

**PMR3203**

**Aula-6**

**INTRODUÇÃO A  
TECNOLOGIA DA  
FUNDIÇÃO**

# Introdução

A transformação dos metais e ligas metálicas em peças de uso geral (industrial e não industrial) podem ser realizadas por intermédio de inúmeros processos, a maioria dos quais tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido, que é derramado no interior de uma forma, denominada de molde, cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir (peça fundida).



A peça fundida pode sair com formato definitivo ou quase definitivo, podendo ser submetido posteriormente à usinagem ou conformação mecânica de modo a obter-se novas formas de peças; podem ainda se submetidos a tratamentos térmicos para melhoria das propriedades mecânicas.



# Definição

”Fundição dos metais é por definição qualquer processo de fusão de metais e vazamento dos mesmos em moldes, com a finalidade de produzir as formas sólidas requeridas”.  
Kondic ( 1973)

Utilizados há mais de 400 anos, encontra atualmente aplicação nos mais diversos setores da indústria, tais como: Joalheria, esculturas, ferramentas, peças automotivas, aeronáuticas, ferrovias, máquinas operatrizes, ferramentas, utensílios domésticos, etc.

Podem ser obtidas sem grandes limitações quanto ao tamanho, forma e complexidade.

# Variabilidade dos Processos de Fundição

As técnicas tradicionais de fundição incluem a fundição por cera perdida, fundição por espuma perdida, fundição em coquilha e fundição em areia.

O processo moderno de fundição está dividido em duas categorias principais: fundição dispensáveis e não dispensáveis. Ele é ainda dividido pelo material do molde, tais como areia ou metal, e método de vazamento, tais como por gravidade, sob pressão ou a vácuo ou a baixa pressão.

*Modelo* ou *molde* (conforme a região) é o nome dado normalmente à peça que servirá para imprimir no *molde de fusão ou forma* ou *negativo* do componente a ser fundido.

Obs.: Para evitar confusão devido aos regionalismos dos termos, utilizaremos artigo o termo **molde** para a forma de fundição, e **modelo** para a peça que servirá de macho de impressão da cavidade receptora de material liquefeito, ou forma de fundição, ou molde de fundição. (recomendado pela ABNT)

# Vantagens do processo

Em virtude de sua fluidez, o metal líquido pode encher um molde, cavidades longínquas, seções finas e formas complexas.

Características:

1. Dimensões e pesos variados: pode-se obter peças fundidas de mínimas dimensões (alguns gramas), até grandes dimensões (mais de 200T).
2. Complexidade: grande liberdade estética e de construção. Um grande número de detalhes pode ser incorporado em uma única peça fundida.

# Vantagens do processo

3. Podem ter bom acabamento superficial e tolerâncias apertadas (com uso de moldes metálicos), resultando em grande economia de usinagem.

4. A fundição permite um alto grau de automatização e, com isso, a produção rápida e em série de grandes quantidades de peças.

5. Economia de peso em virtude de se poder dar a espessura desejada.

6. Composição química diversificada: possível obter peças de grandes variedades de materiais; ligas metálicas e não metálicas, aço carbono; aços ligados e inclusive ferro fundido (é o único processo que se consegue conformar o ferro fundido).

# Vantagens do processo

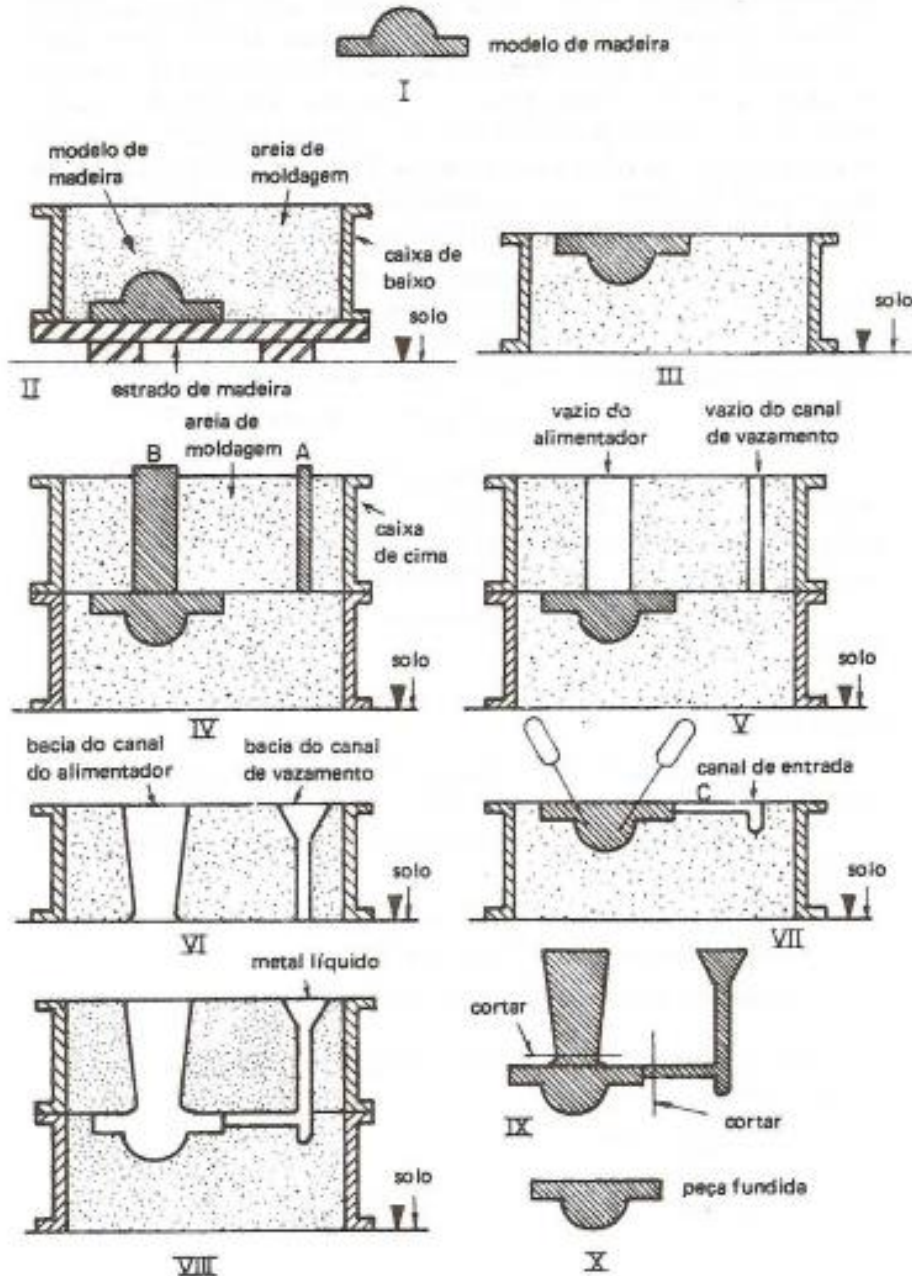
7.Boas Propriedades Mecânicas: pode-se obter nos fundidos as mais variadas propriedades mecânicas possíveis, dependendo da composição química aplicada bem como do tratamento térmico realizado (controle no processo de resfriamento).

O objetivo final de qualquer processo de fabricação visa obter um produto de boa qualidade, ou seja, peças perfeitas do ponto de vista dimensional, acabamento superficial, composição química dentro da faixa especificada, micro estrutura adequada, sem vazios internos, sem trincas e ao menor custo possível → FUNDIÇÃO

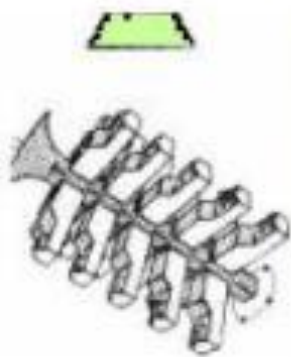
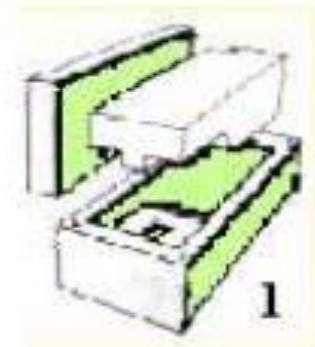


# Fundição em Areia verde

Seqüência de operações na fundição em areia verde.



# FUNDIÇÃO de precisão: processo Cera Perdida



1. Elaboração dos modelos em cera

2. Construção da árvore de modelos

3. Imersão da árvore de modelos num banho de refratário de granulometria fina (lama refratária - revestimento primário)

4. Deposição de camadas de material refratário para constituição de um corpo em casca cerâmica auto-resistente

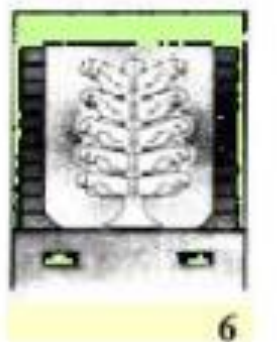
5. Destruição do modelo de cera por fusão

