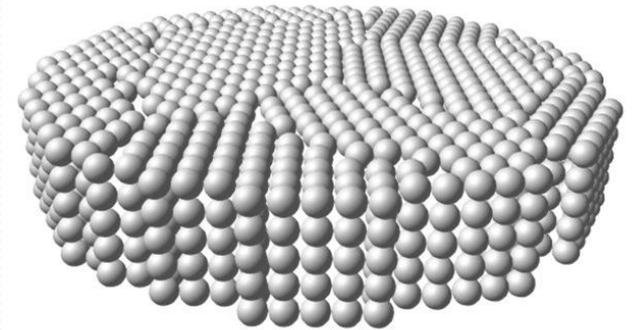


Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais



LOM 3080 – PROCESSOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA E SIDERÚRGICA

FUNDIÇÃO

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado

REFERÊNCIAS:

- **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos** – Claudio Shyinti Kiminami / Walman Benício de Castro / Marcelo Falcão de Oliveira, Editora Blücher, 2013.
- **Introdução à Siderurgia**, Marcelo Breda Mourão et al., ABM, São Paulo, 2007;
- **ASM Handbook Vol. 15 Casting - 1988**, Foundry Technology P.R. Beeley, 1972;
- **Aços e Ligas Especiais**, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006.
- **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Hubertus Colpaert, 4ª. Edição revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher – Villares Metals, 2008.
- Aulas da Profa.Dra. Maria Helena Roberts – Fundação-Unicamp.

FUNDIÇÃO

Processos de fabricação Matéria prima metálica

Mecânicos
(emprego de tensão)

Metalúrgicos
(emprego de temperatura)

$$\sigma_{\text{aplicada}} > \sigma_{\text{ruptura}}$$

$$\sigma_{\text{aplicada}} < \sigma_{\text{ruptura}}$$

$$T_{\text{aplicada}} < T_{\text{fusão}}$$

$$T_{\text{aplicada}} > T_{\text{fusão}}$$

Usinagem

Metalurgia do pó

Fundição

Lingotamento

Laminação

Forjamento

Soldagem

Trefilação

Extrusão

Tratamentos térmicos

FUNDIÇÃO:

- **METAL FUNDIDO FLUI POR AÇÃO DE FORÇA DE GRAVIDADE OU OUTRA, PARA DENTRO DE UM MOLDE E SOLIDIFICA-SE NA FORMA DA CAVIDADE DO MESMO;**

VANTAGENS:

- **GEOMETRIAS COMPLEXAS;**
- **NET SHAPE OU NEAR NET SHAPE;**
- **PEÇAS GRANDES (>100 ton) E PEQUENAS (<kg);**
- **GRANDE LEQUE DE COMPOSIÇÕES;**
- **USO DE SUCATA.**

DESVANTAGENS:

- **PROPRIEDADES MECÂNICAS;**
- **CONTROLE DE DEFEITOS (POROSIDADE);**
- **ALGUNS PROCESSOS: ACABAMENTO SUPERFICIAL;**
- **PERICULOSIDADE;**
- **DESCARTE: PROBLEMAS AMBIENTAIS.**





OUTRA DEFINIÇÃO:

Conformação de metais e ligas a partir do material líquido, vazado em moldes apropriados onde, ao solidificar-se, toma-lhe a forma; resultando em:

- **produtos acabados (peças, componentes);**
- **semi-acabados;**
- **matéria prima para processamento mecânico (tarugos, lingotes, chapas).**



