



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR3101

Aula-5

**INTRODUÇÃO A
TECNOLOGIA DA
FUNDIÇÃO**



Processos de Fabricação

Recordando:

Qual o objetivo de um processo de fabricação?

Alterar a forma de um corpo e agregar-lhe valor, pelo qual o cliente irá pagar.

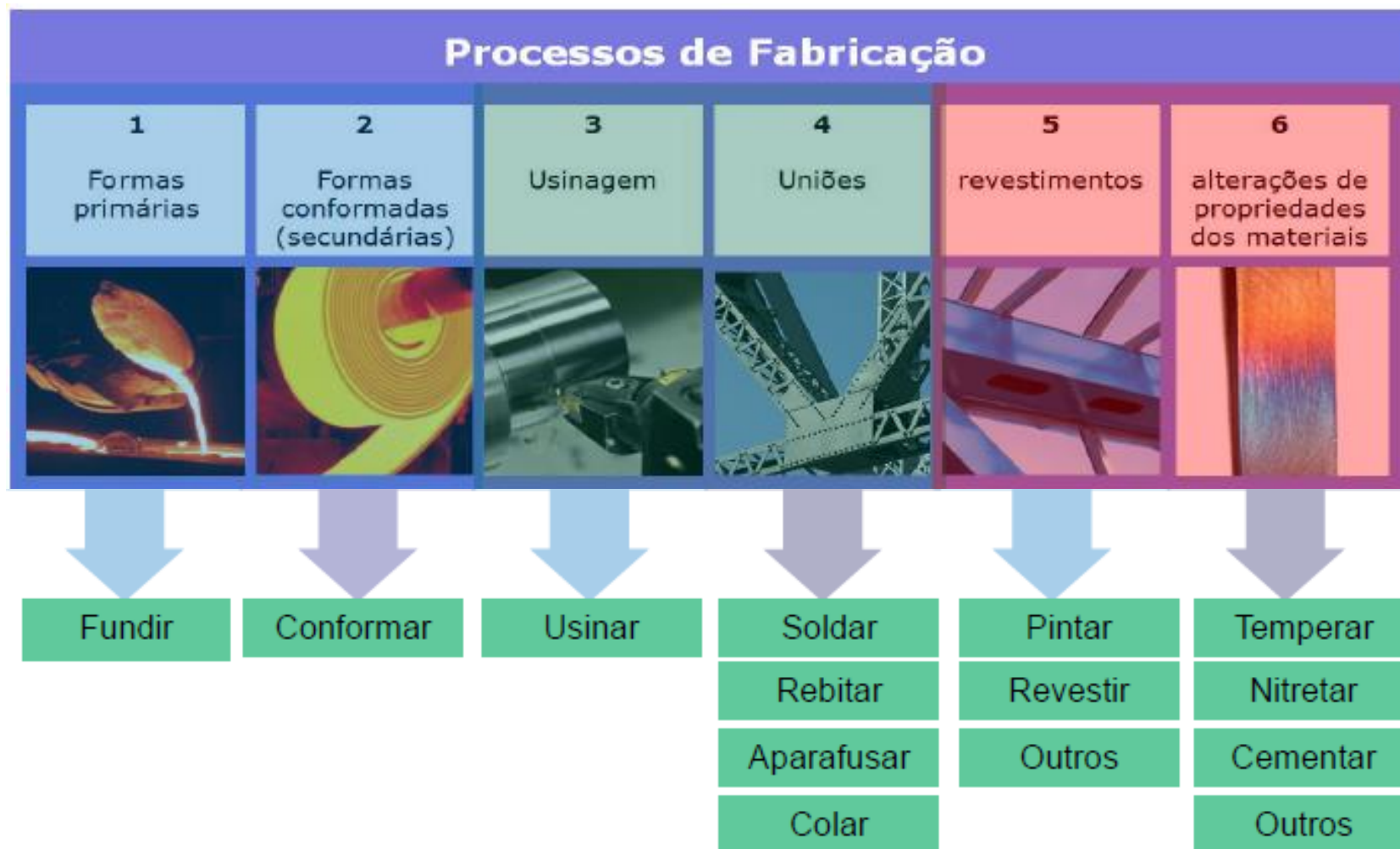
Os processos de fabricação podem ser divididos em dois grandes grupos:

Processos mecânicos: modificações provocadas pela aplicação de tensões externas. Ex.: Usinagem e conformação

Processos metalúrgicos: modificações relacionadas a altas temperaturas. Ex.: Fusão/Solidificação e Sinterização (não chega a fundir o material)



Divisão dos processos de fabricação -DIN8580 -





Processo de Fundição no Beneficiamento:

O Beneficiamento de metais (ex. minério de ferro) é composto por uma série de processos que objetivam, a partir do mineral resultante da Extração, separar e concentrar os metais desejados da ganga (rejeito do minério).

Os processos podem ser físicos e-ou químicos e sua utilização depende dos fins e da qualidade destinados ao minério beneficiado. São eles: Britagem; moagem; deslamagem ou filtração; Classificação e Concentração.

Como a maioria dos metais se encontram na natureza na forma de óxidos, o processo de fundição do mineral associados a outros compostos fazem a redução do mineral em metais mais escórias.





Introdução ao Processo de Fundição:

A transformação dos metais e ligas metálicas em peças de uso geral (industrial e não industrial) podem ser realizadas por intermédio de inúmeros processos/técnicas, 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 Fundição pode ser um processo intermediário ou final

As peças fundidas podem sair com formato definitivo ou quase definitivo, podendo ser submetidos posteriormente à usinagem ou conformação mecânica de modo a obter-se novas formas de peças (tolerâncias e acabamentos); e podem ainda serem 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.



As técnicas tradicionais de fundição incluem a fundição por cera perdida, fundição por espuma perdida, fundição em coquilha e fundição em areia – classificação pelo tipo de molde.

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.

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.

Obs.: Para evitar confusão devido aos regionalismos dos termos, utilizaremos o termo **molde** para a fôrma 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 200Ton.).
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 → produção rápida e em série de grandes quantidades de peças.
5. Economia de peso em virtude de se poder dar a espessura desejada (peças com cavidades).
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



Materiais utilizados na Fundição:

Ligas Ferrosas:

- ☐ Ferro-fundido
- ☐ Aços

Não Ferrosas:

- ☐ Alumínio
- ☐ Bronze

Outros materiais:

- ☐ Latão
- ☐ Vidros
- ☐ Polímeros
- ☐ Compósitos



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, assim como a forma do molde e seu projeto.

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.

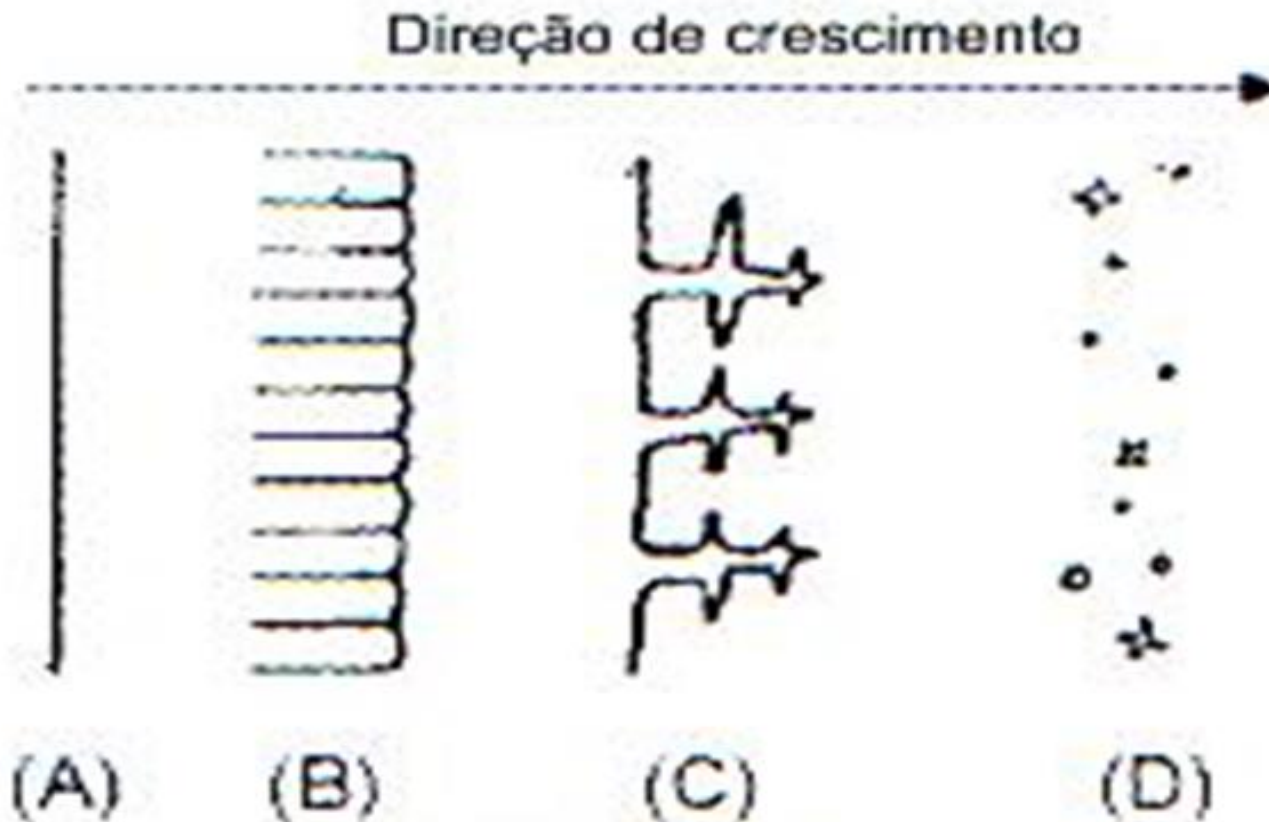
Crescimento traduz o modo pelo qual esses núcleos crescem sob a forma de cristais o grãos cristalinos. Desta forma a etapa de nucleação, ou mais precisamente a quantidade de núcleos determinará o tamanho de grão nas células.

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.



Estrutura de Solidificação

As condições térmicas que controlam o tipo de interface de crescimento variam de liga para liga e sofrem também interferência do formato da peça e sua dimensão. 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.

