutura cristalina**

De uma maneira geral, a matéria sólida possui duas estruturas atômicas: amorfa (sem forma) e cristalina. A estrutura cristalina nada mais é que um arranjo ordenado dos átomos e moléculas que constituem o material. As três estruturas mais comuns são:

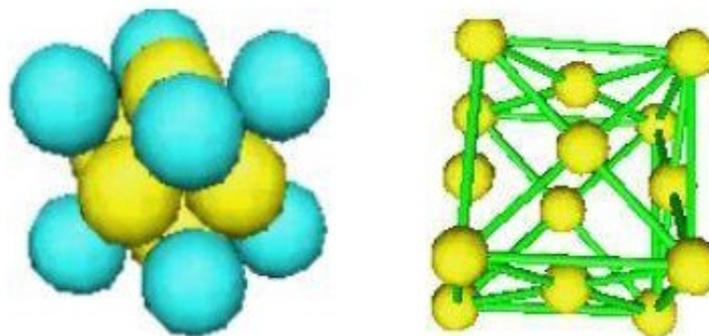
#### *Cúbica de Corpo Centrado - CCC*

É constituído por átomos que formam a vértice de um cubo e um átomo central. Os ferros e aços (com carbono no espaço intersticial) são constituídos assim.



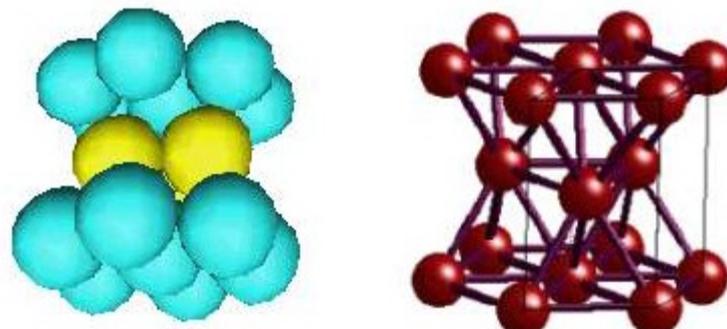
#### *Cúbica de Face Centrada - CFC*

É constituído por átomos que formam a vértice de um cubo e um átomo central em cada uma das oito faces. Os ferros e aços (com carbono no espaço intersticial), acima de certa temperatura (aproximadamente 800°C) são constituídos assim.



#### *Hexagonal Compacta - HC*

É constituído por átomos que formam o vértice de dois hexágonos, um átomo no centro de cada, e três átomos ligando os hexágonos. É a estrutura de muitos metais, como Zinco e Magnésio.



### **3.4 Defeitos na Estrutura Cristalina**

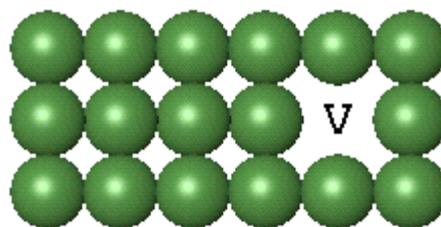
Um defeito na estrutura cristalina é uma imperfeição ou um "erro" no arranjo periódico regular dos átomos em um cristal. Podem envolver uma irregularidade na posição dos átomos ou no tipo de átomos. O tipo e o número de defeitos dependem do material, do meio ambiente, e das circunstâncias sob as quais o cristal é processado. Os tipos de defeitos podem ser classificados como:

- Defeitos Pontuais: irregularidades que se estendem sobre somente alguns átomos;
- Defeitos Lineares: irregularidades que se estendem através de uma única fileira de átomos;
- Defeitos Planares: irregularidades que se estendem através de um plano de átomos;

Os tipos e números de defeitos são importantes porque sem sua presença, por exemplo, os metais seriam muito mais resistentes, os cerâmicos seriam muito mais tenazes e os cristais não teriam nenhuma cor. Veja abaixo os defeitos pontuais e lineares.