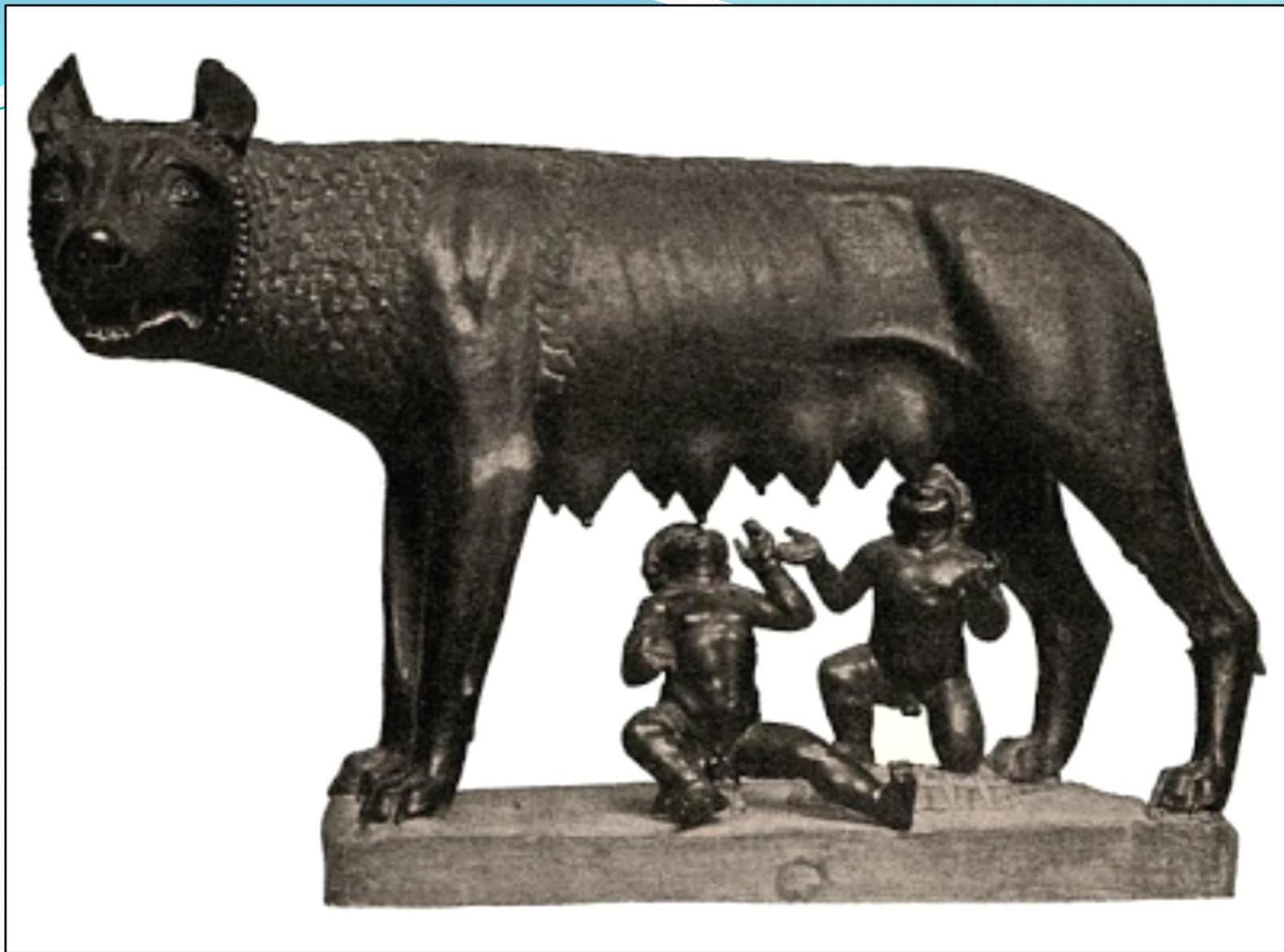
 **5000 aC: facas, pontas de lança, moedas, artefatos domésticos em Cu, bronzes (Cu/Sn);**

 **2000 aC: ferrosos;**

 **500 aC: bronzes, esculturas religiosas (cera perdida);**

 **500 aC: ampliou-se para uso em armamentos, escudos; habilidade de produção com qualidade;**

 **Desde então a fundição se desenvolveu como ciência.**



Rômulo e Remo – 500 aC



Perseu – B, Cellini– 1500-1571



Pensador – Rodin– 1840-1917

ATUALMENTE:

(Os princípios básicos são os mesmos de milhares de anos)

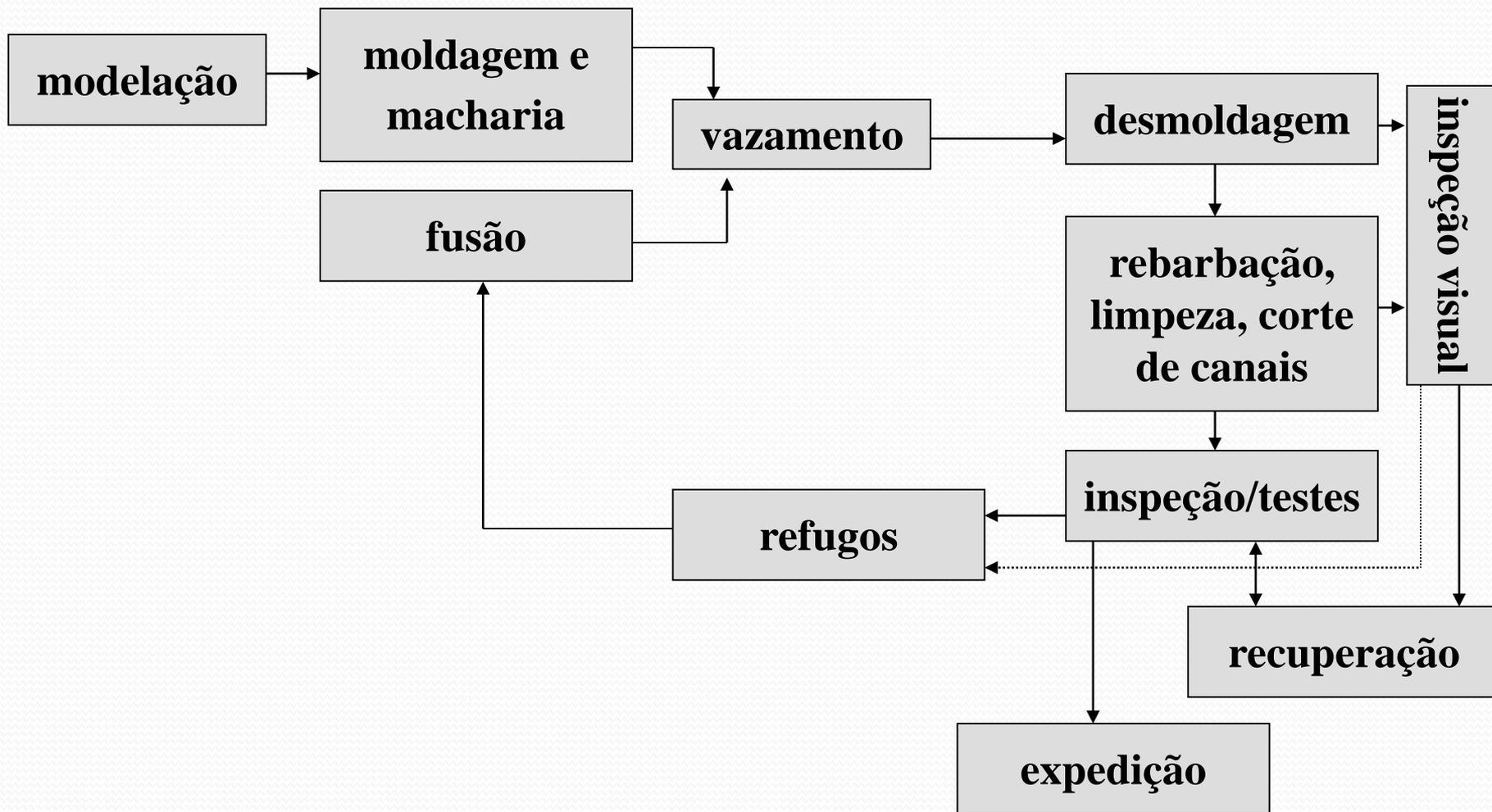
- ❖ **infinidade de processos já desenvolvidos e equipamentos disponíveis ;**
- ❖ **processos podem ser totalmente automatizados;**
- ❖ **modelagem / simulação de processos e fenômenos metalúrgicos e mecânicos já dominados;**
- ❖ **sistemas sofisticados de controle de processos e de qualidade de produtos.**