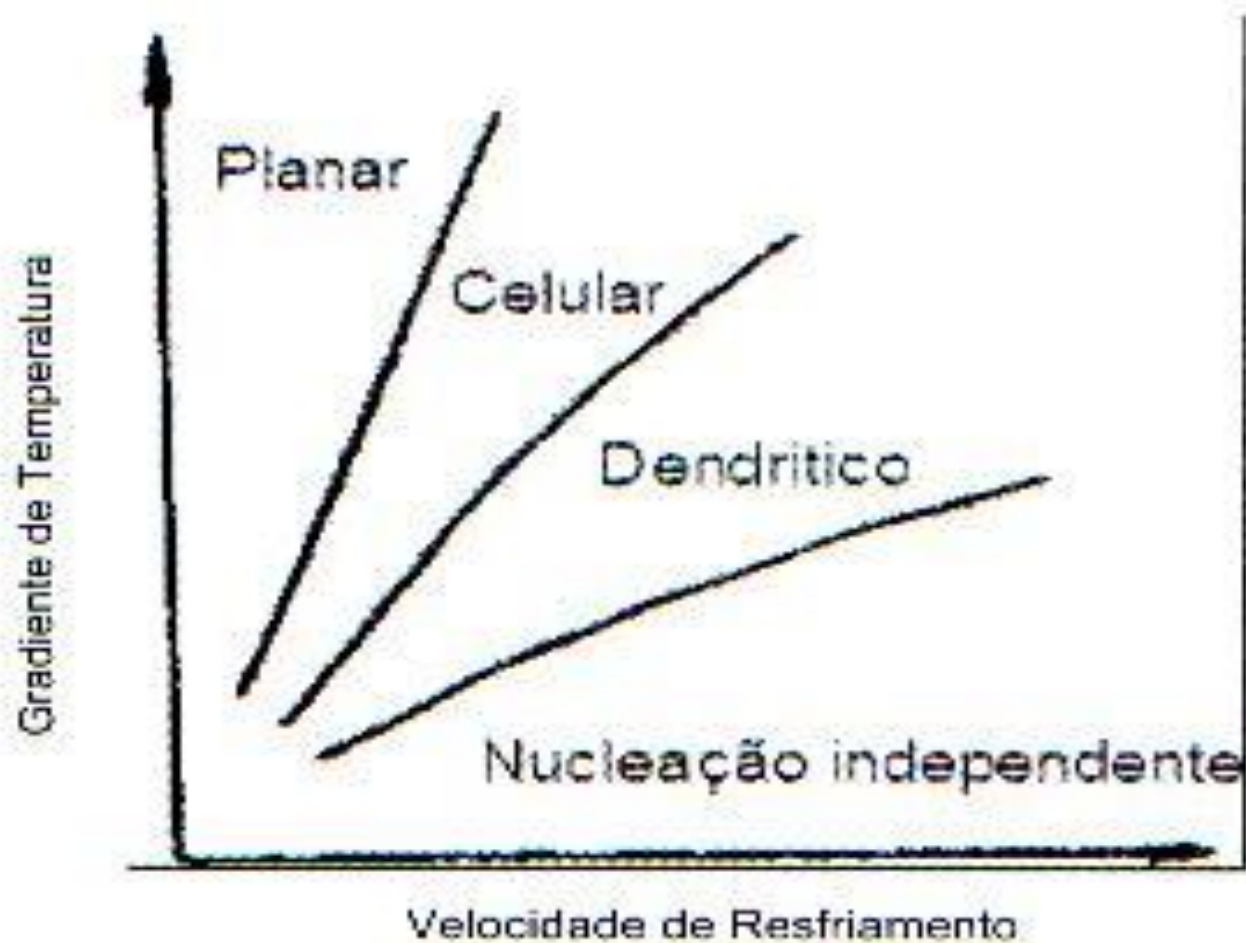


FIGURA 2



Estrutura de Solidificação

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

Figura 3: 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 uma determinada profundidade.

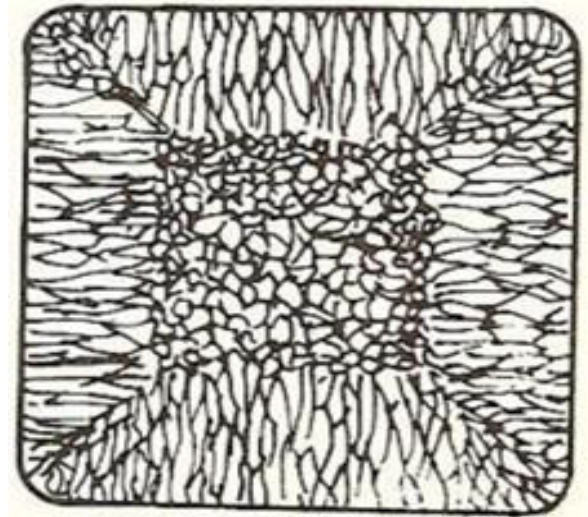


Figura 3



Estrutura de Solidificação

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

Figura 4: 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.

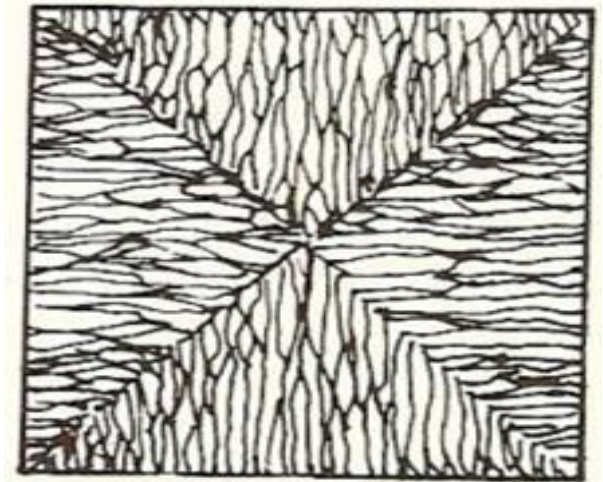


Figura 4



Estrutura de Solidificação

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

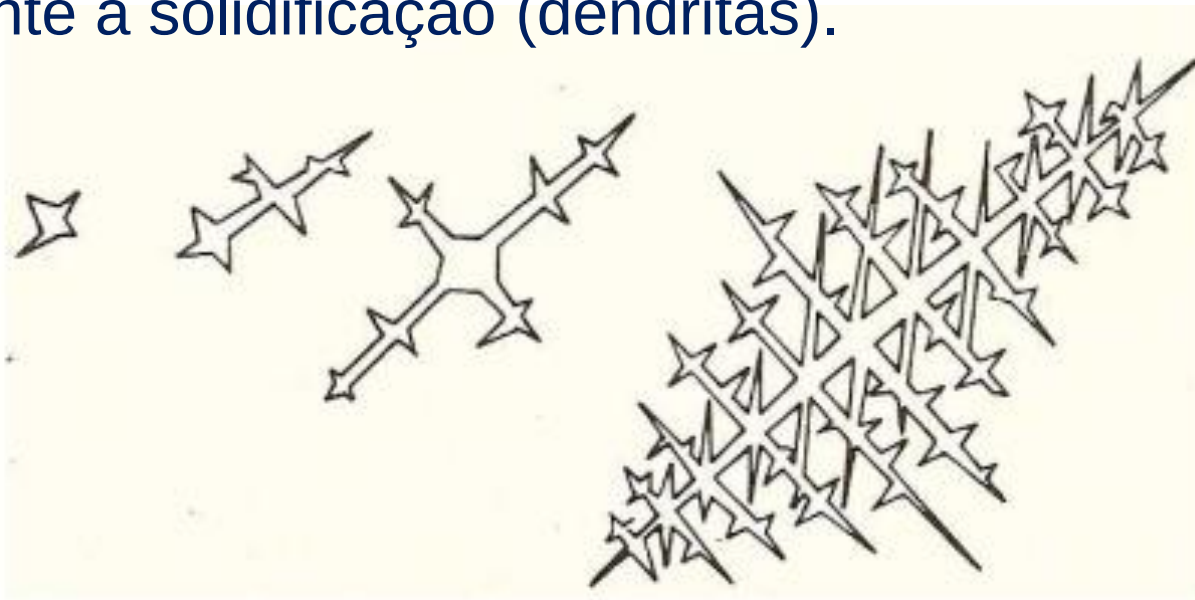


Figura 5



Macroestrutura de Fundição

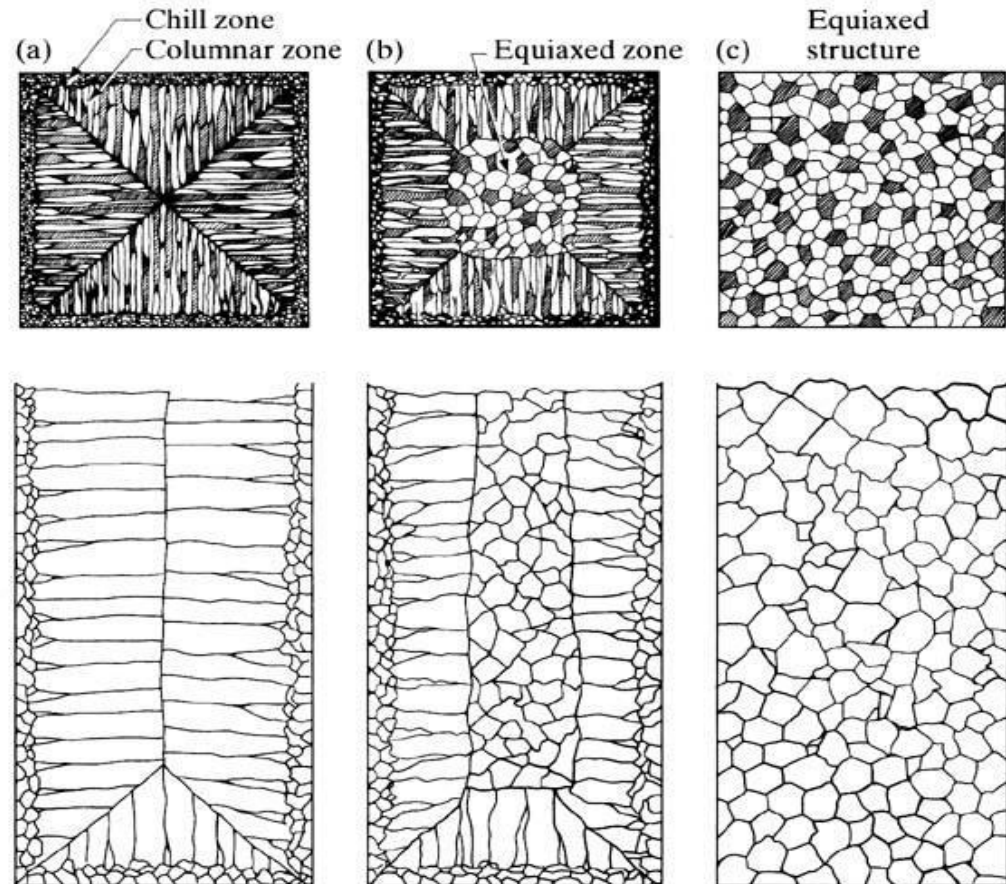
Peças fundidas ou lingotes, apresentam 3 zonas distintas em sua macroestrutura:

- ✓ 1°- 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.
- ✓ 2°- 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

- ✓ 3°- 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) Ausência de zona equiaxial central;
(b) Presença das três zonas;
(c) Ausência das zonas coquilhadas e colunares

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 ultra-sônica) 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	→ sem efeito

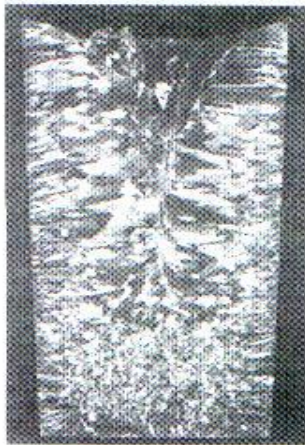


FIGURA 7

Fonte: CAMPOS FILHO & DAVIES (1978)

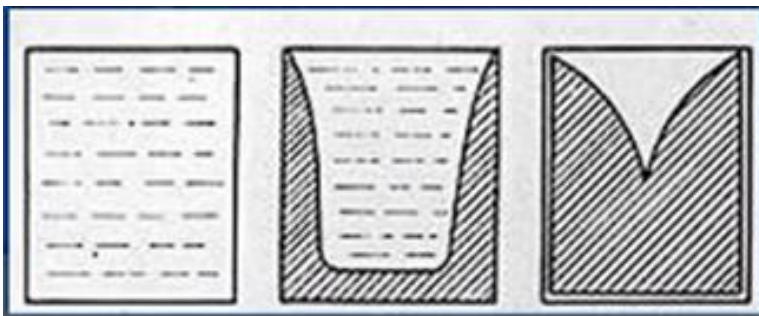


FIGURA 8

Fonte: CAMPOS FILHO & DAVIES (1978)

Figura 7: Estrutura de solidificação normal (bruta de fusão) de lingotes de alumínio;
Figura 8 mostra a estrutura com inoculação e refino de grão.