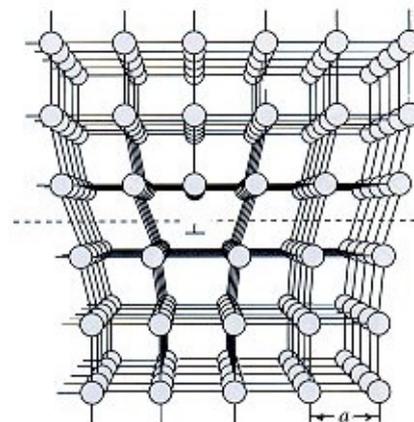
#### *Defeitos Pontuais*

Os defeitos pontuais podem ser vazios, ou seja, a ausência de átomo no lugar que deveria estar, ou presença de um átomo diferente no lugar de um átomo ou no espaço intersticial. Como consequência, as ligações atômicas vizinhas não foram satisfeitas.



#### Defeitos Lineares

Também chamados de discordâncias, são imperfeições em uma estrutura cristalina nas quais uma linha de átomos tem uma estrutura local que difere da estrutura circunvizinha. É causada por forças mecânicas geradas na fabricação do material e tem forte influência nas propriedades mecânicas dos materiais.

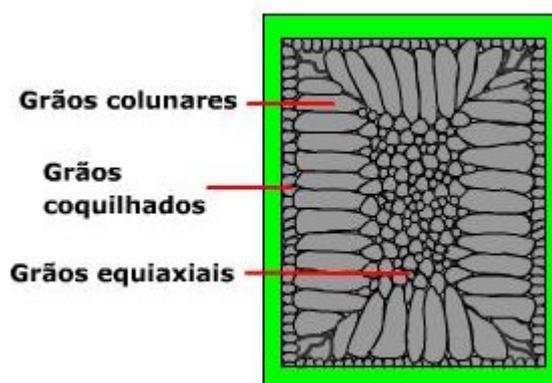


### 3.5 Desenvolvimento da macroestrutura

Os metais líquidos são vazados em moldes para obtenção de peças ou lingotes. O lingote passa posteriormente por processos de deformação plástica visando a produção de chapas, barras, perfis, etc.

Os grãos que aparecem na estrutura da peça ou do lingote podem ter diferentes tamanhos dependendo das taxas de extração de calor e gradientes térmicos em cada momento da solidificação.

O desenvolvimento da macroestrutura durante a



solidificação causam diferentes morfologias de grãos resultantes. Em geral existem três regiões de grãos que se classificam como:

*Zona coquilhada:* região de pequenos grãos com orientação cristalina aleatória, situada na parede do molde. Próximo à parede existe maior taxa de extração de calor e portanto elevado super-resfriamento, que favorece a formação destes grãos. Os grãos da zona coquilhada tendem a crescer na direção oposta a da extração de calor. Porém algumas direções cristalinas apresentam maior velocidade de crescimento que outras.

*Zona Colunar:* região de grãos alongados, orientados na direção de extração de calor. Os grãos da zona coquilhada que possuem as direções cristalinas de maiores velocidades de crescimento alinhadas com a direção de extração de calor, apresentam aceleração de crescimento. Esta aceleração gera grãos alongados que compõem a zona colunar, situada na posição intermediária entre a parede e o centro do molde.

*Zona Equiaxial:* região de pequenos grãos formados no centro do molde como resultado da nucleação de cristais ou da migração de fragmentos de grãos colunares (arrastados para o centro por correntes de convecção no líquido). Nesta região os grãos tendem a ser pequenos, equiaxiais e de orientação cristalina aleatória

### 3.6 Exercícios

1. Explique como se dá o início da solidificação.
2. Diferencie nucleação homogênea de heterogênea.
3. O que é estrutura cristalina e quais os três tipos mais comuns?
4. Porque os defeitos cristalinos são tão importantes?
5. Explique o que é zona colunar.

## Resposta dos exercícios

### Generalidades

1. Defina molde e modelo.  
*Molde é uma cavidade com o formato negativo da peça a ser formada. É feito de material refratário e receberá o metal fundido para que se obtenha a peça desejada.*  
*Modelo é uma peça idêntica ao seu original (formato e dimensões) e serve para construção do molde. Suas dimensões são apenas um pouco maiores, prevendo a contração do metal quando ele se solidificar, além de um eventual sobremetal para posterior usinagem da peça. Pode ser feito de madeira, metal, plástico, gesso, etc.*
2. O que são massalotes e qual sua importância?  
*Massalotes são reservas de metais previstas nos moldes para compensar a contração do material ainda líquido, ou seja, garantir o completo preenchimento da cavidade do molde.*
3. Cite 3 fatores a considerar para a escolha de um processo de fundição.  
*Quantidade de peças a produzir; grau de complexidade da peça; e especificação do metal.*
4. Cite duas características que uma peça fundida possui.  
*Ausência de furos pequenos e detalhes complexos, porque dificultam o processo e são realizados mais facilmente na usinagem; Cantos arredondados e paredes mais grossas, que evitam trincas e melhoram o preenchimento de toda cavidade.*