APLICAÇÃO DA FUNDIÇÃO:

- Partes e corpos de motores;
- Turbinas (hidráulicas, de aviões);
- Equipamentos e ferramentas para indústria mecânica e metalúrgica;
- Laminadores;
- Propulsores para navios, hélices etc;
- Válvulas de alta e baixa precisão;
- Sapatas de freios;
- Milhares de tipos de componentes para indústria automobilística;
- Milhares de tipos de componentes e artefatos para uso doméstico.

Fluxograma de produção por fundição



SEQÜÊNCIA COMUM À MAIORIA DOS PROCESSOS:

Modelação

Confecção do modelo – réplica da peça, utilizada para confeccionar o molde;

Moldagem e macharia

Confecção do molde – cavidade a ser preenchida com metal líquido + confecção do macho – insertos refratários com a geometria de vazios internos da peça fundida que se deseja;

Fusão

Preparo do metal líquido a ser vazado na cavidade do molde;

MOLDAGEM:

- **Fabricação do molde com a cavidade que será preenchida.**
- **Deve-se levar em consideração a contração do metal na solidificação;**
- **Molde de areia: cavidade-modelos de madeira em torno do qual a areia é conformada;**
- **Moldes metálicos: cavidade é usinada;**
- **Partes ocas – machos-peças de areia aglomerada (com ligantes)-dentro do molde – etapa de macharia;**
- **No molde: canais de alimentação, respiro, etc.**

Vazamento

preenchimento do molde com metal líquido;

Desmoldagem

retirada do fundido do molde, após solidificação do metal;

Pós-operações

rebarbação, corte de canais, limpeza;

Inspeção

para detecção de defeitos;

Recuperação

no caso de defeitos não comprometedores;

Conformação final

usinagem, furação;

Tratamento térmico e outros

obtenção das propriedades finais desejadas.

CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM O MOLDE

Moldes Colapsáveis:

- **Processos que utilizam moldes de material refratário;**
- **Os moldes são quebrados para a retirada do fundido;**
- **Cada molde se presta a somente um vazamento;**
- **O material do molde pode ser recuperado para a construção de outro molde, após desmoldagem da peça;**
- **Podem ser fabricadas várias peças em um vazamento, isto é, o molde pode conter várias cavidades a serem preenchidas com metal líquido.**

PROCESSOS QUE UTILIZAM MOLDES COLAPSÁVEIS

Areia verde

Areia seca

Areia cimento

Areias + ligantes inorgânicos

Moldagem em casca (shell molding)

Resinas de cura a frio

Areias + ligantes orgânicos

Molde cheio

Moldagem a vácuo

Moldes congelados

Areias sem ligantes

Cera perdida

Outros refratários ≠ areia

- **Utilizam moldes metálicos – de aço, Cu, ferro fundido;**
- **Os moldes são chamados coquilhas ou matrizes;**
- **Os moldes são fabricados por usinagem de precisão;**
- **Não há necessidade de modelos;**
- **A desmoldagem é feita por simples abertura do molde;**
- **Novo vazamento pode ser imediatamente feito no mesmo molde;**
- **Vida útil de moldes pode ser muito elevada – centenas de milhares de vazamentos podem ser feitos em um molde;**
- **Custo de fabricação do molde é elevado;**
- **Uso de moldes metálicos só é justificado para grandes volumes de produção;**