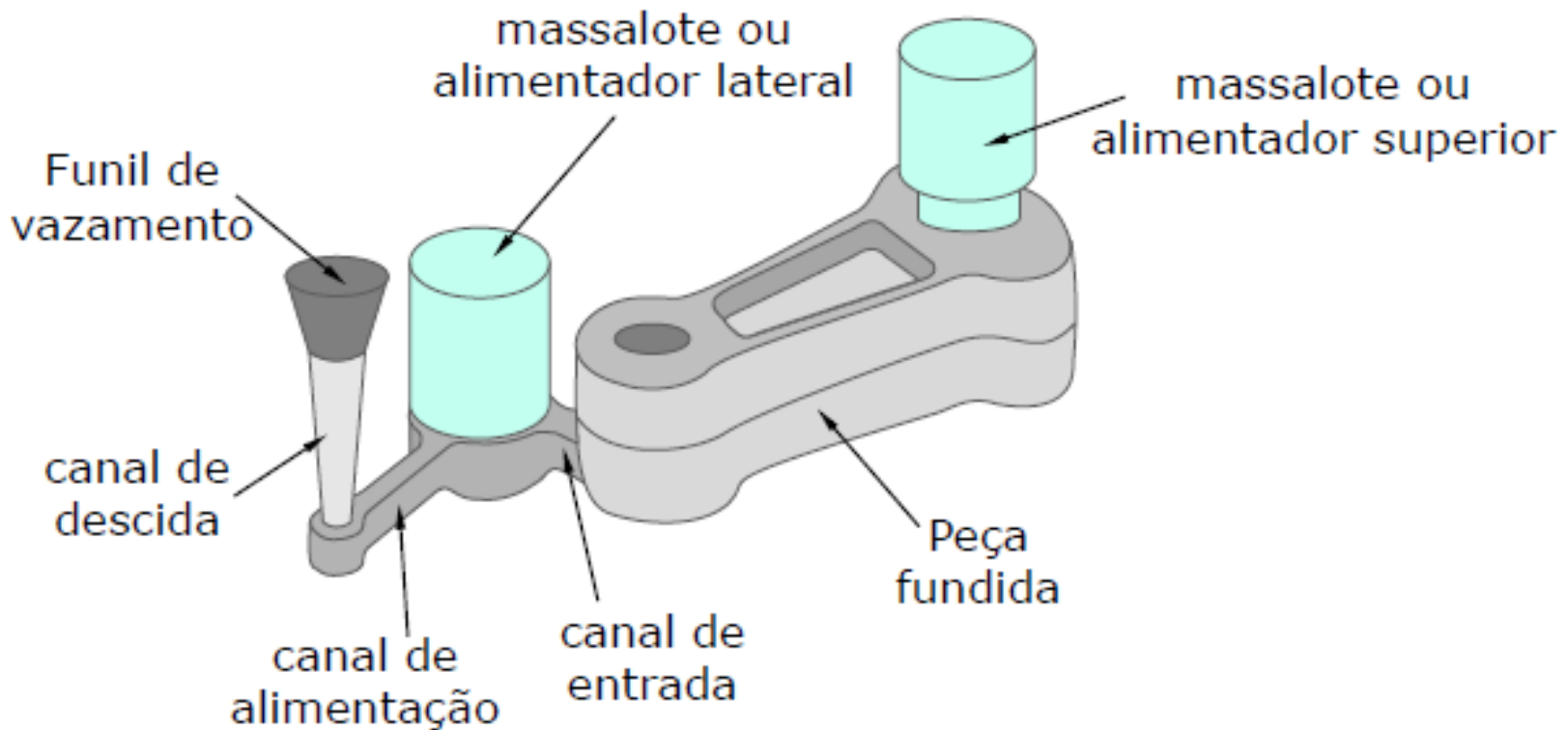
Contração volumétrica no resfriamento:





Fabricação do Molde

Contração de volume: como resolver esse problema.



Ligas	Efeito Principal do Refino de Grão
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

Principais inoculantes utilizados nas ligas metálicas:

Metais e ligas	Inoculantes	Eficiência relativa
Ligas de Magnésio	Carbono	Alta
	Cloreto de Ferro	Alta
	Zircônio	Moderada
Alumínio e ligas	Boro	Alta
	Titânio	Alta
	Nióbio	Moderada
Titânio e ligas	Terras raras	Moderada
	Níquel	Moderada
	Cobalto	Baixa
Ferro Fundido	Alumínio	Alta
	Boro	Alta
	Ferro-silício	Alta
	Terras raras	Moderada
Aço comum	Nióbio	Moderada
	Titânio	Moderada



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.

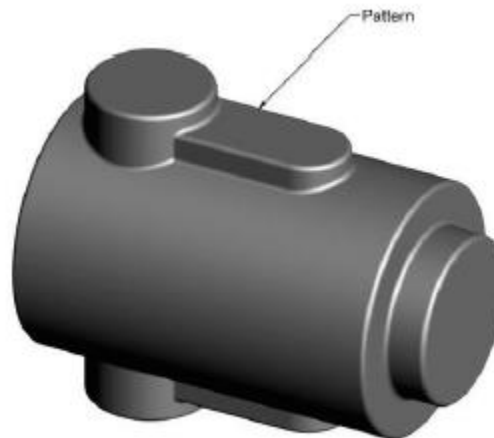


Fabricação dos Modelos:

Um modelo para uma peça pode ser feito de várias maneiras diferentes, classificadas nos quatro tipos a seguir:

1. Modelo sólido - é um modelo da peça como uma peça única. É o mais fácil de fabricar, mas pode causar algumas dificuldades na fabricação do molde.

□ Os modelos sólidos são normalmente usados para peças geometricamente simples que são produzidas em pequenas quantidades.

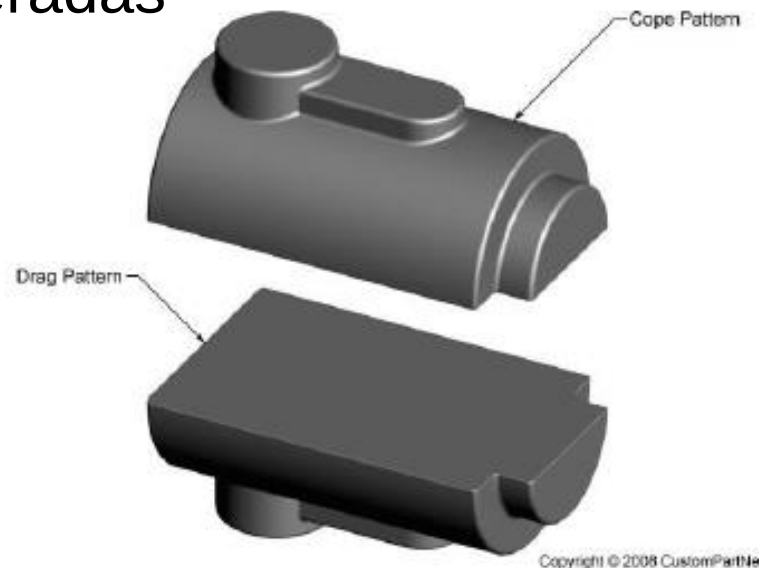




Fabricação dos Modelos:

2. Modelo bi partido – neste o modelo é dividido em duas peças, essas se unem ao longo da linha de partição do molde. O uso de duas peças separadas permite a reprodução de cavidades no molde.

□ Os padrões bi partidos são normalmente usados para peças geometricamente complexas e produzidas em quantidades moderadas

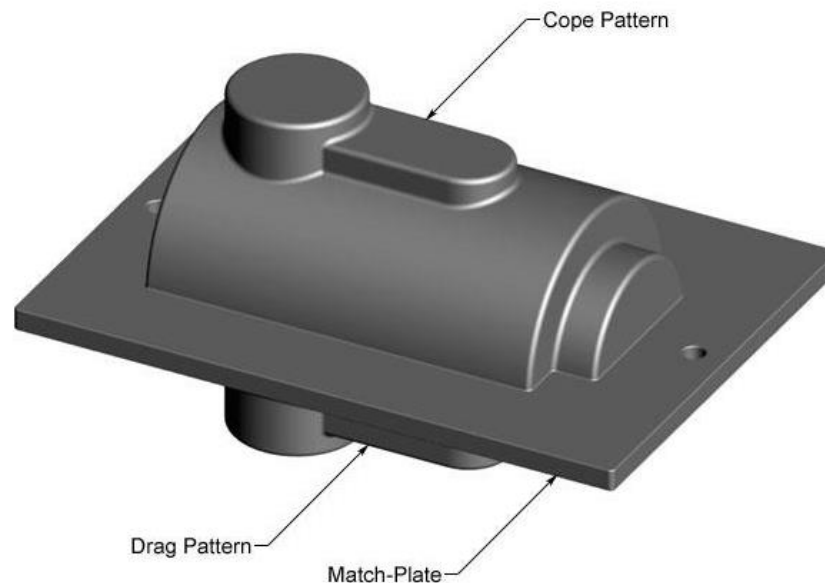




Fabricação dos Modelos:

3. Modelo de placa de correspondência - é semelhante a um modelo bi partido, exceto que cada metade do padrão é anexada a lados opostos de uma única placa.

□ Esse tipo de modelo garante o alinhamento adequado das cavidades do molde e permitem quantidades maiores de produção - geralmente são usados quando o processo é automatizado.