6. Cozimento do material cerâmico da moldação para conclusão do processo de presa

7. Vazamento do metal fundido

8. Abatimento da moldação

9. Corte dos gitos, acabamento das peças e controlo dimensional



6

3

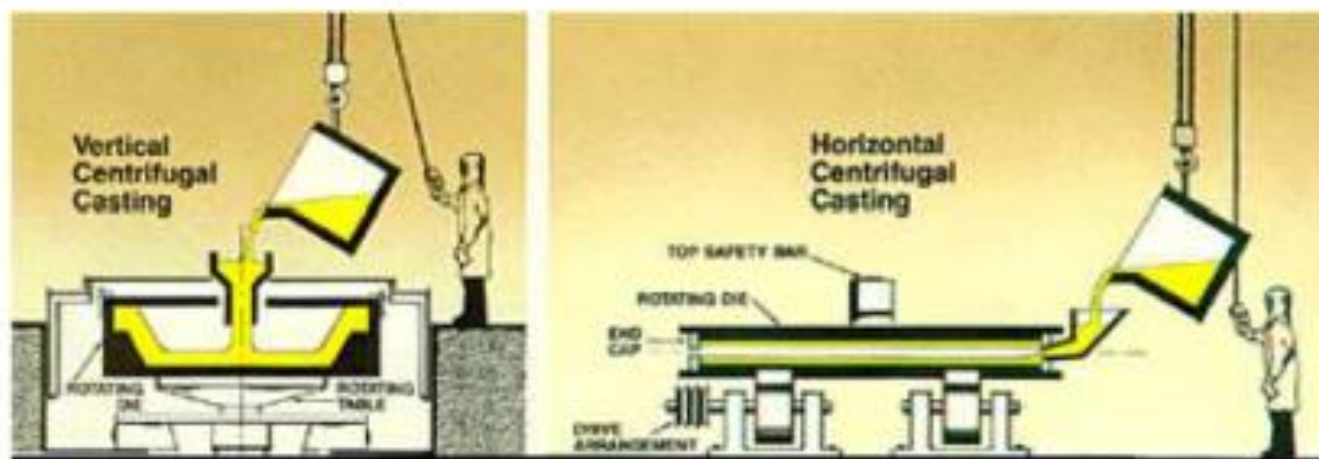
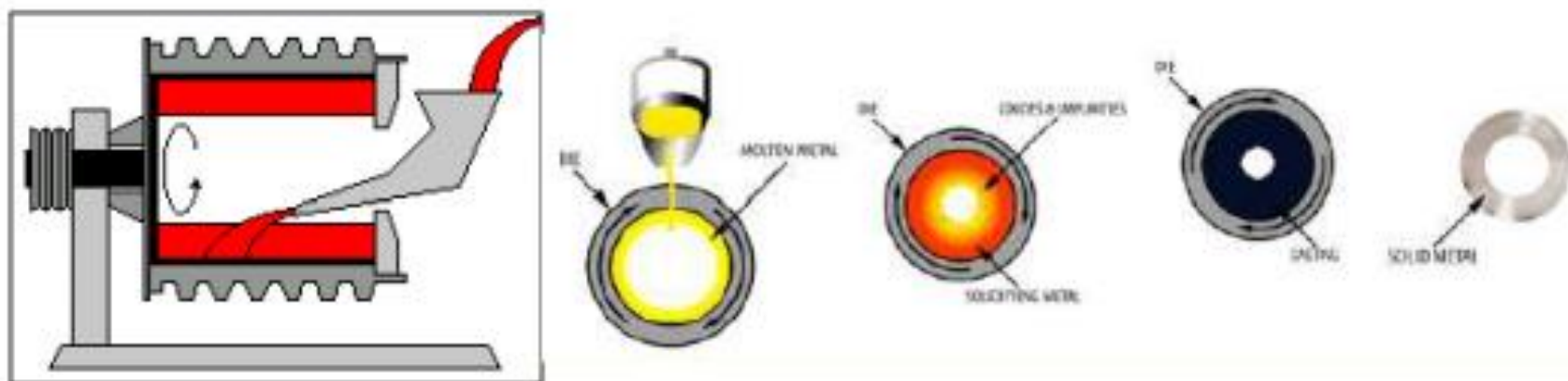
4

7

8

# FUNDIÇÃO: Fundição por centrifugação

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



# FUNDIÇÃO: Fundição por centrifugação

## Aplicações

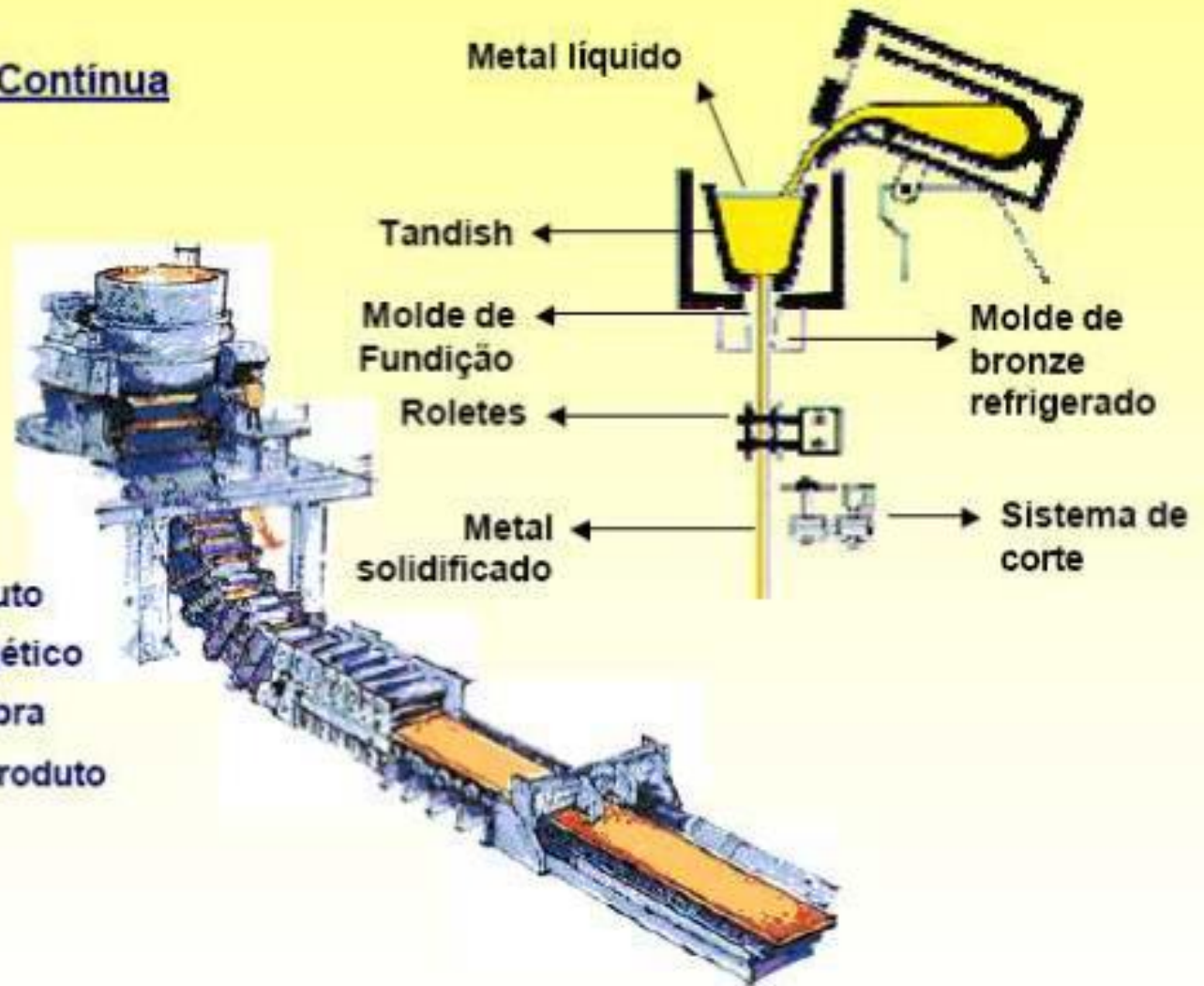


# FUNDIÇÃO: Fundição contínua

## Fundição Contínua

### Vantagens

- Maior Produtividade
- Uniformidade do produto
- Menor consumo energético
- Redução de mão-de-obra
- Melhor qualidade do produto



# Fabricação do modelo

Para a confecção do modelo que servirá para imprimir na forma o formato da peça a ser fundida, geralmente é utilizada cera, madeira, plásticos como o uretano, metais como o alumínio ou o ferro fundido.

Muitas vezes, se utiliza a própria peça como modelo, porém esta passa por um processo de aumento tridimensional, geralmente com a aplicação de diversas camadas de tinta ou resina, por exemplo para compensar o efeito da contração da peça fundida após o seu resfriamento.

Modelo → fabricado manualmente em ferramentaria ou por prototipagem rápida

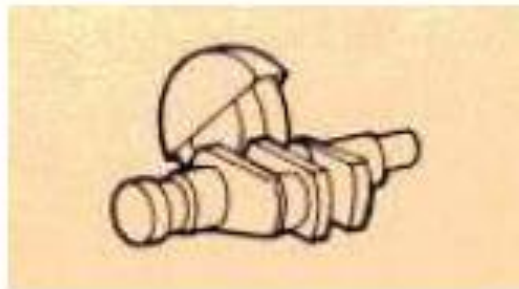
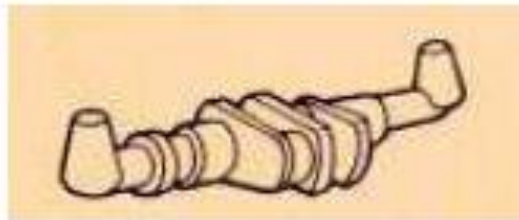
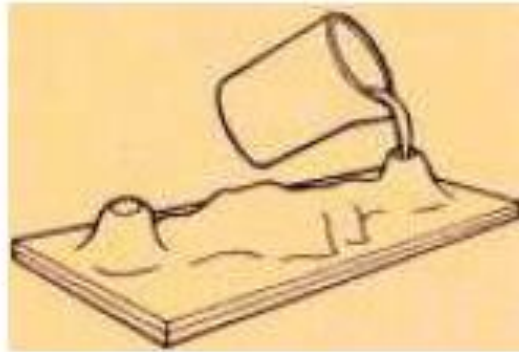
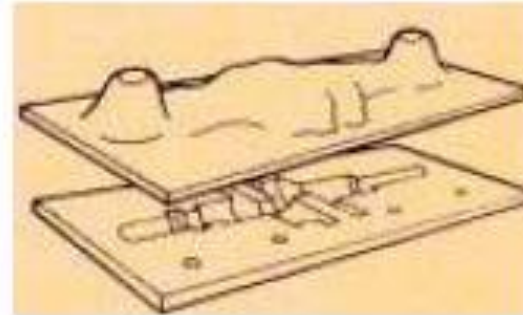
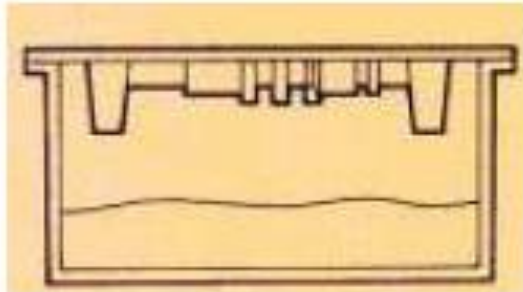
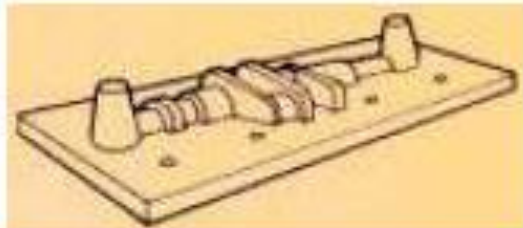
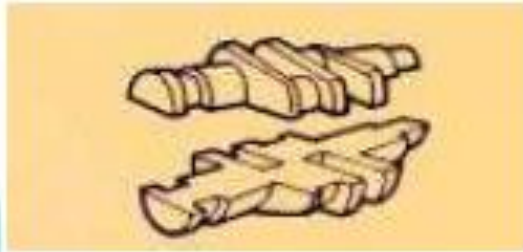
# Fabricação do modelo

Geralmente, fabricam-se dois semi-modelos correspondentes a cada uma das partes do modelo principal que é necessário fabricar, ou também pode-se cortar o modelo ao meio.