PROCESSOS DE FUNDIÇÃO QUE UTILIZAM MOLDES PERMANENTES

Nestes processos, o que distingue um tipo de processo de outro é o modo de preenchimento do molde

Fundição por gravidade

Fundição sobre pressão

Fundição a vácuo

Fundição por compressão

Fundição por centrifugação

Injeção em câmara quente

Injeção em câmara fria

Fundição a baixa pressão

Total

Parcial

Somente preenchimento

MOLDES SEMI-PERMANENTES

- Gesso
- Silicato de sódio
- Polímeros
- Grafite

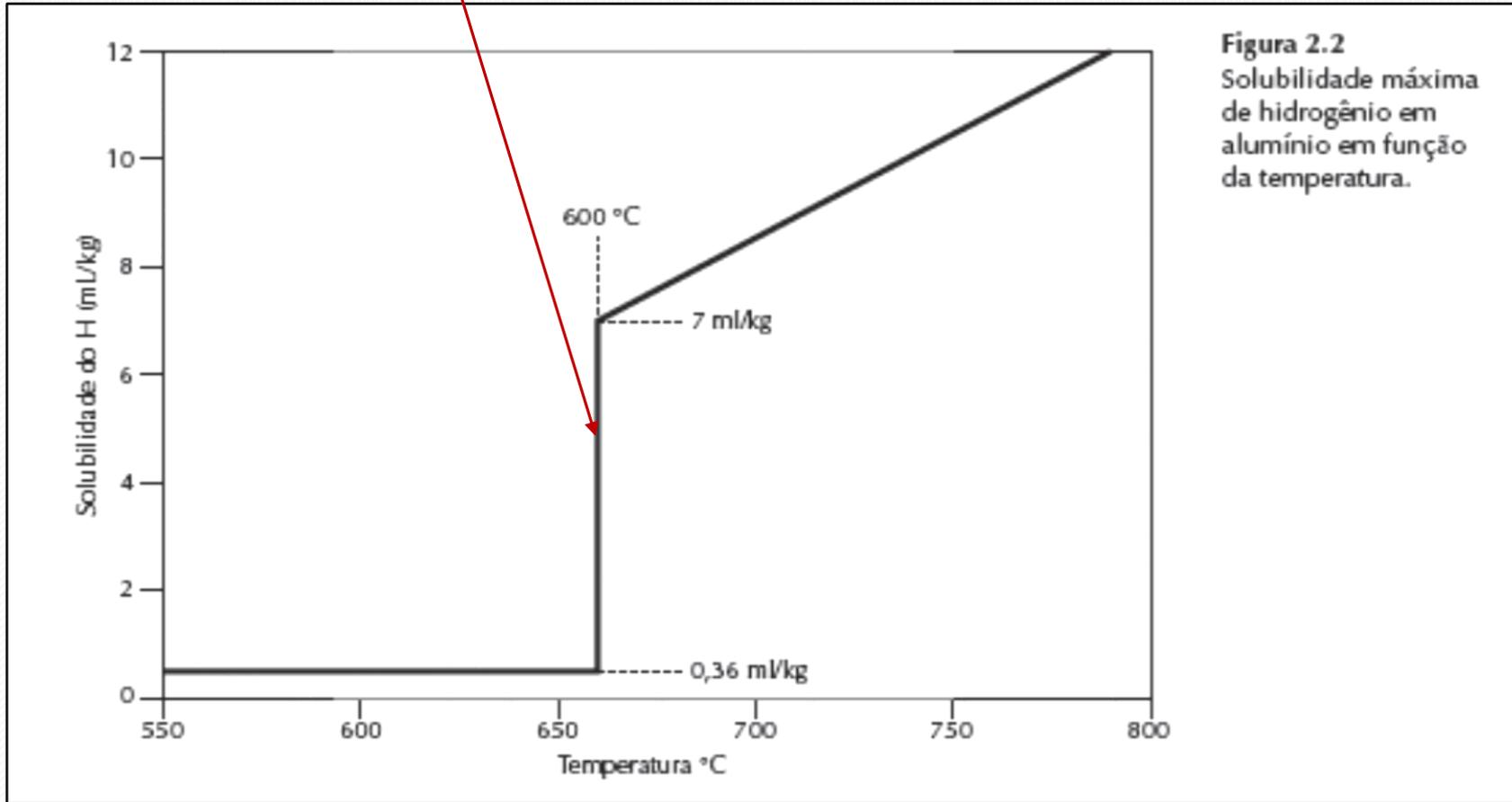
FUSÃO

- Controle da composição química-conhecimento da exata composição da matéria-prima;
- Ligas-mãe: alto teor dos elementos da liga a ser produzida (adquiridas prontas);
- Adição de elementos puros;
- Análise química antes do vazamento;
- Procedimentos para homogeneização, completa fusão e proteção contra reações secundárias (oxidação);
- Evitar ou minimizar a dissolução de gases no metal líquido: vácuo, gás inerte, minimizar a máxima temperatura (figura 2.2 no slide pag 28);
- Minimizar turbulência: manipulação cuidados no vazamento<contato com o ar;
- Geometria do canal de alimentação<turbulência;

FUSÃO

- **Desgaseificação a vácuo;**
- **Borbulhamento com gases inertes – arraste de gases dissolvidos;**
- **Ex: N ou Cl borbulhados no alumínio fundido retiram hidrogênio;**
- **Injeção de gases reativos para formar compostos de baixa densidade (escória)**
- **– Ex.: Oxigênio: é removido do aço fundido pela adição de alumínio ou**
- **silício : é removido do cobre pela adição de fósforo;**

Temperatura não varia, mas seu estado sim: **calor latente**



A solubilidade dos gases diminui com a diminuição da temperatura de solidificação – bolhas - porosidade!