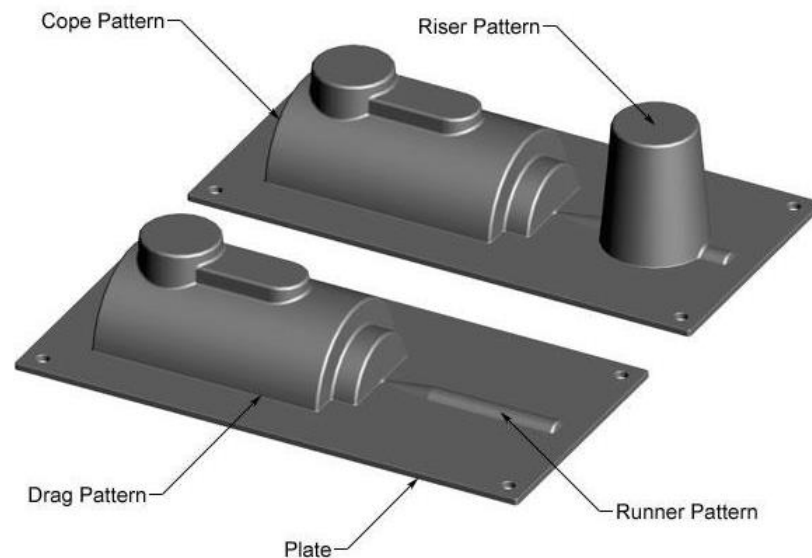




Fabricação dos Modelos:

4. Modelo de arrastar - é semelhante a um modelo de placa, exceto que cada metade está em uma placa separada, e as metades do molde são feitas independentemente.

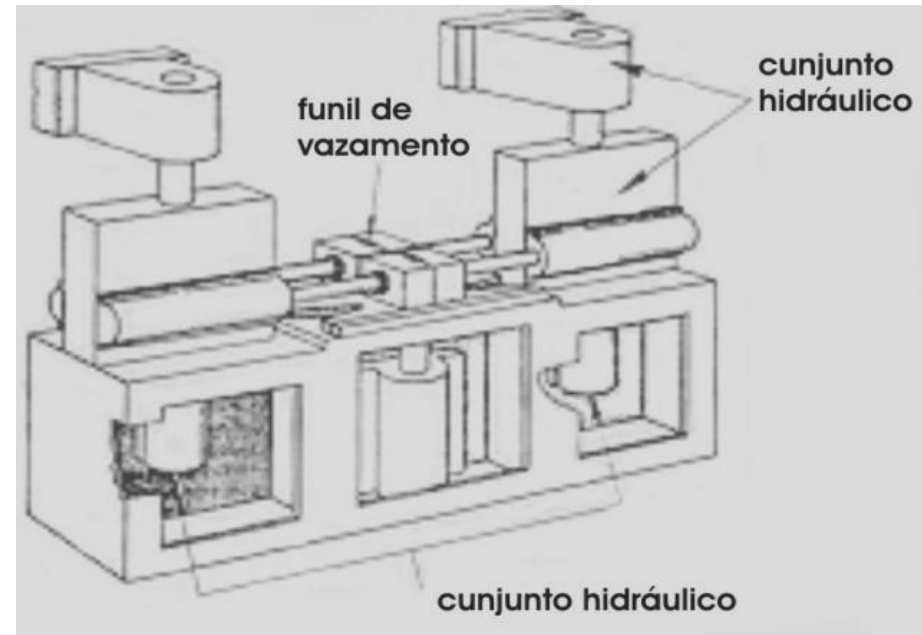
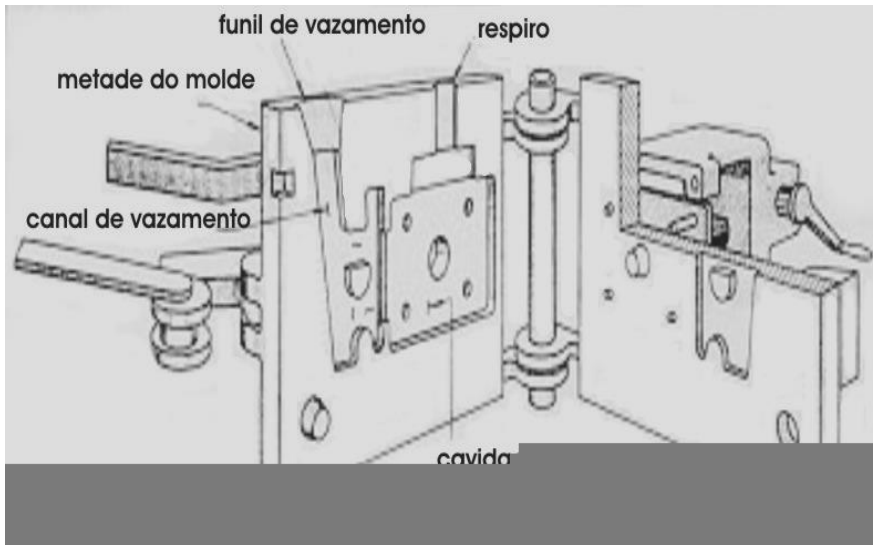
□ Os padrões de lidar e arrastar são frequentemente desejáveis para peças fundidas maiores, onde os outros tipos de modelos ficariam muito pesados. São usados para quantidades maiores de produção e geralmente quando o processo é automatizado.





Fabricação do Molde

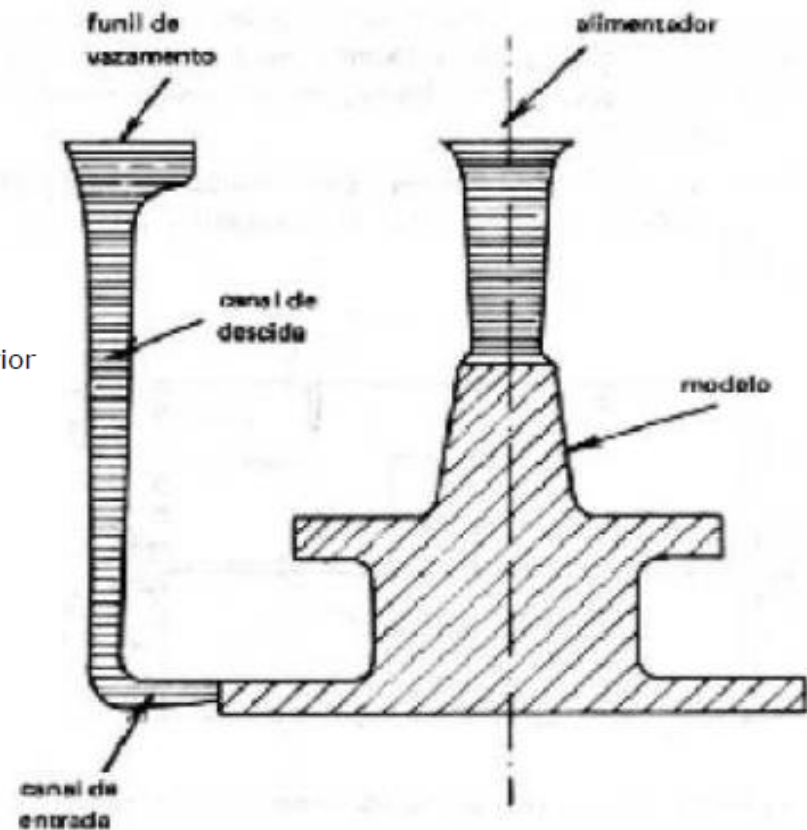
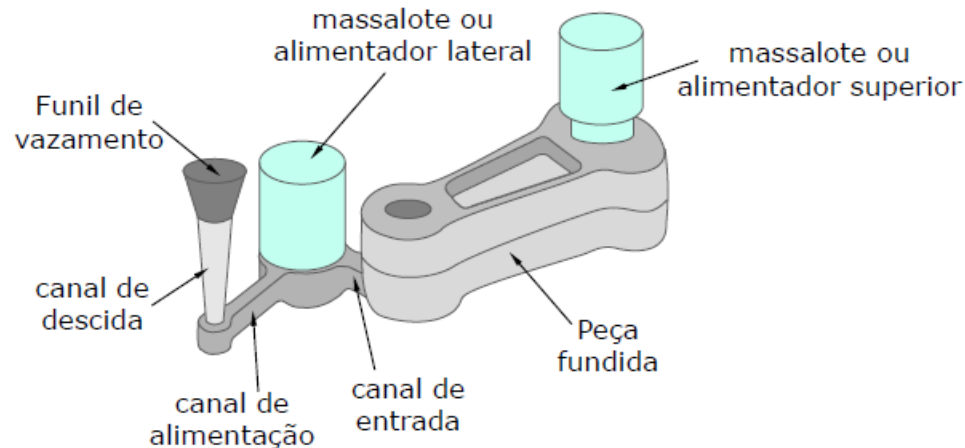
O molde é fundamental para a qualidade da peça fundida.
A qualidade da peça fundida está diretamente ligada à
qualidade do molde.





Fabricação do Molde

Contração de volume: como resolver esse problema.





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.

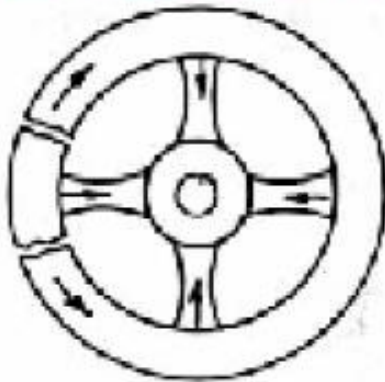
Massalote

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. Deve ser posicionado de tal forma a ser a última parte a solidificar.

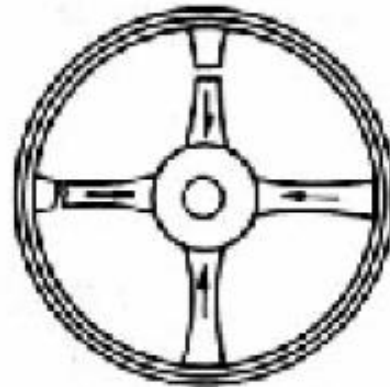


Fabricação do Molde

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



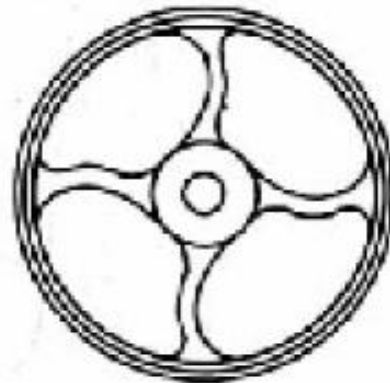
incorreto



incorreto



correto



correto



Variações técnicas do processo de Fundição:

- ☐ Fundição em molde de areia
- ☐ Fundição em casca
- ☐ Fundição por injeção
- ☐ Fundição em moldes permanentes
- ☐ Fundição em cera perdida
- ☐ Outros



Como definir a técnica de Fundição → Parâmetros de Seleção:

- ☐ Material (temperatura de fusão, fluidez, dilatação térmica, reatividade)
- ☐ Dimensão
- ☐ Espessura de parede
- ☐ Exatidão dimensional
- ☐ Custo de matéria-prima
- ☐ Custo do ferramental
- ☐ Custo do energético
- ☐ Incidência de defeitos
- ☐ Índice de refugo.