Isso é necessário para se fazer o molde em duas metades, de modo que possam ser separados para a retirada do fundido após solidificado.

Devem ser incluídos no molde canais de alimentação e respiro para o vazamento de excessos de material fundido e para a saída do ar. As superfícies do molde devem respeitar ângulos mínimos em relação ao modelo, com o objetivo de facilitar a extração da peça. Este ângulo é denominado ângulo de saída.

# Fabricação do modelo

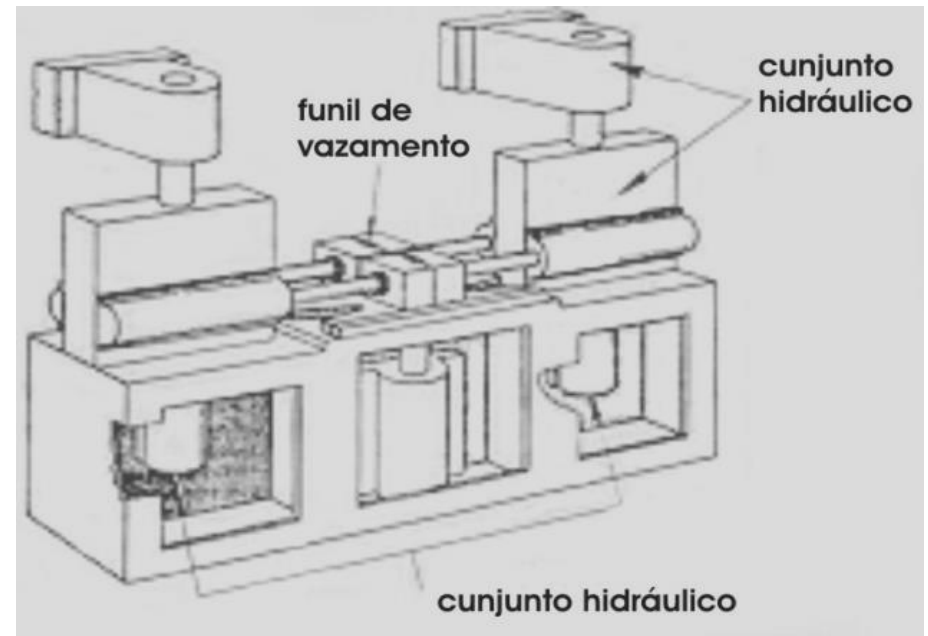
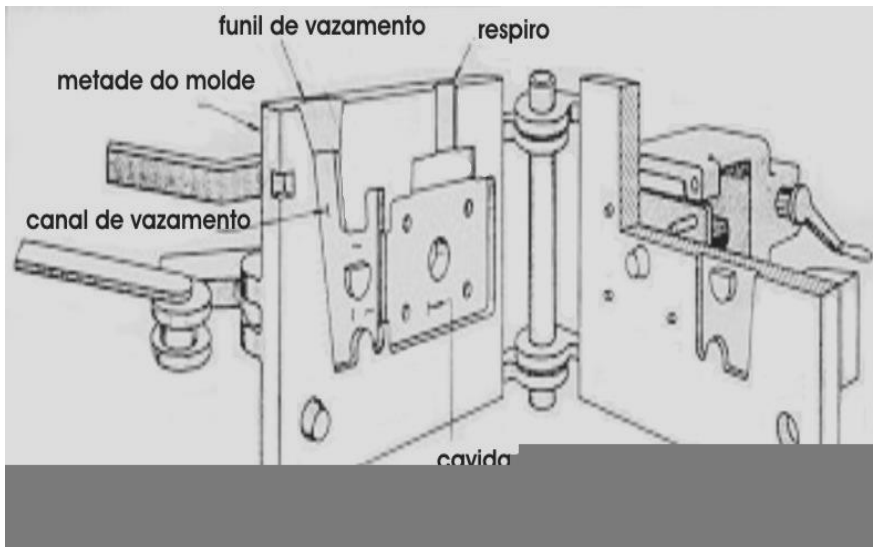


1. Elaboração de um modelo permanente
2. Fixação do modelo a uma placa metálica que é aquecida ( $150^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ ) e revestida com desmoldante (Silicone)
3. Fixação de uma caixa com areia pré-revestida com resina à placa-modelo
4. Rotação da caixa e da placa modelo e queda por gravidade da areia sobre o modelo
5. Formação da meia moldação
6. Nova rotação da caixa e da placa-modelo e remoção da areia não polimerizada
7. Repetição para a outra meia moldação
8. União das meias moldações e vazamento do material
9. Extração das peças.
10. Acabamento final das peças



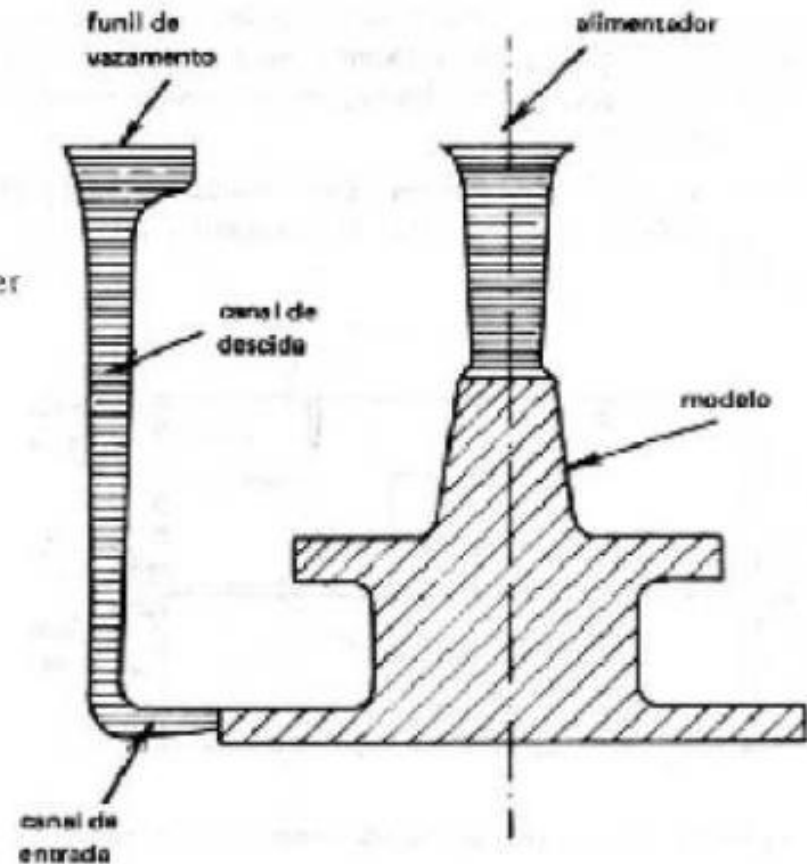
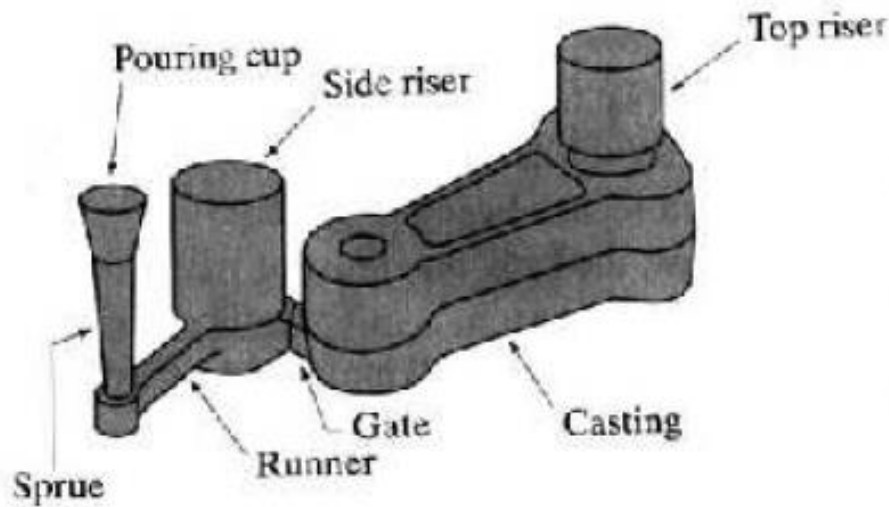
# Fabricação do Molde

O molde é fundamental para a qualidade da peça fundida.  
A qualidade da peça fundida está diretamente ligada à  
qualidade do molde.



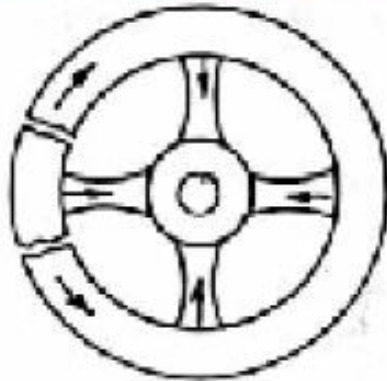
# Fabricação do Molde

**Contração de volume:** como resolver esse problema.

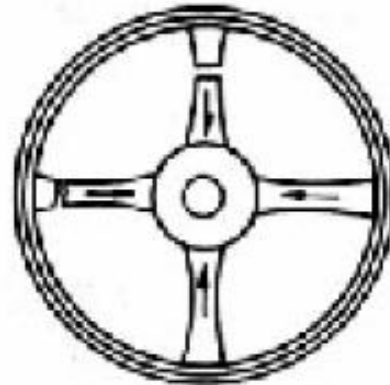


# Fabricação do Molde

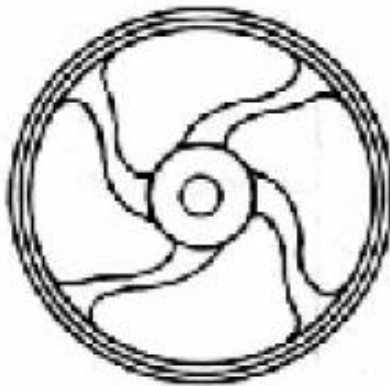
**Contração de volume:** aparecimento de trincas a quente e a maneira de corrigi-las.