### Processos de Fundição

1. Cite resumidamente a moldagem da fundição em areia verde.  
*Montagem do modelo na caixa fundo, compactação da areia, montagem da caixa tampa, montagem do massalote e canal de descida, compactação da areia, retirada do modelo e massalote, abertura do canal de distribuição, montagem das caixas.*
2. Porque a cura a frio é menos utilizada que a cura a quente (shell molding)?  
*Porque o processo é mais caro e envolve substâncias tóxicas que realizam a cura.*
3. Cite uma vantagem e uma desvantagem do processo shell molding sobre o de areia verde.  
*Uma vantagem é tolerância menor, uma desvantagem é o custo mais elevado.*
4. Porque se diz que tanto o molde quanto o modelo não são permanentes no processo por cera perdida? Explique.  
*O molde é confeccionado em cera, que recebe um banho de lama refratária. Essa lama seca e forma o molde. O modelo é derretido para que o molde*

*receba o metal líquido. Após solidificado, também o molde é inutilizado para retirar a peça.*

5. Qual tipo de peça se encaixa bem com o processo de fundição em cera perdida?  
*Peças pequenas e complexas, que são inviáveis em outros processos.*
6. Porque, na fundição por molde permanente, utiliza-se quase totalmente materiais com baixo ponto de fusão?  
*Porque a alta temperatura comprometeria o molde. Sendo confeccionado de liga de aço, deterioraria-se rapidamente caso fosse elevado tantas vezes a uma temperatura próxima à sua temperatura de fusão.*
7. Cite a grande vantagem do processo de molde permanente sobre os processos que inutilizam o molde.  
*Evita os problemas comuns aos processos que utilizam moldes descartáveis, como quebras e deformações dos moldes, inclusões de material do molde, entre outros.*
8. Cite uma vantagem da máquina de câmara quente para a câmara fria.  
*Ganho de energia pela menor perda de calor do metal, que não precisa percorrer distância nenhuma.*

### **Teoria da Solidificação**

1. Explique como se dá o início da solidificação.  
*Dá-se por um agrupamento momentâneo de átomos que se chocaram por estarem em movimento (estado líquido da matéria) ou por acúmulo de átomos num substrato. Se a temperatura permitir, átomos migrarão do movimento para o agrupamento, formando estruturas cristalinas.*
2. Diferencie nucleação homogênea de heterogênea.  
*A nucleação homogênea se dá por agrupamento de átomos, enquanto na nucleação heterogênea, um substrato serve para o acúmulo de átomos.*
3. O que é estrutura cristalina e quais os três tipos mais comuns?  
*Estrutura cristalina nada mais é que o arranjo dos átomos, típico de um tipo de material. Os tipos mais comuns são Cúbica de Corpo Centrado, Cúbica de Face Centrada e Hexagonal Compacta.*
4. Porque os defeitos cristalinos são tão importantes?  
*Porque eles alteram as propriedades dos materiais.*
5. Explique o que é zona colunar.  
*É uma região de grãos alongados orientados para a zona de extração de calor, situada na região intermediária entre a parede do molde e o centro da peça.*

## Referências Bibliográficas

**Handbook: Glossário.** [www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br), acessado em 21/01/2007.

LOSEKAN, Cláudio R.; CARPES Jr, Widomar P.; MORO, Norberto. **Processos de Fundição.** Apostila do Curso Técnico em Mecânica do CEFET/SC, 2002.

**Processos de Fundição.** Em [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br), acessado em 26/10/2006.

**Processos de Fabricação.** Volume I. Apostila do Curso Técnico em Mecânica. Telecurso 2000.

Prof. Lázaro. **Notas Sobre Processos de Fundição.** Florianópolis, 2007, CEFET/SC.

SIMONETTI, Marcelo J. **Processos de Fundição.** Sorocaba, Apostila da Universidade Paulista, 2005.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.