Fundição em molde de areia:

- ❑ **Moldes:** Na fundição em areia, o principal equipamento é o molde, que contém vários componentes. Normalmente o molde é dividido em duas metades, que se encontram ao longo de uma linha de partição. Ambas as metades do molde estão contidas dentro de uma caixa
- ❑ A areia pode ser compactada manualmente, mas as máquinas que usam pressão ou impacto garantem uma maior uniformidade da compactação e requerem muito menos tempo, aumentando assim a taxa de produção.
- ❑ Após a areia ter sido empacotada o modelo é removido, gerando uma cavidade que representa o negativo da peça.
- ❑ Algumas superfícies internas da fundição podem ser formadas por núcleos (“machos”), que são peças adicionais que formam os orifícios, cavidades e passagens internos da fundição

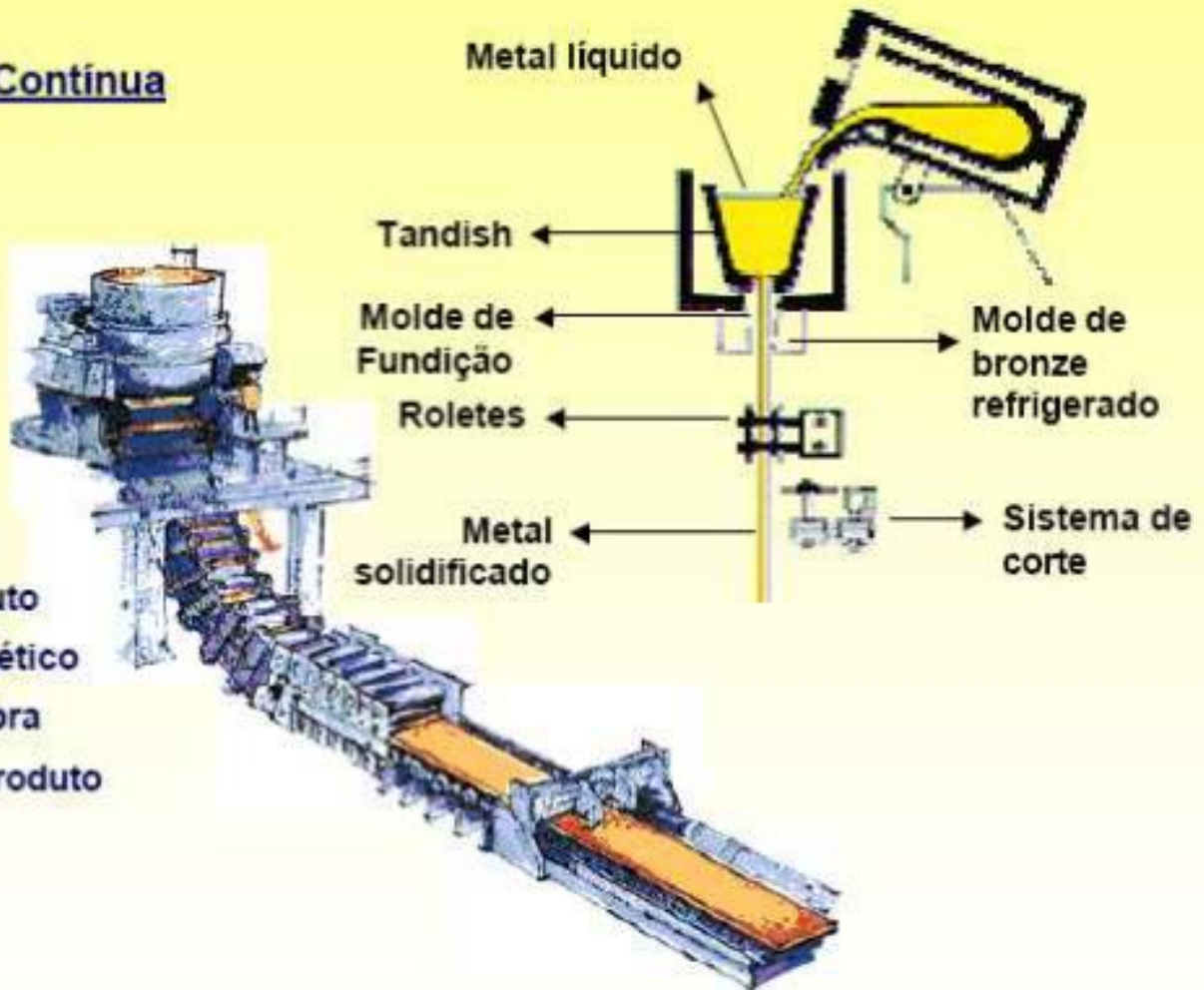


FUNDIÇÃO: Fundição contínua

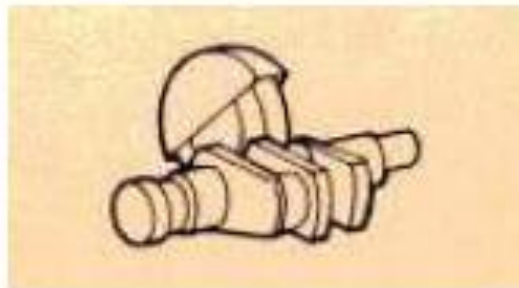
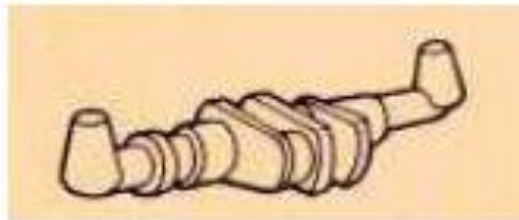
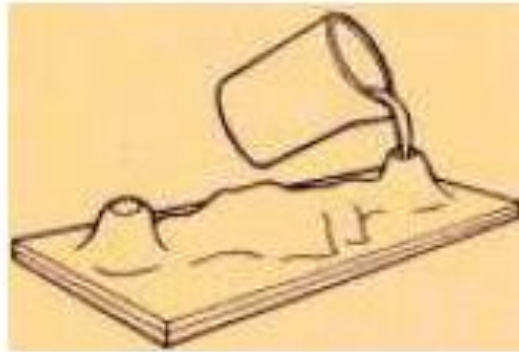
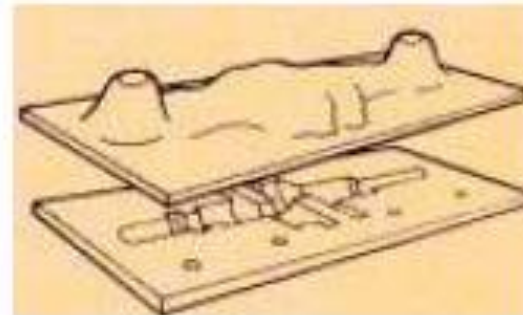
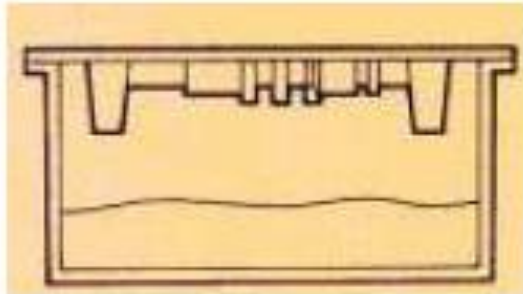
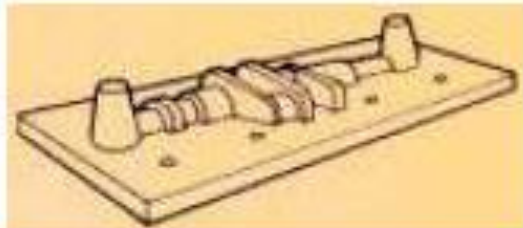
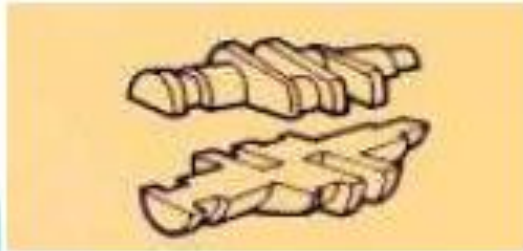
Fundição Contínua

Vantagens

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



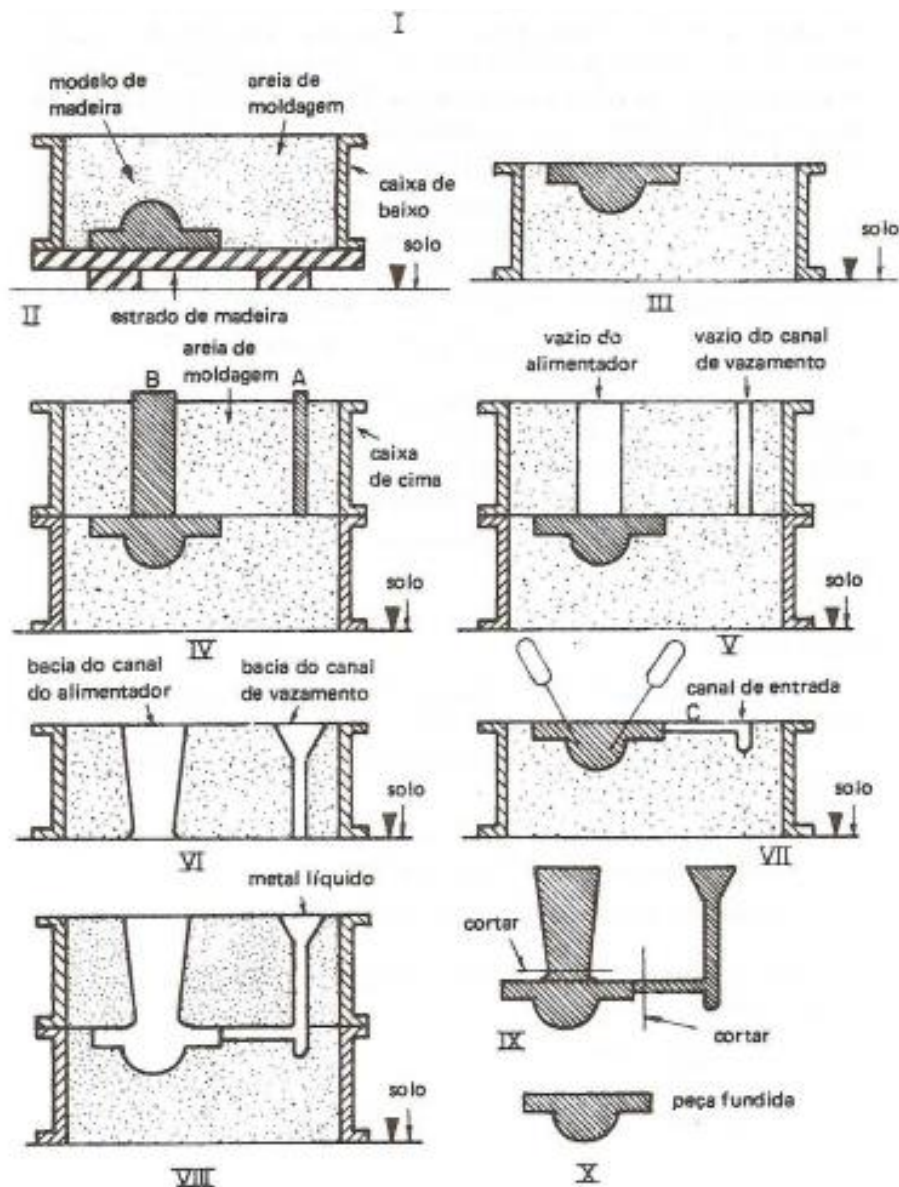
Fundição em Molde de Areia:



1. Elaboração de um modelo permanente
2. Fixação do modelo a uma placa metálica que é aquecida (150°C a 300°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



Seqüência de operações na fundição
em areia verde.