Tentar minimizar a temperatura de fusão, mas considerando o vazamento.

ESCÓRIA

- Formada geralmente com o contato com o meio (ar), ambiente ou injetado propositadamente;
- Óxidos formados podem ir para dentro da peça-defeitos;
- Utilização de atmosfera inerte, vácuo, adição de elemento que promovam a aglomeração e flotação dos óxidos;
- Filtros cerâmicos nos canais de vazamento seguram a escória;
- Evitar cavidades extra que não fazem parte da geometria da peça – escórias ficam lá retidas;

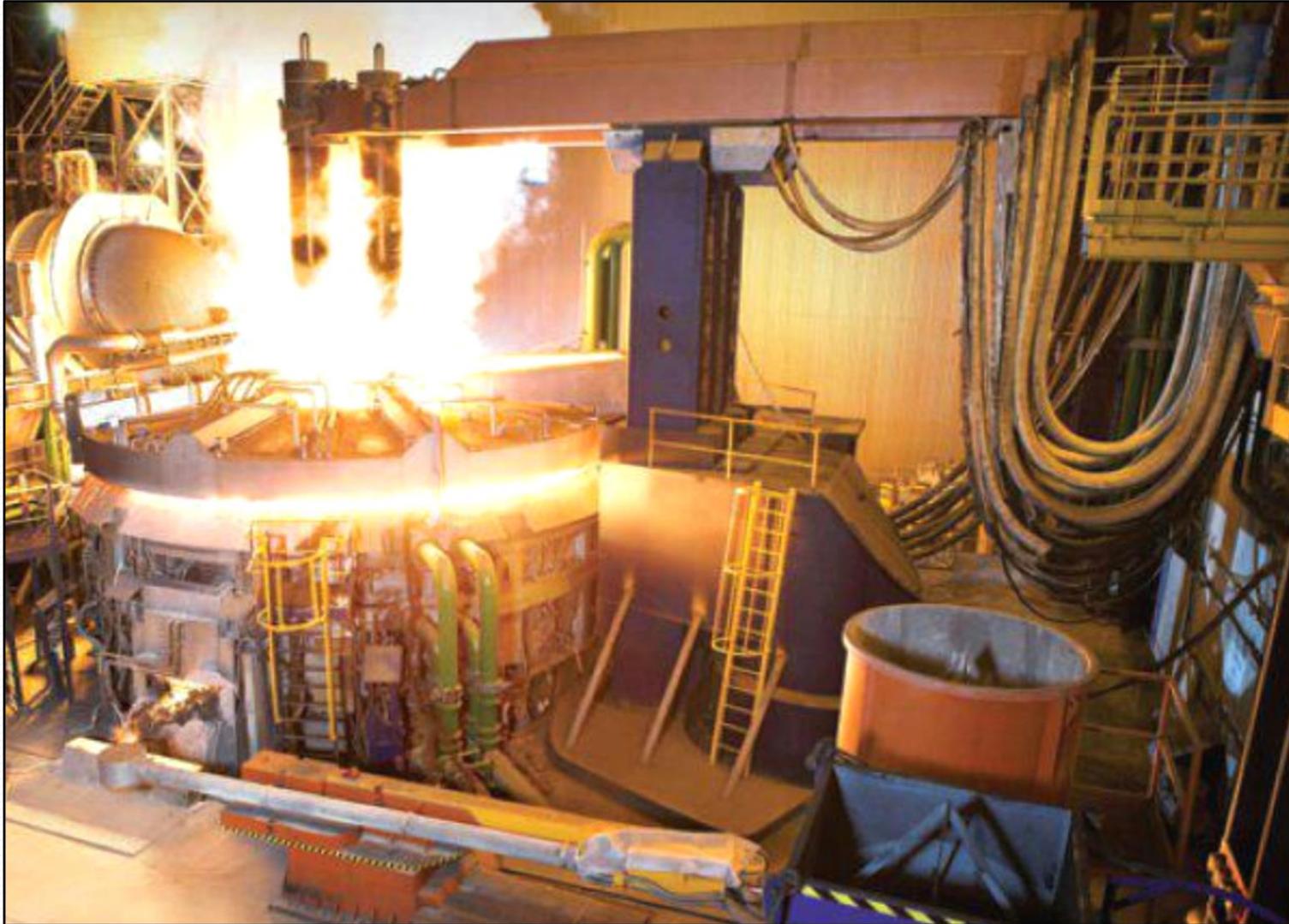
FORNOS UTILIZADOS EM FUNDIÇÃO

FORNOS

- Elétricos, a óleo, a gás, e a carvão;
- Fornos a arco elétrico e indução eletromagnética: aços, ferros fundidos e ligas especiais.