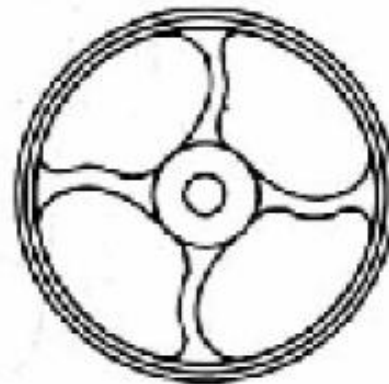
incorreto



incorreto



correto



correto

# Colocação do macho

Se a peça que se quer fabricar é oca, será necessário dispor de machos que evitem que o metal fundido se propague pelas cavidades. Geralmente os machos são fabricados com areias mais finas e misturadas com materiais que proporcionam uma compactação maior (Existem algumas argilas específicas para isso). Esta técnica permite uma manipulação manual na inserção destes na cavidade do molde.

Uma vez montado o macho dentro das cavidades, formadas pelo modelo primário, as duas metades do molde de fundição serão juntadas para receberem o material sob fusão.

Um exemplo do uso deste tipo de macho são os blocos de motores, onde existe a necessidade de preservar os condutos de lubrificação e de passagem de água para resfriamento.

## Drenos

Quando o material fundido preenche as cavidades, é necessário que haja uma pequena sobra deste para expulsar o ar e possíveis contaminações.

São executados na feitura dos moldes de fundição alguns *canais de vazamento* para possibilitar a drenagem do material.

## Massalote

É uma espécie de reserva de metal que preenche os espaços que vão se formando à medida que a peça vai solidificando e se contraindo.

# **Esfriamento e solidificação**

Esta é a etapa mais crítica de todo o processo, já que um esfriamento excessivamente rápido pode provocar tensões mecânicas na peça, inclusive com aparecimento de trincas, e a formação de bolhas.

Se houver um resfriamento muito lento ocorrerá a diminuição da produtividade.

Estes eventos influenciam bastante o tamanho, forma, uniformidade e composição química dos grãos formados na peça fundida, que por sua vez influencia as suas propriedades globais.

Os fatores mais importantes que afetam estes eventos são: o tipo do metal, as propriedades térmicas do metal e do molde, a relação geométrica entre o volume e área da superfície da fundição e a forma do molde.

# Solidificação dos metais

A solidificação dos metais no interior dos moldes => transição do estado líquido para o sólido => fator mais importante na fundição.

A solidificação se processa em duas etapas consecutivas: de nucleação e crescimento de novas fase(sólida) em meio a anterior(líquida).

Nucleação traduz o modo pela qual a fase sólida surge de forma estável no meio da fase líquida, sob a forma de pequenos núcleos cristalinos.

Crescimento traduz o modo pelo qual esses núcleos crescem sob a forma de cristais o grãos cristalinos. Desta forma a etapa de nucleação, ou mais precisamente a quantidade de núcleos determinará o tamanho de grão nas células.

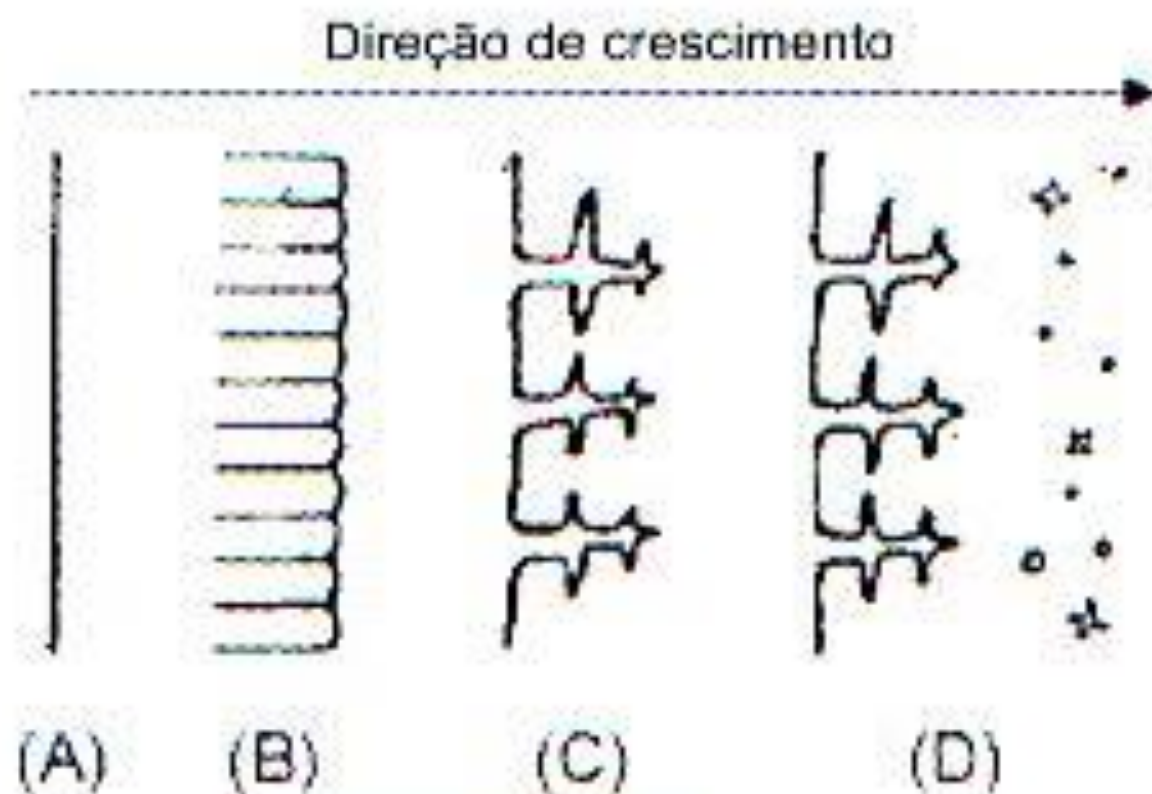
# **Solidificação dos metais**

Por outro lado, a velocidade de crescimento( determinada principalmente pelo gradiente térmico), a constituição da liga e as condições de nucleação do líquido determinarão a forma da frente de crescimento e, conseqüentemente, a forma do grão.

## **Estrutura de Solidificação**

A morfologia de interface da solidificação e o modo de crescimento dos cristais sólidos em direção ao líquido apresenta-se de várias maneiras: Com interface lisa (podendo ser com crescimento planar ou celular), ou com interface difusa (podendo ser com crescimento dendrítico ou com nucleação independente), ver figura 1 seguinte:





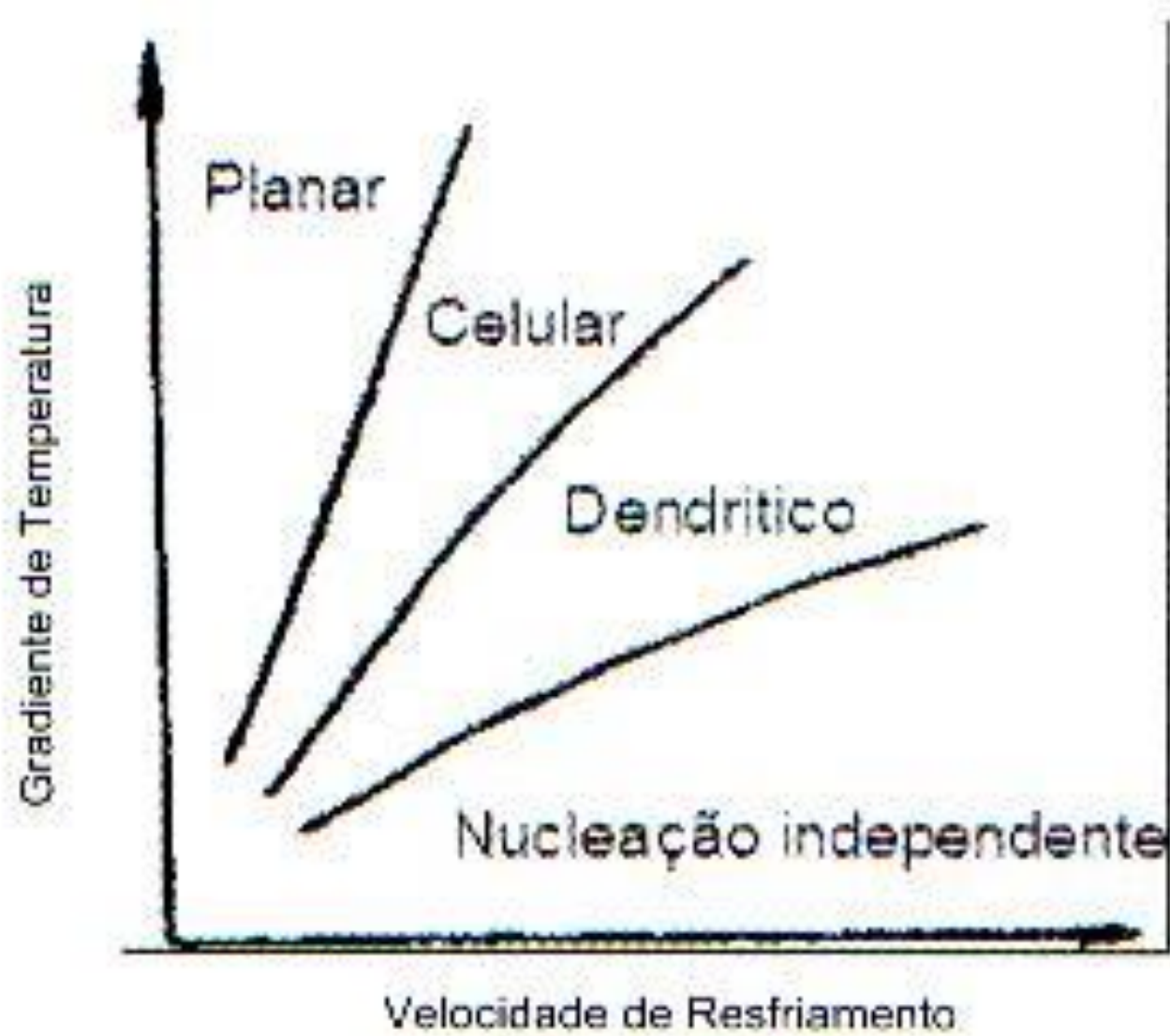
- A – Interface Planar;  
B – Interface Celular;  
C – Crescimento Dendritico;  
D – Nucleação Independente.