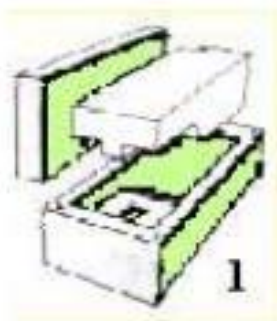




Sand casting animation.mp4



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

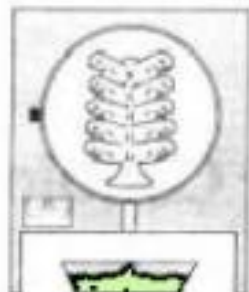
5. Destruição do modelo de cera por fusão

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



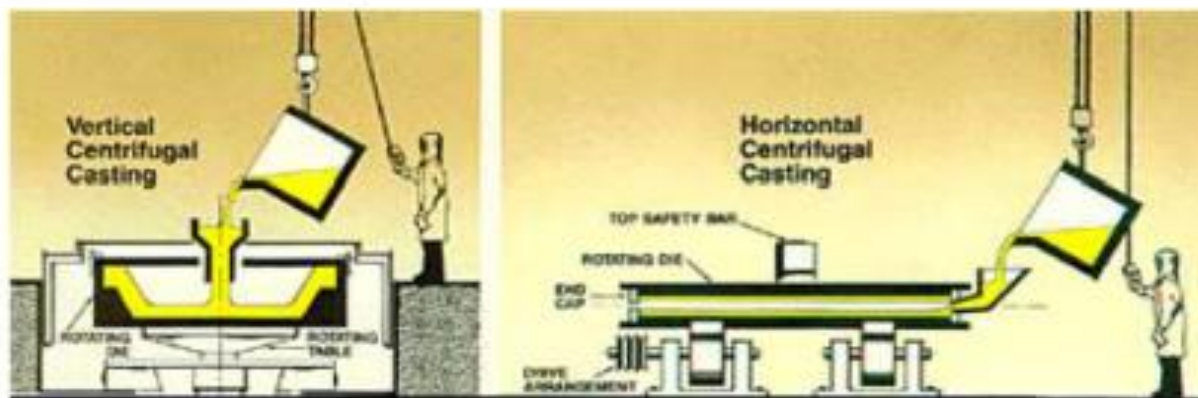
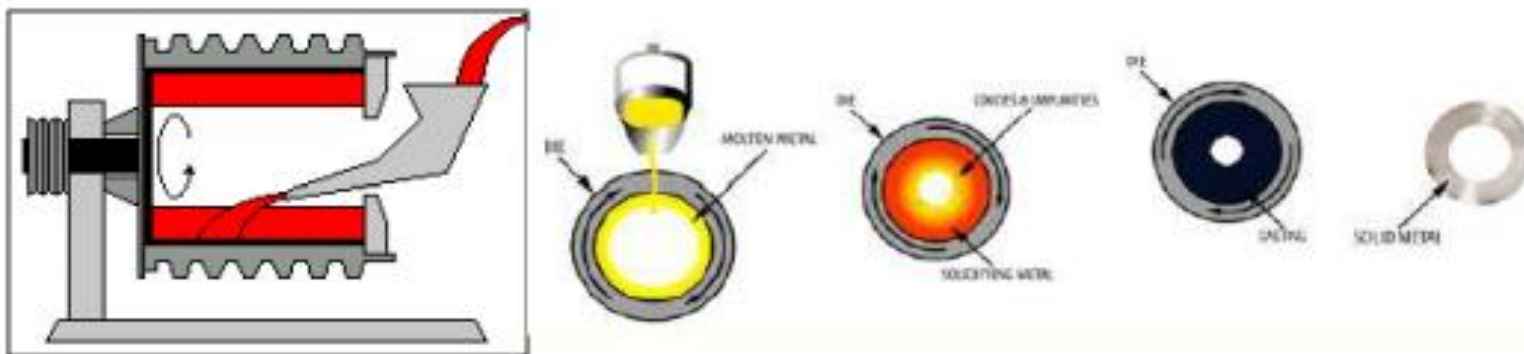
3

6



FUNDIÇÃO: Fundição por centrifugação

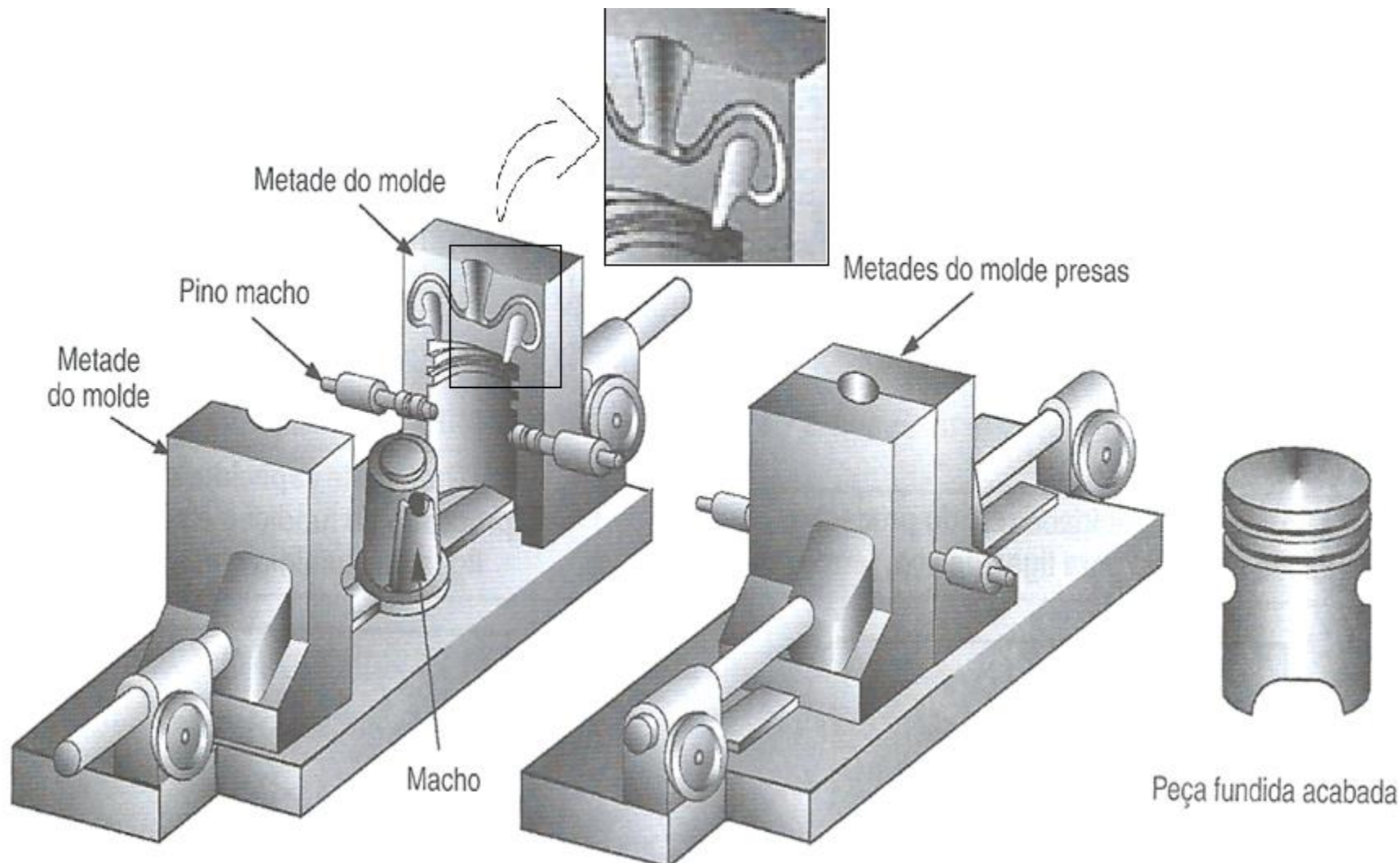
Um dos exemplos mais conhecidos de utilização do processo corresponde à fabricação de tubos de ferro fundido para linhas de suprimento de água.