FORNO A ARCO ELÉTRICO

- Diâmetro de 3 a 7 m;
- Abertura de arco elétrico entre eletrodos de grafita de 15 a 50 cm de diâmetro e a carga metálica;
- Aquecimento por efeito Joule;
- Alta taxa de fusão- 0,5 a 180 toneladas de capacidade;



FORNO POR INDUÇÃO

- **Aquecimento é por efeito Joule da corrente induzida por um campo eletromagnético de alta frequência;**
- **Capacidade de 50kg a 100 ton;**
- **Potencia de 1500kW para um forno de 35 ton;**
- **Velocidade de fusão de 2,5 t/h e temperatura de trabalho de 600 a 1750°C.**
- **Provoca grande agitação-favorece a homogeneização;**
- **Forno por indução a vácuo: ligas especiais.**



FORNOS A GÁS OU ÓLEO

- Usado para fundir metais não ferrosos;
- Aquecimento: queima do combustível- **interna** (diretamente sobre o metal) ou **externa** (aquece o cadinho);
- **Interna**: fornos de reverberação a gás- temperatura de trabalho de 600 a 1650°C, 5 t/h;
- **Externa**: Temperatura de trabalho de 200 a 1400°C – capacidade de 10 a 1.000kg- taxa de fusão: 100 kg/h.

FORNO CUBILÔ

- Fabricação de Ferro fundido a partir do Ferro gusa ou a partir do próprio FoFo;
- Queima de carvão e calcário;
- Cilíndrico- $h=6D$ - $Di \sim 55$ a 230cm;
- Capacidade típica: 6 a 12 t/h – Existem alguns grandes: 100t/h;

O forno cubilô ou forno de cúpula é um equipamento de fusão empregado para a produção de ferros fundidos, por meio da refusão de materiais metálicos ferrosos e funciona baseado no princípio de contra corrente, ou seja, a carga metálica e o combustível possuem um fluxo contrário ao do comburente que é o oxigênio do ar.