*FIGURA 1*

# Estrutura de Solidificação

As condições térmicas que controlam o tipo de interface de crescimento variam de liga para liga. Na figura 2, apresenta-se qualitativamente essas condições, observa-se que uma combinação de alta velocidade de resfriamento juntamente com baixos gradientes térmicos → interface difusa.

Enquanto que uma combinação de baixa velocidade de resfriamento juntamente com altos gradientes térmicos → interface lisa.

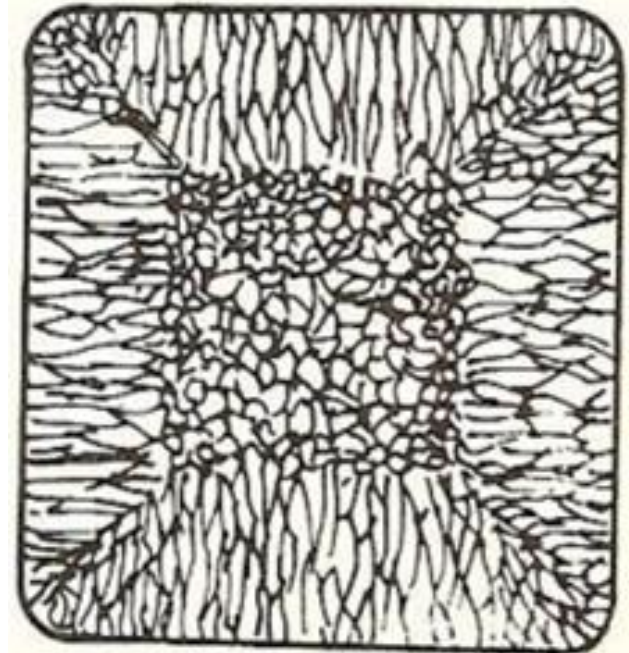


*FIGURA 2*

# Estrutura de Solidificação

O formato da forma (molde) de fundição apresenta grande influência nas propriedades mecânicas do fundido final.

Figura3: solidificação de um metal no interior de uma lingoteira metálica com cantos arredondados; neste caso, a solidificação tem início nas paredes com as quais o metal líquido entra imediatamente em contato, e os cristais tendem a crescer mais rapidamente na direção perpendicular às paredes do molde → estrutura colunar até um determinada profundidade.



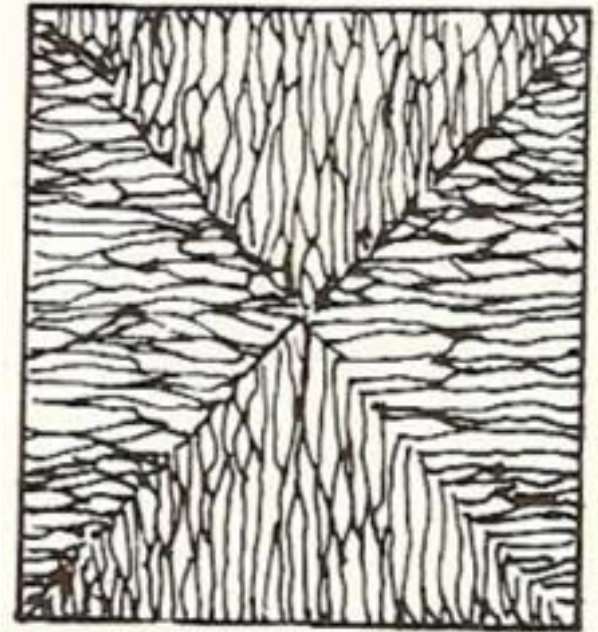
**Figura 3**

# Estrutura de Solidificação

O formato da forma (molde) de fundição apresenta grande influência nas propriedades mecânicas do fundido final.

Figura4: apresenta grupos colunares de cristais, crescendo de paredes contíguas, que se encontram segundo planos diagonais, que são indesejáveis por constituírem planos de maior fragilidade principalmente se submetido a operações de conformação mecânicas posterior.

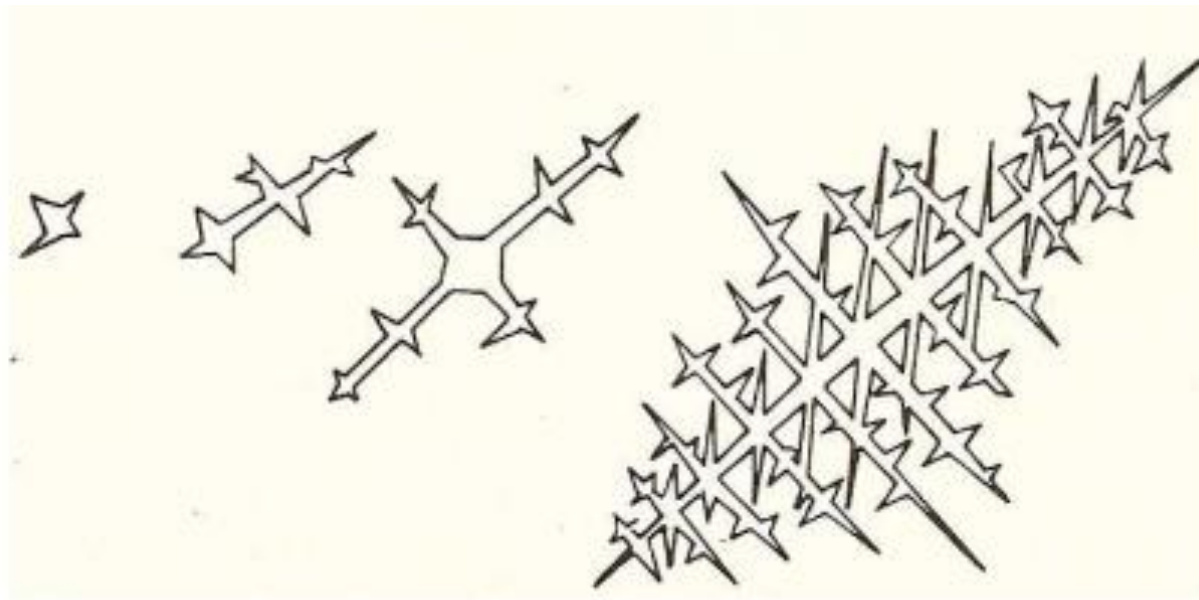
Esse inconveniente é eliminado arredondando-se os cantos.



**Figura 4**

# Estrutura de Solidificação

A figura 5 mostra a forma de crescimento dos cristais durante a solidificação (dendritas).



**Figura 5**

# Macroestrutura de Fundição

Peças fundidas ou lingotes, apresentam 3 zonas distintas em sua macroestrutura:

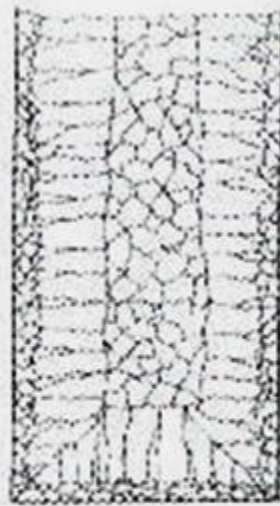
- ✓ 1ª Zona Coquilhada: Os grãos coquilhados nucleiam e crescem sobre as paredes do molde e serão mais notáveis quanto maior for o contato térmico na interface metal/molde.
- ✓ 2ª Zona Colunar: Os grãos colunares desenvolvem-se a partir dos grãos coquilhados, por meio de crescimento seletivo e preferencial no sentido paralelo a extração de calor. O comprimento da zona colunar depende muito do superaquecimento de vazamento e do teor da liga principal.

# Macroestrutura de Fundição

- ✓ 3ª Zona Equiaxial Central: é a zona mais complexa da macroestrutura de fundição. Nela os grãos são equiaxiais na forma, mas são geralmente grandes em tamanho. A formação desta zona é favorecida por altos teores de liga e por baixos superaquecimentos.



(a)

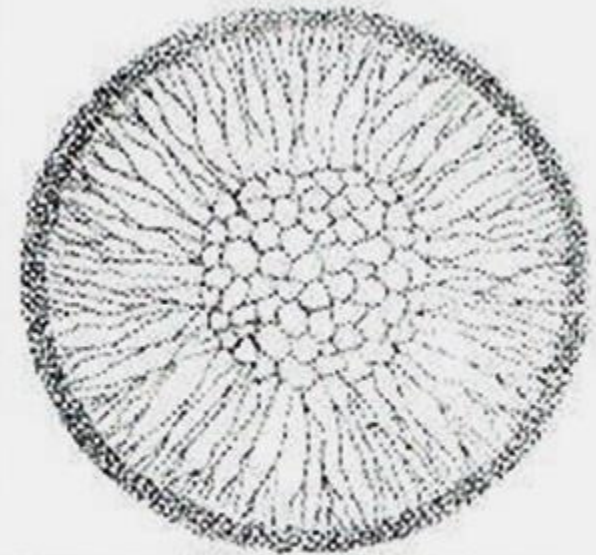


(b)



(c)

a – ausência de zona equiaxial central; b – presença das três zonas; c – ausências das zonas: coquilhada e colunar.



Representação esquemática das zonas estruturais da macroestrutura de fundição.

**FIGURA 6**

FONTE: CAMPOS FILHO & DAVIES (1978)



# Controle da Macroestrutura de Fundição

Em quase toda aplicação, com exceção de apenas algumas muito especiais, é necessário obter estruturas com grãos pequenos e equiaxiais.

Para o desenvolvimento dessas estruturas é necessário suprir o crescimento colunar por meio de estímulos das condições favoráveis à formação de núcleos equiaxiais. Pode ser conseguido por 2 procedimentos principais:

- ✓ Controle da nucleação pelo controle das condições de fundição ou pelo uso de INOCULANTES.
- ✓ Utilização de métodos físicos (a agitação, vibração ultrassônica) para induzir o refino dinâmico de grão.

# Controle da Macroestrutura de Fundição

A adição de um inoculante será efetivo somente se ele permanecer uniformemente distribuído por todo o metal líquido, e não seja contaminado ou liquefeito.

A diminuição da eficiência do inoculante, durante todo o tempo que o metal é conservado no estado líquido antes do vazamento, é conhecido com “FADING”.

No refino dinâmico de grão, se o metal líquido contendo os núcleos de dendríticos iniciais for agitado durante o esfriamento subsequente, ocorre fragmentação das dendritas e resulta um substancial refino de grão.