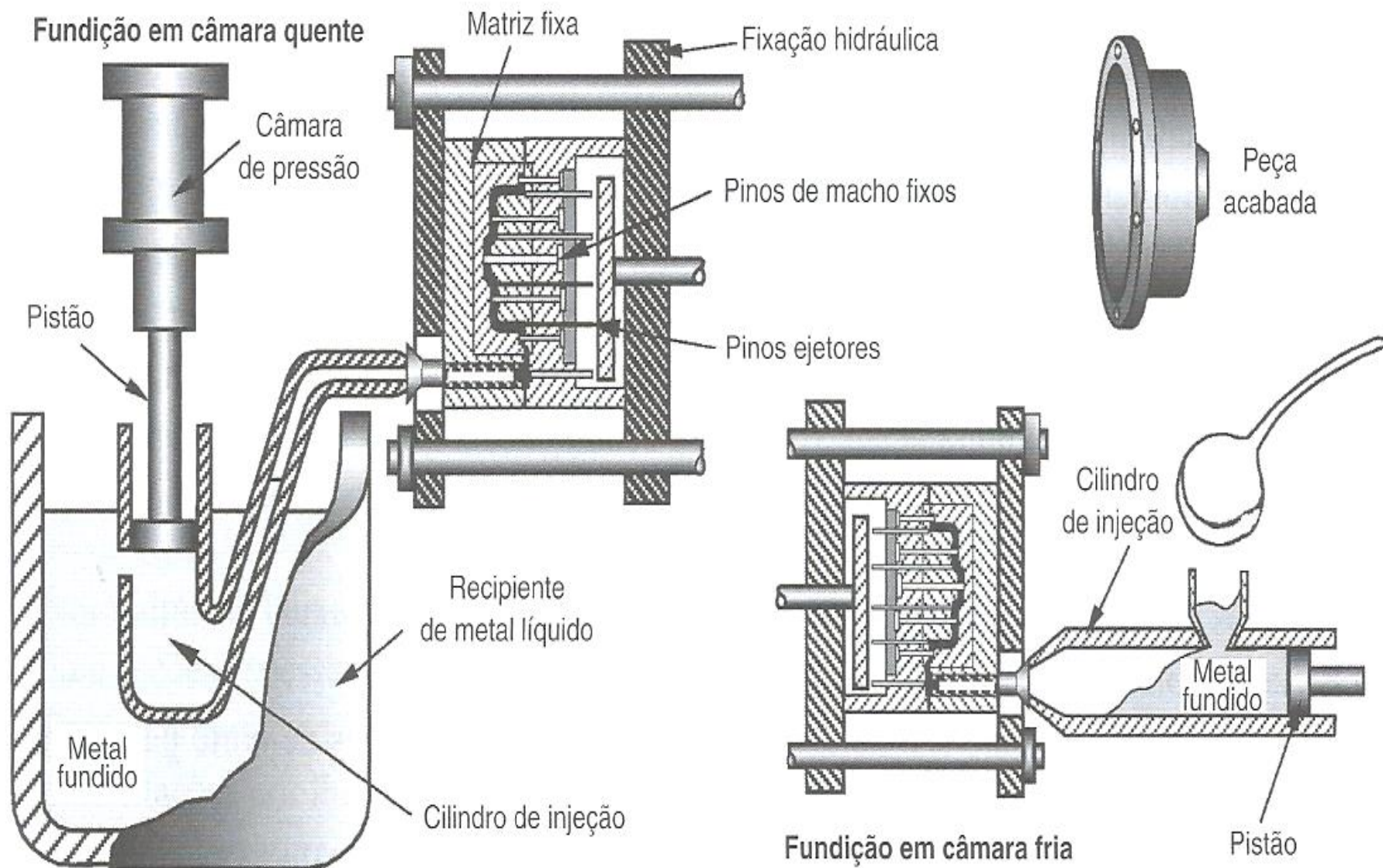


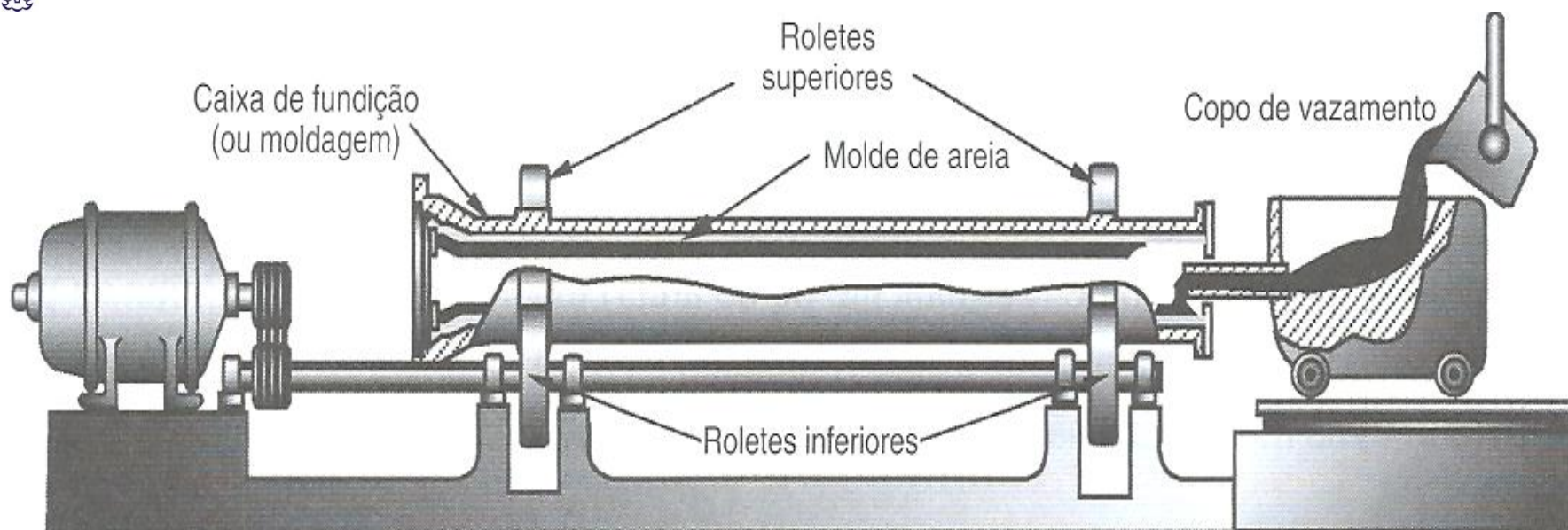
FUNDIÇÃO: Fundição por centrifugação

Aplicações

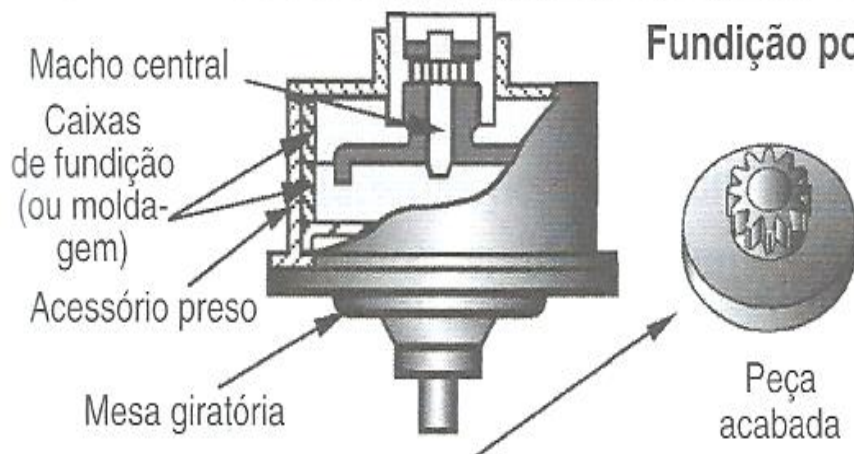




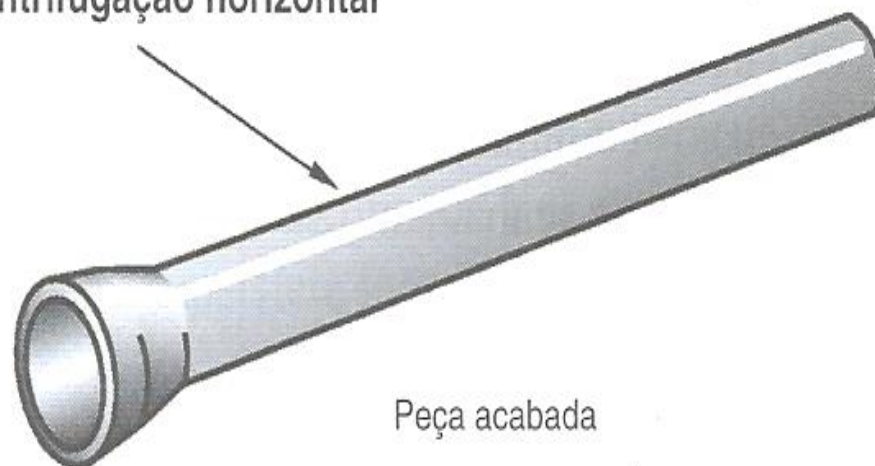




Fundição por centrifugação horizontal



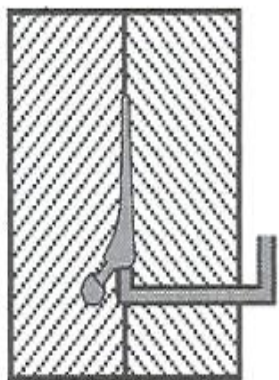
Fundição por semicentrifugação





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Fundição por cera perdida.



Injetando cera
no molde



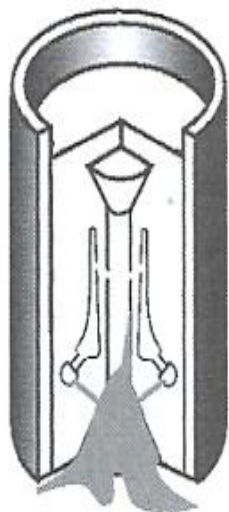
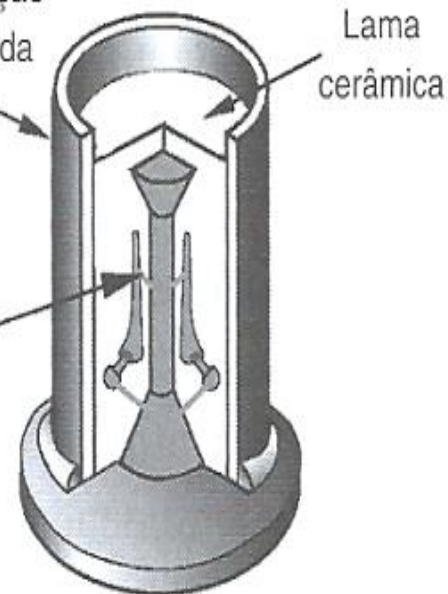
Modelo de cera
ejetado do molde