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgTI4AG/forno-cubilo>

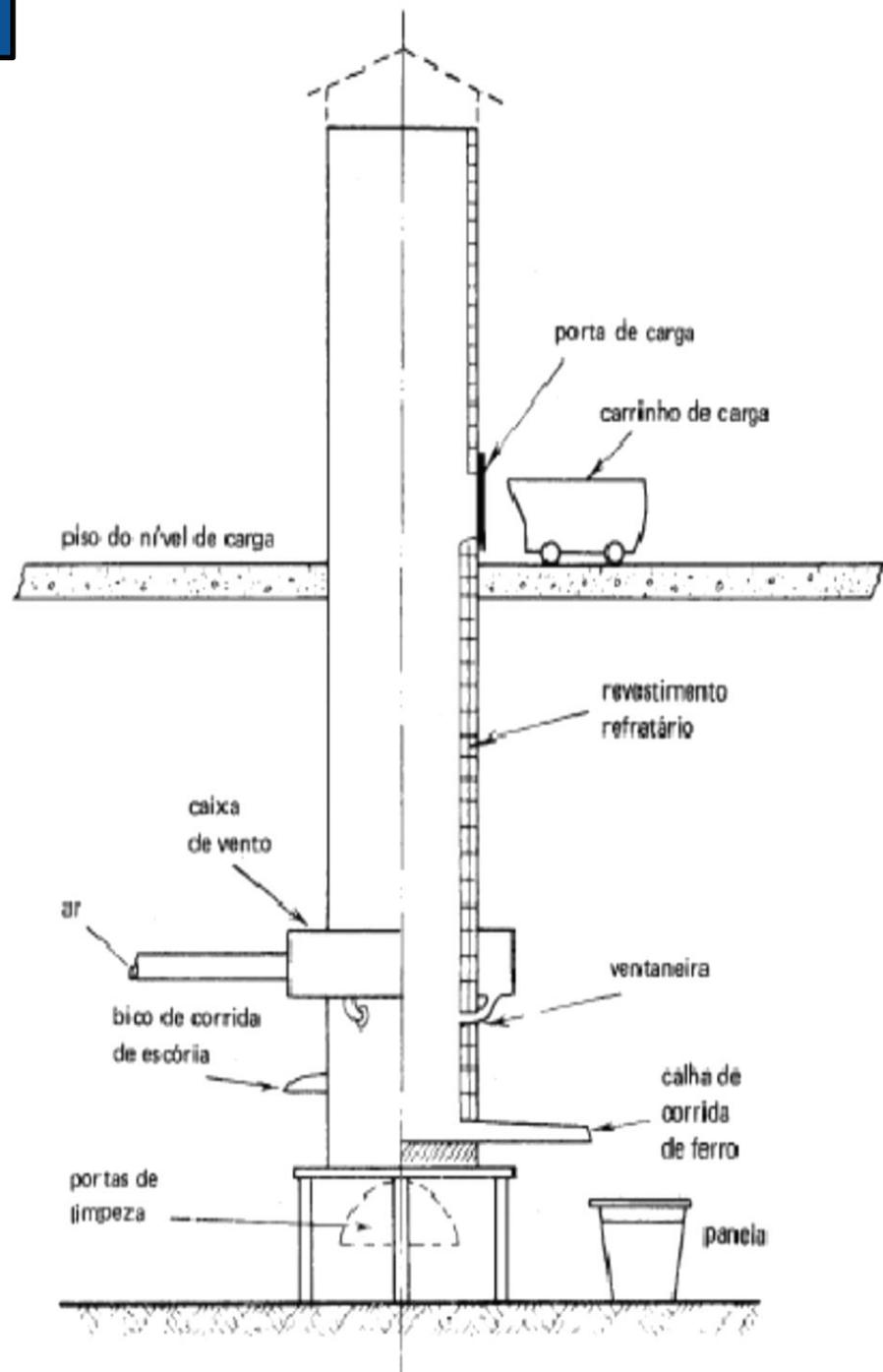
FORNO A GÁS-ÓLEO-CARVÃO



**BLOWER – SOPRADOR
(CARVÃO)**



FORNO CUBILÔ



FUNDIÇÃO - FUNDAMENTOS



FORNO CUBILÔ

VAZAMENTO

- **Fluidez:** metal fundido deve preencher todas as cavidades, caso contrário gera defeito que pode ser um concentrador de tensão;

FLUIDEZ:

- **Composição química;**
- **Temperatura de fusão;**
- **Intervalo ou diferença de temperatura entre a linha líquidus e sólidus do diagrama de fases;**
- **Superaquecimento:** incremento da temperatura de vazamento em relação à líquidus;
- **Ex: Liga Al12%Si – $T_f = 577^\circ\text{C}$ – normalmente T vazamento: 50° acima – 627°C ;**
- **Temperatura adequada de vazamento - muito alta: consumo de energia, acelera reação entre metal e molde, escoamento turbulento causa erosão e aprisionamento de gases, favorece a oxidação – influencia a microestrutura: taxa de resfriamento durante a solidificação:**

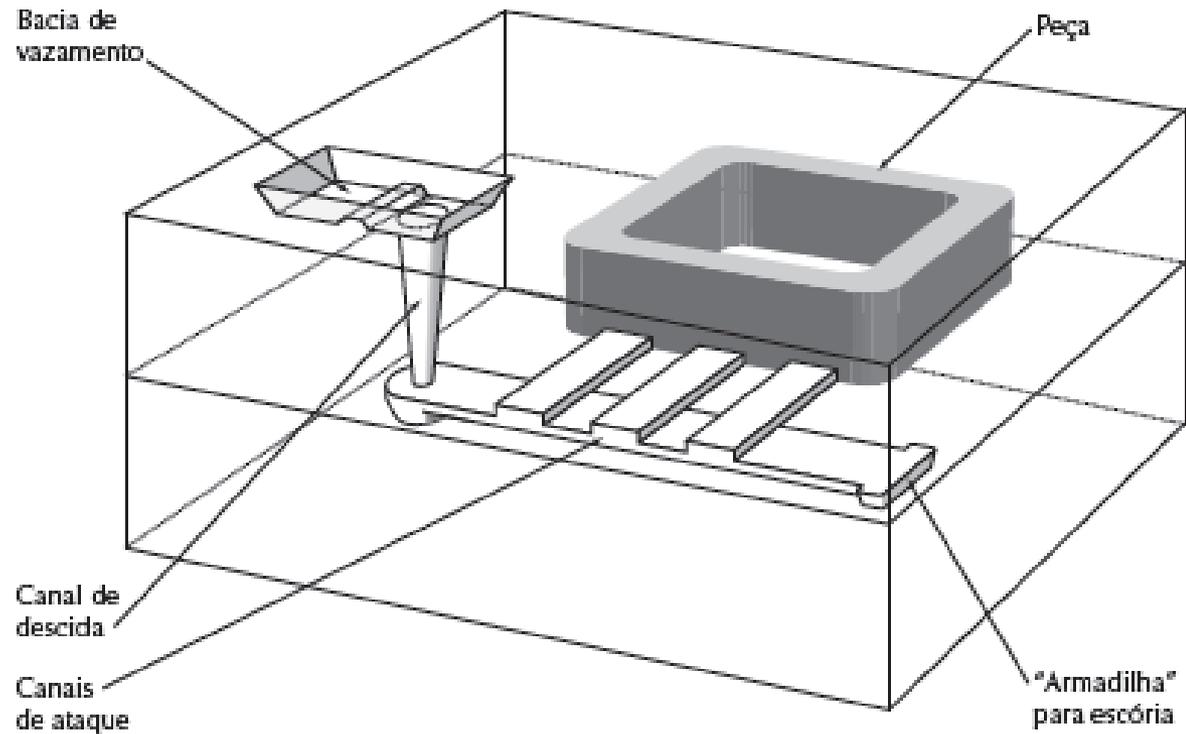
CAVIDADES DO MOLDE

- Sistema de alimentação: garantir o total preenchimento sem turbulência;



VAZAMENTO – EXEMPLO-MOLDE DE AREIA

Figura 2.3
Sistema de
alimentação para uma
fundição em molde de
areia de uma peça.