# Influência de Parâmetros de Fundição no Controle da Macroestrutura.

Controle	Zona da Macroestruturas		
	Coqui- lhada	Colunar	Equiaxial
Aumento do superaquecimento	↓	↑	↓
Uso do massalote	→	↑	↓
Agitação do líquido	↑	↓	↑
Aumento do conteúdo de liga	↑	↓	↑
Adição de inoculante	↑	↓	↑
Aumento na velocidade de extração de calor	↑	↑	↓
Símbolos	↑aumento	↓decrés- cimo	→não produzindo efeito

A figura 7: estrutura de solidificação normal (bruta de fusão) de lingotes de alumínio, a figura 8 mostra a estrutura com inoculação e refino de grão.



*FIGURA 7*

Fonte: CAMPOS FILHO & DAVIES (1978)

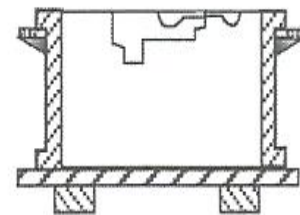
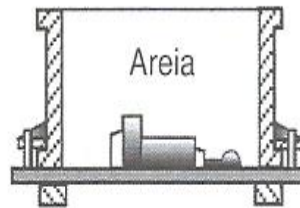
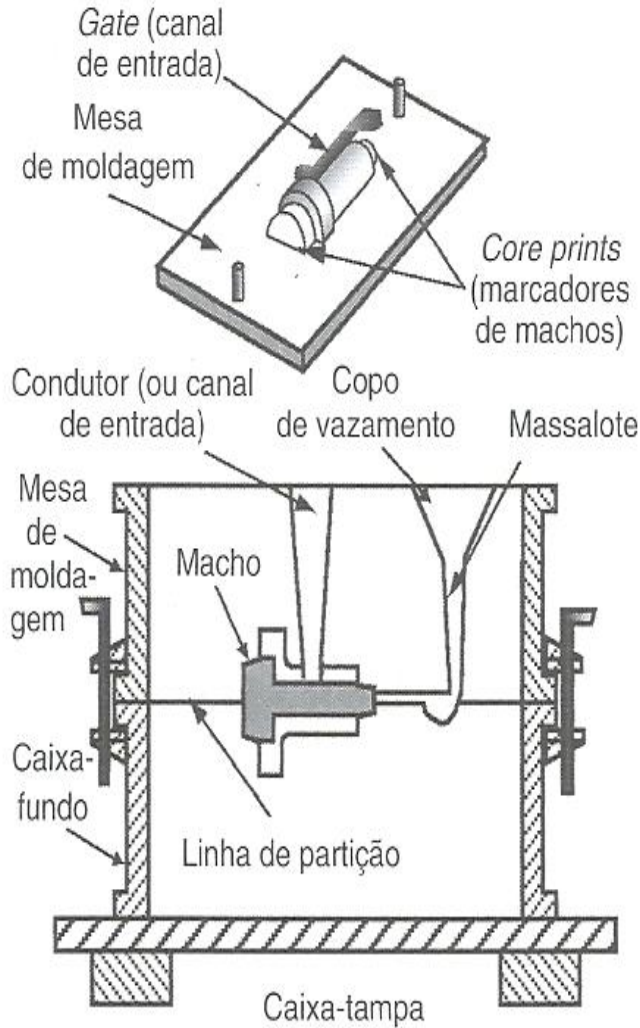


*FIGURA 8*

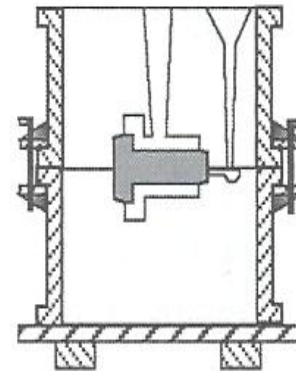
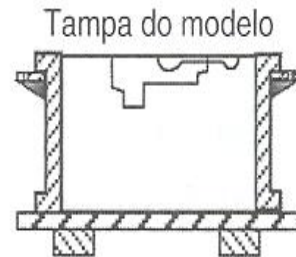
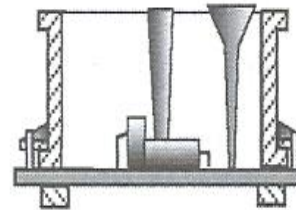
Fonte: CAMPOS FILHO & DAVIES (1978)

<b>Ligas</b>	<b>Efeito Principal do Refino de Grão</b>
Ligas de Alumínio	Reduz trincas de contração e aumenta a resistência e o alongamento
Ligas de Magnésio	Reduz a microporosidade e aumenta a resistência à fadiga.
Ligas de Cobre	Melhora a trabalhabilidade mecânica
Aços-liga	Aumenta a resistência à fadiga
Ligas de Níquel	Aumenta a soldabilidade
Ligas de Estanho	Melhora as propriedades mecânicas em geral