Modelos conectados
ao condutor de cera

Caixa de fundição
por cera perdida

Montagem do
condutor do
modelo



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

Metal derretido
injetado no
molde quente



Material de revestimento quebrado

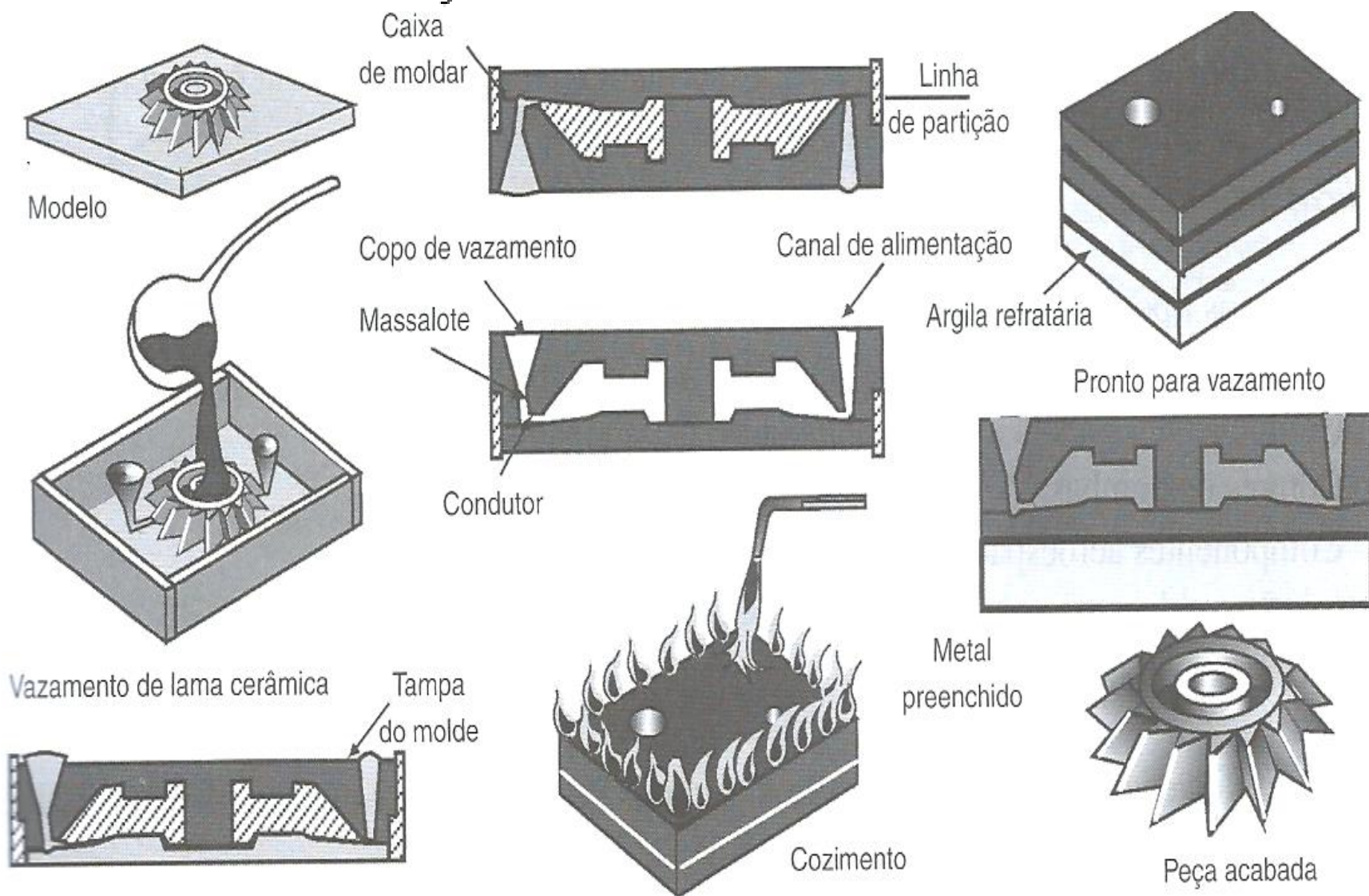


Peça
acabada



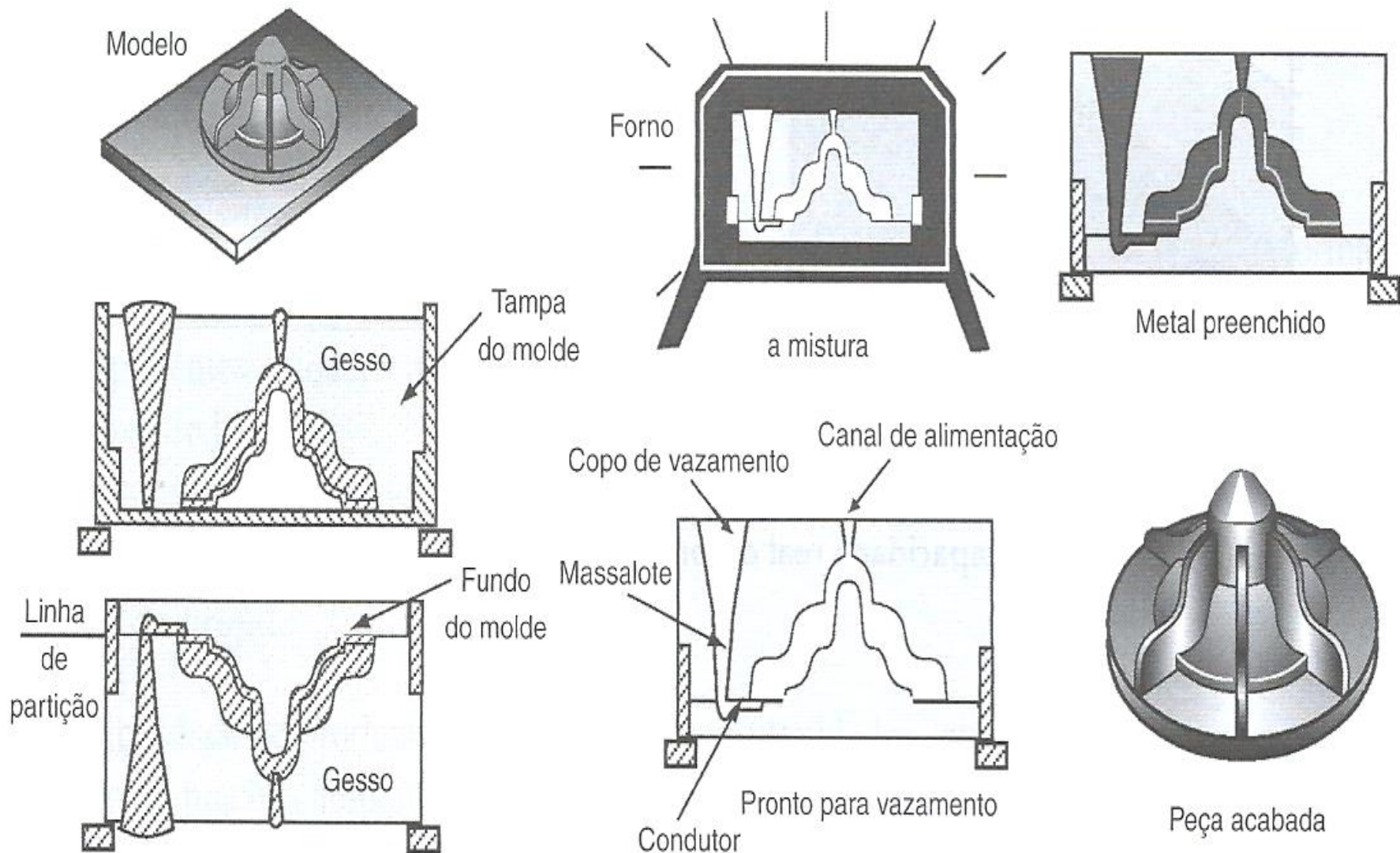


Fundição com molde cerâmico.



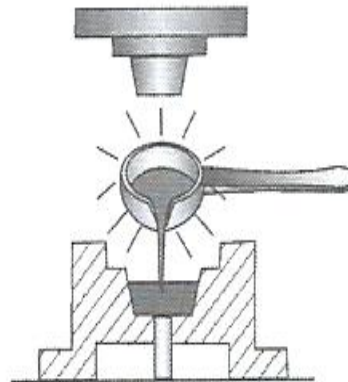
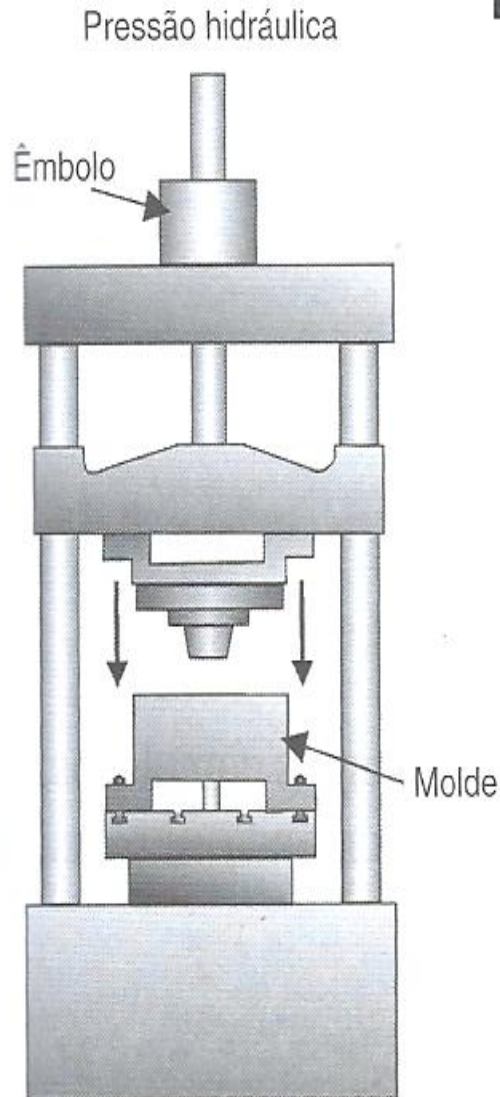


Fundição com molde de gesso.

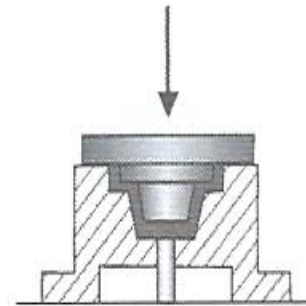




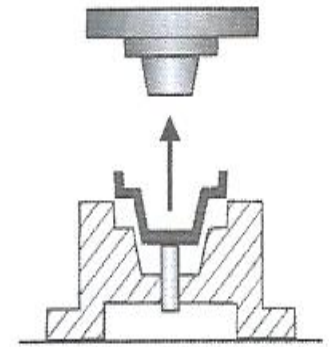
Fundição por extrusão sob pressão.



Vaze o metal fundido no molde



Pressione o metal no molde e mantenha a pressão



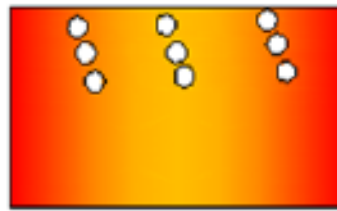
Ejete a peça acabada e repita o processo



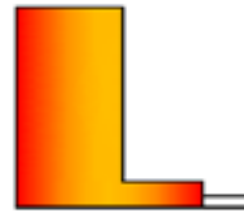
Defeitos em peças fundidas



Macro porosidade



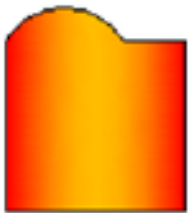
Micro porosidade



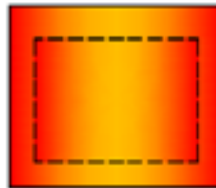
Falta de
preenchimento



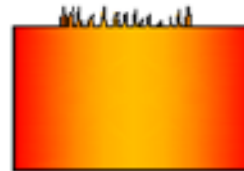
Desalinhamento



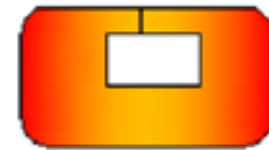
excesso de
preenchimento



Cavidades



Penetração
de metal



Trinca por
preenchimento



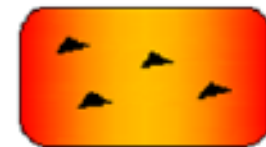
Trincas



Rechupe



Vazamento



Inclusão de
escórias



ChatGPT: Para aquelas(es) que querem ter uma visão geral do ChatGPT ou conhecer um pouco mais sobre as tecnologias subjacentes, recomendamos que assistam à palestra de abertura: “Agentes Conversacionais, Modelos de Linguagem, GPT, GhatGPT” ministrada pelo Prof. Fabio Cozman:

[https://www.youtube.com/watch?v= UsfguxAF8A](https://www.youtube.com/watch?v=UsfguxAF8A)

Outra reportagem relacionada:

<https://www.migalhas.com.br/coluna/direito-digital/384041/chat-gpt-4-mentiu-sera-a-ia-o-comeco-do-nosso-fim?s=FB>

FIM