# Fundição em areia



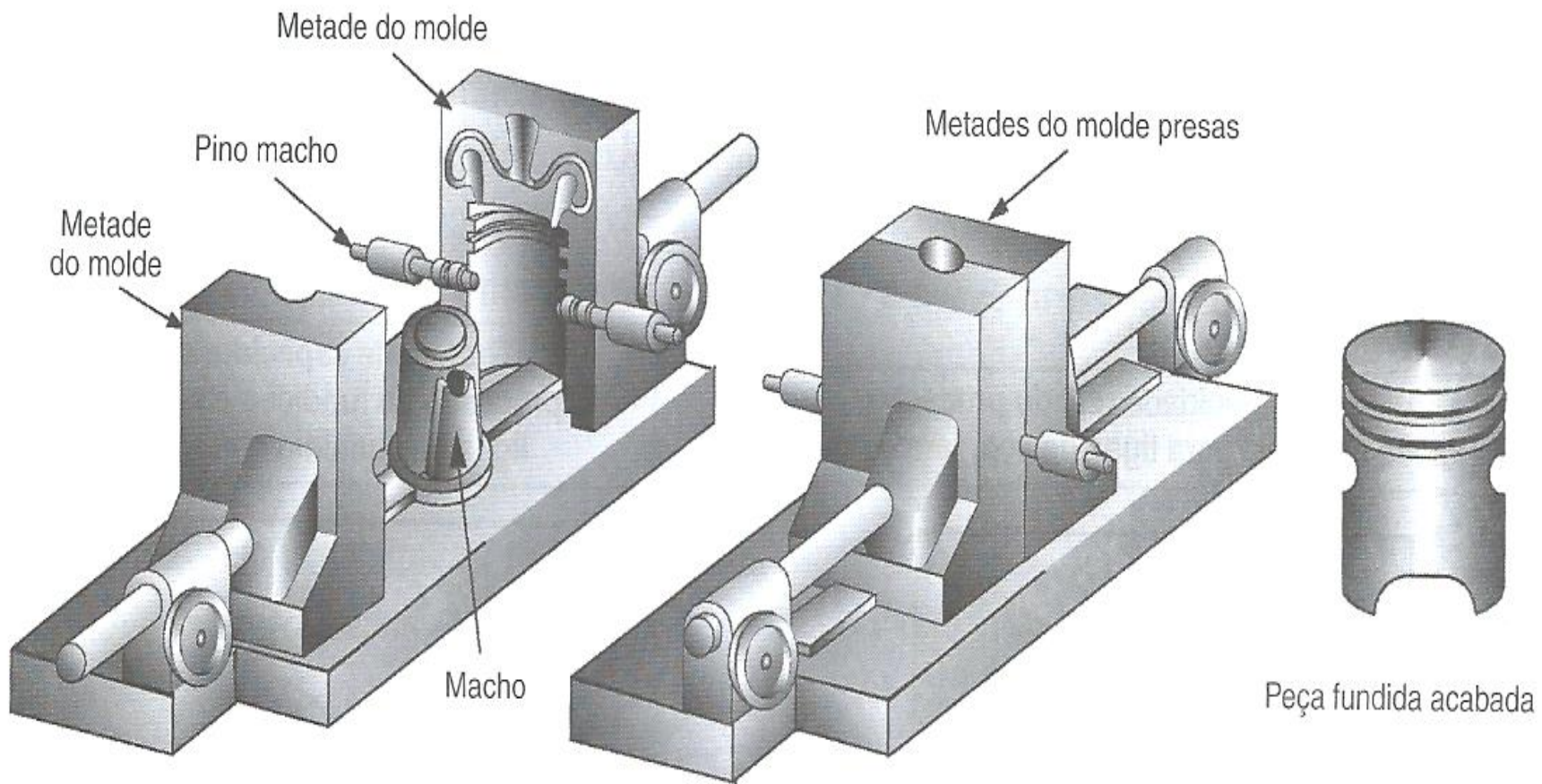
Fundo sobre a mesa de moldagem



Pronto para vazamento



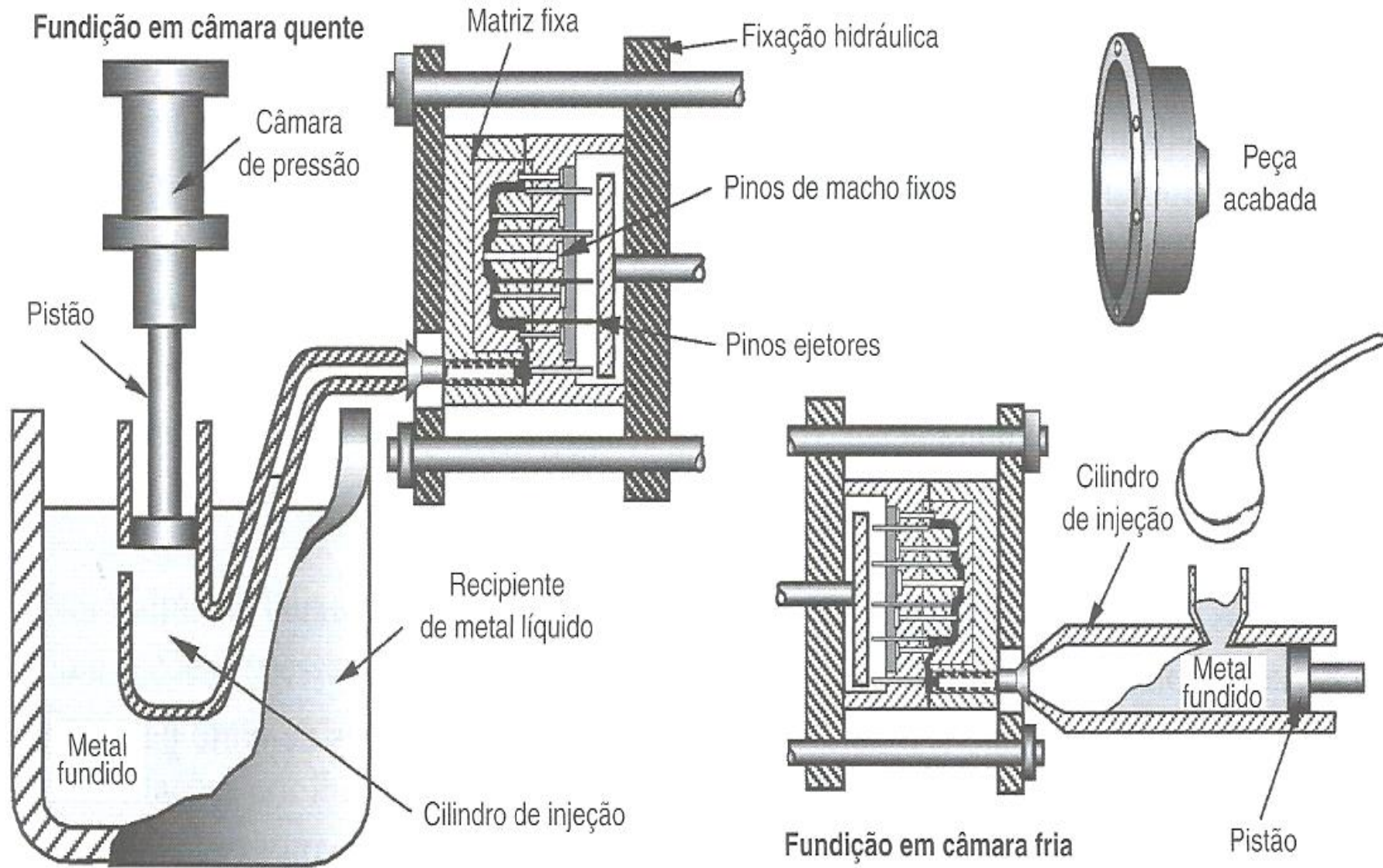
Peça acabada, mostrando o canal de entrada do massalote e o condutor conectados



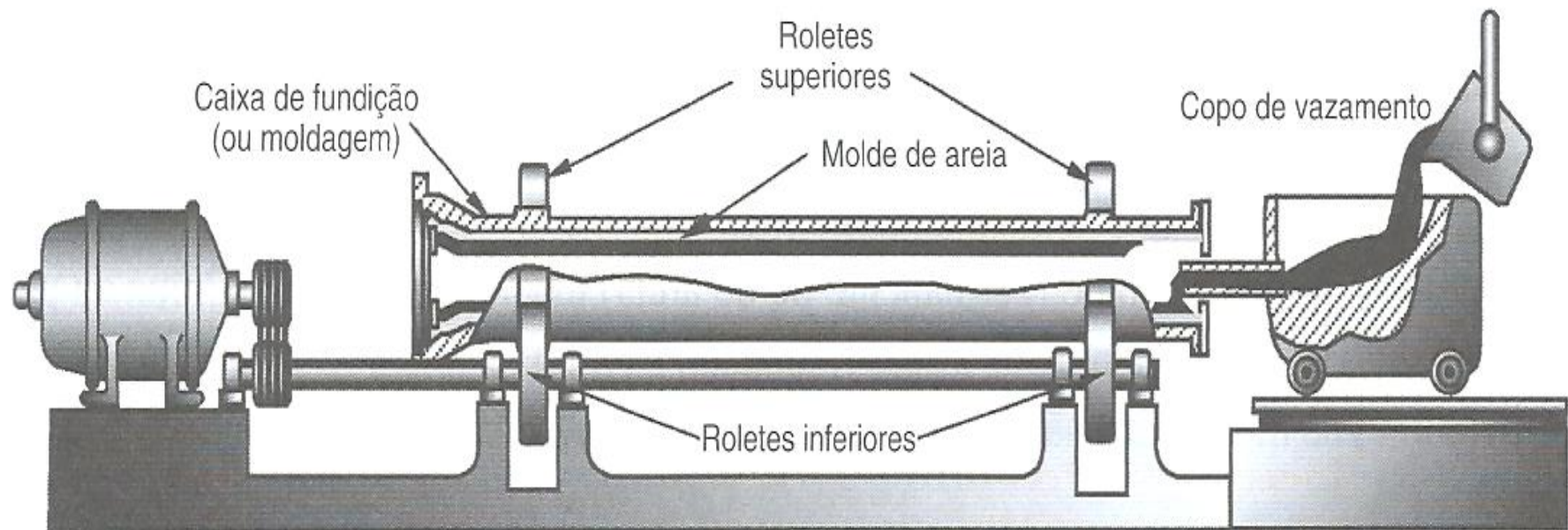
Matriz aberta

Matriz pronta para vazamento

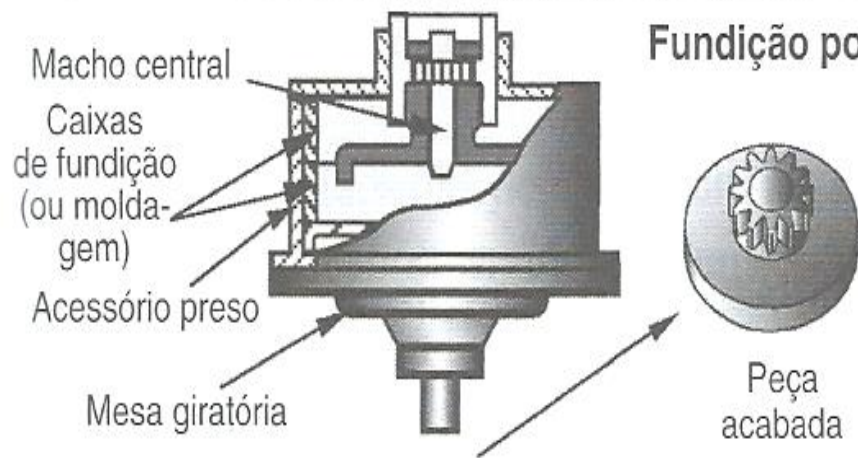
**Fundição por gravidade.**



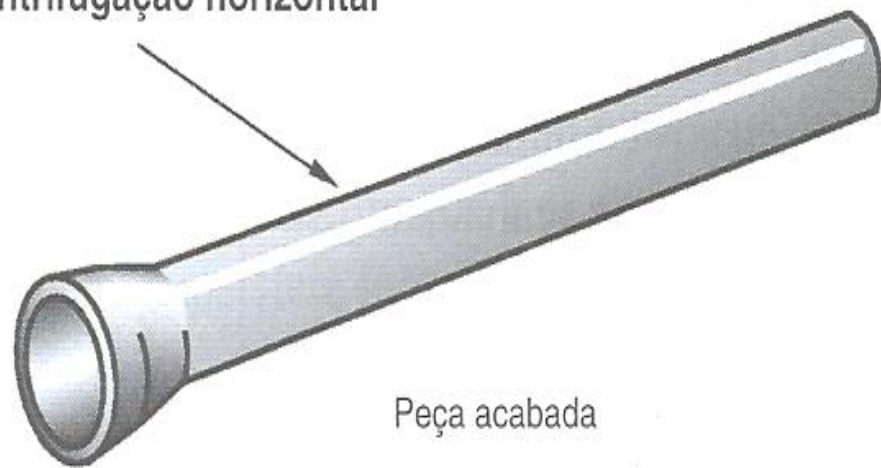




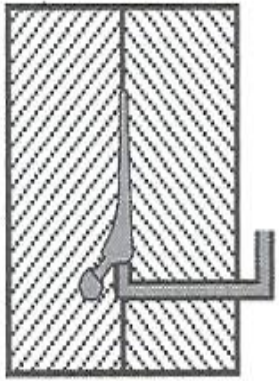
### Fundição por centrifugação horizontal



### Fundição por semicentrifugação



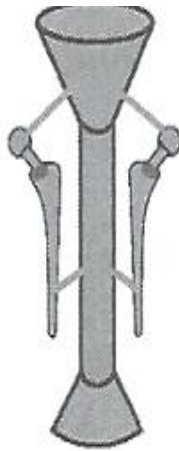
# Fundição por cera perdida.



Injetando cera no molde



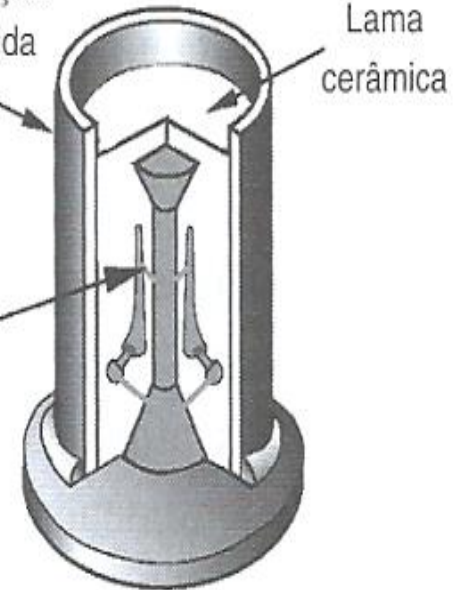
Modelo de cera ejetado do molde



Modelos conectados ao condutor de cera

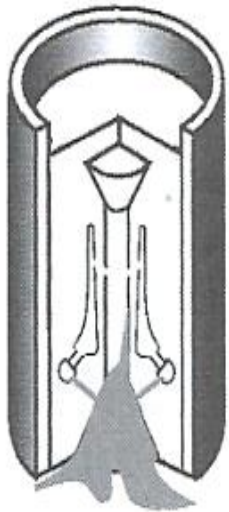
Caixa de fundição por cera perdida

Montagem do condutor do modelo



Caixa de fundição

Após montado, é aquecido para secagem do revestimento e dissolução da cera



Metal derretido injetado no molde quente



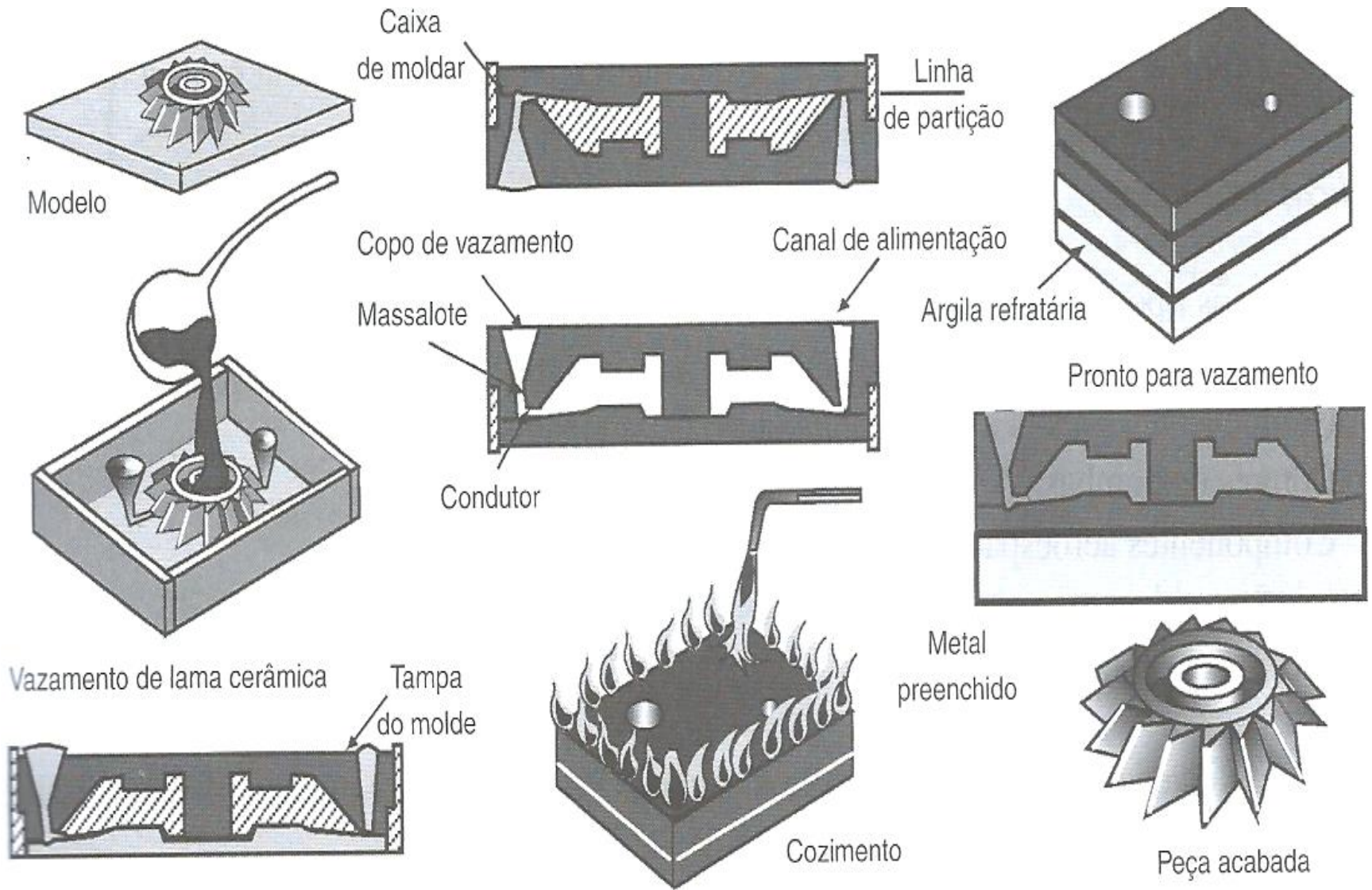
Material de revestimento quebrado



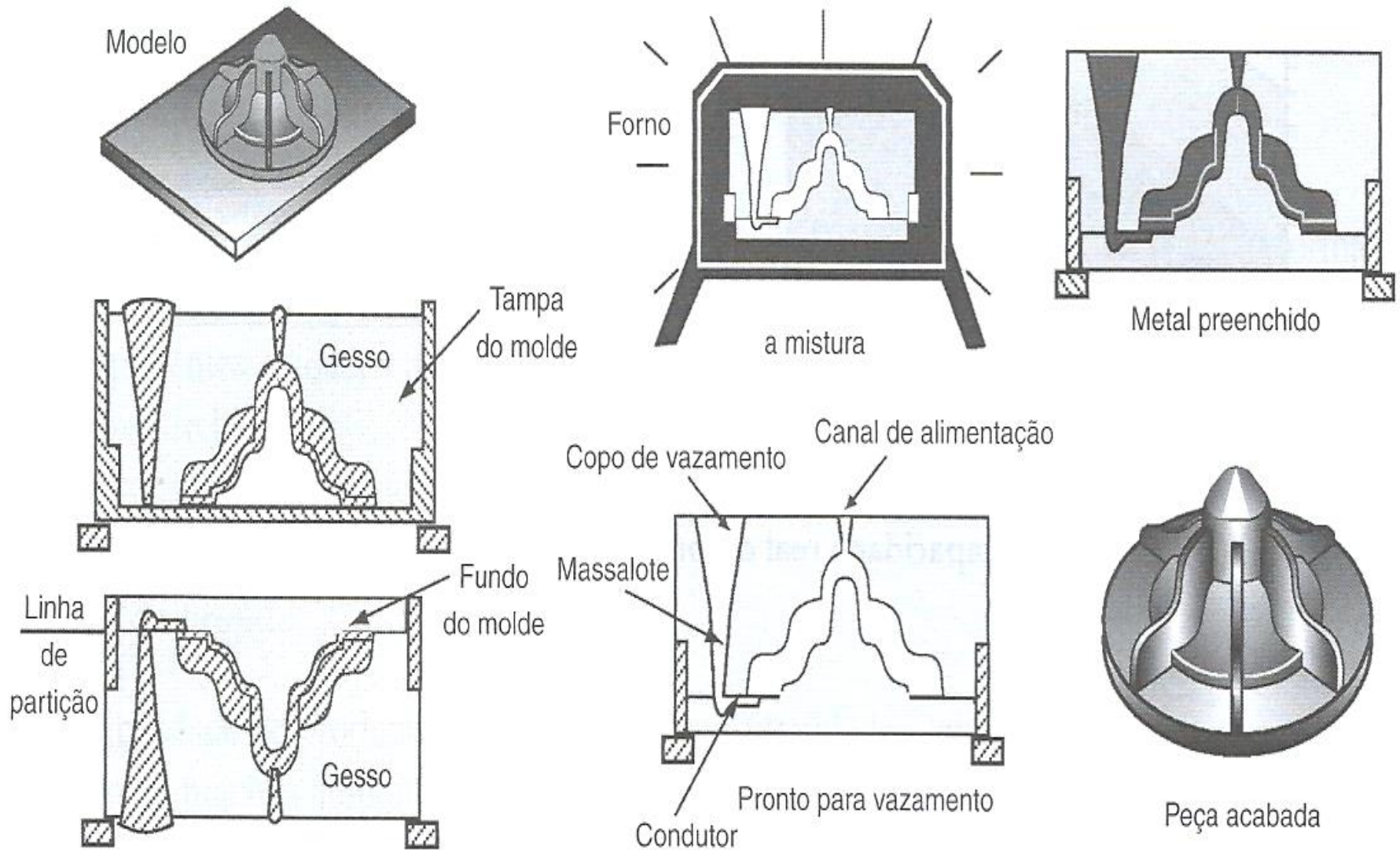
Peça acabada



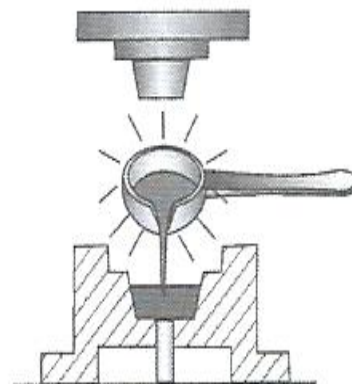
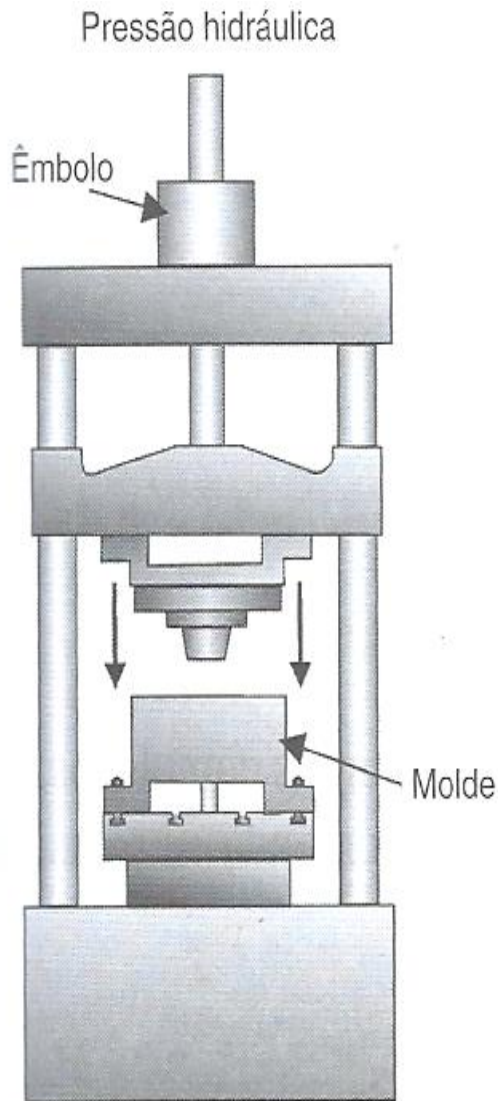
# Fundição com molde cerâmico.



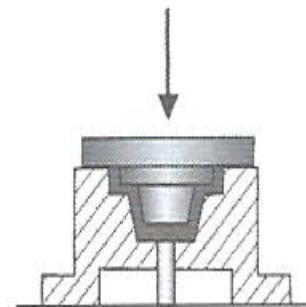
# Fundição com molde de gesso.



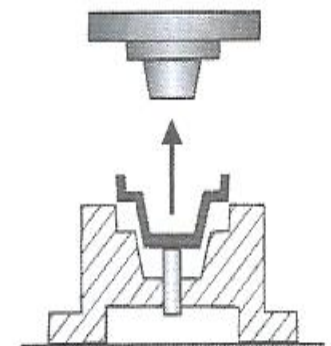
# Fundição por extrusão sob pressão.



Vaze o metal fundido no molde



Pressione o metal no molde e mantenha a pressão



Ejete a peça acabada e repita o processo