SOLIDIFICAÇÃO

PRINCIPAL FASE DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

- **Depende da composição química, maior parte é de ligas: faixa de temperatura de solidificação;**
- **Ligas eutéticas comportam-se como metais puros: temperatura não varia - transformação invariante;**
- **Ligas com faixa intermediária: 20-110°C. Ex.: Al-6%Si;**
- **Ligas com faixa pequena: <20°C;**
- **Ligas com grande faixa: >110°C. Ex.: Al-18%Si.**

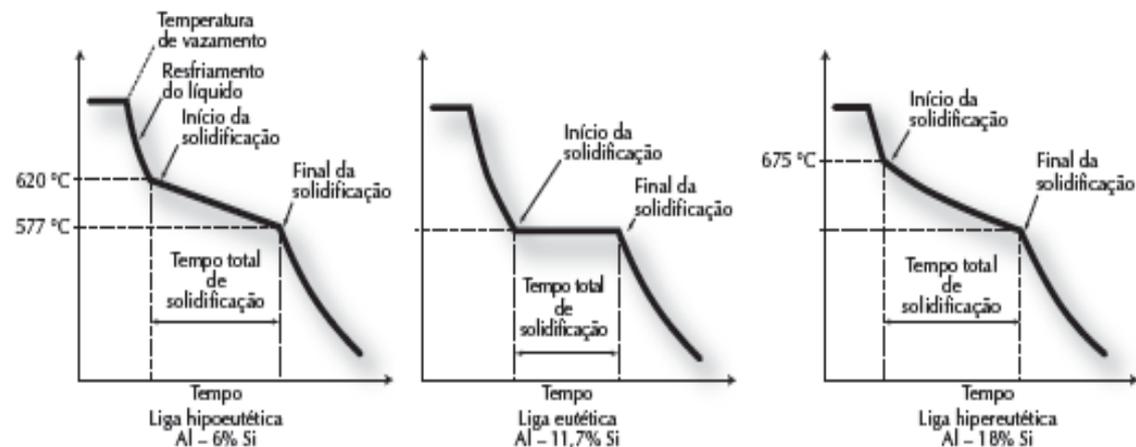
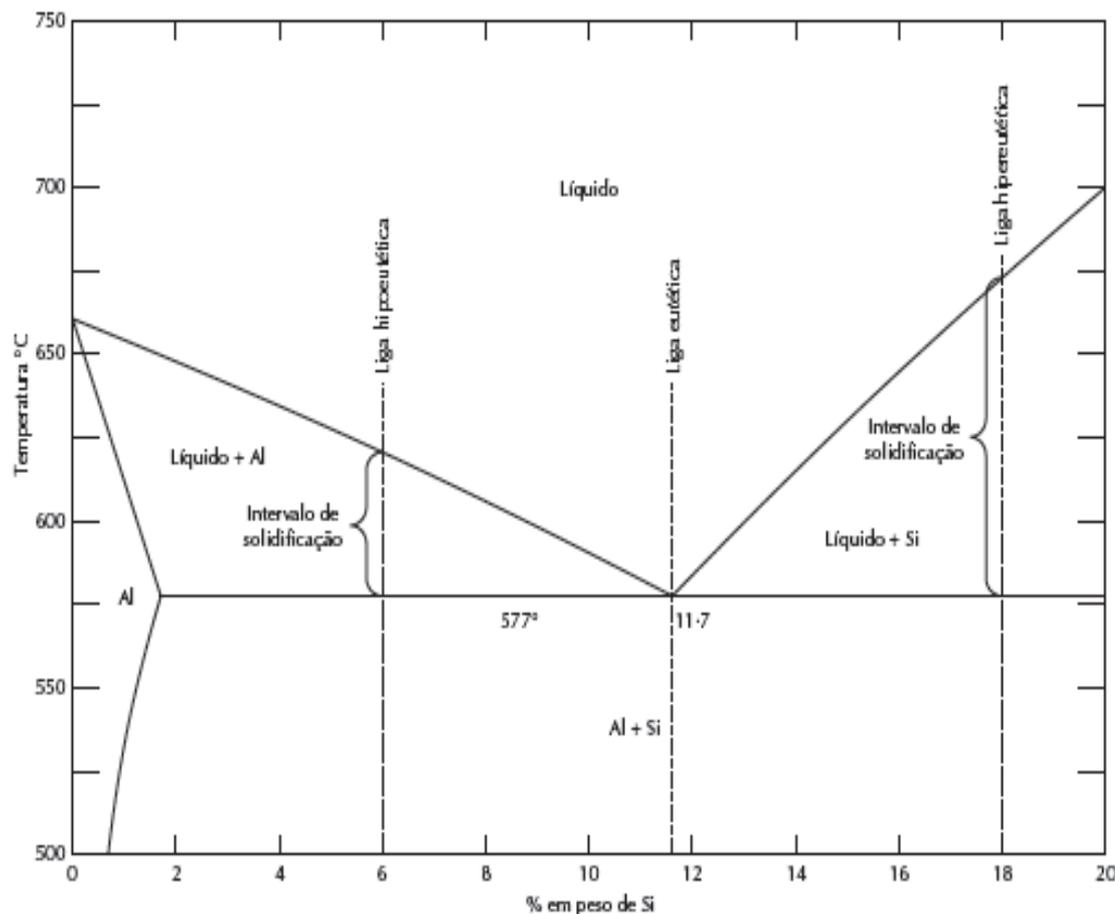


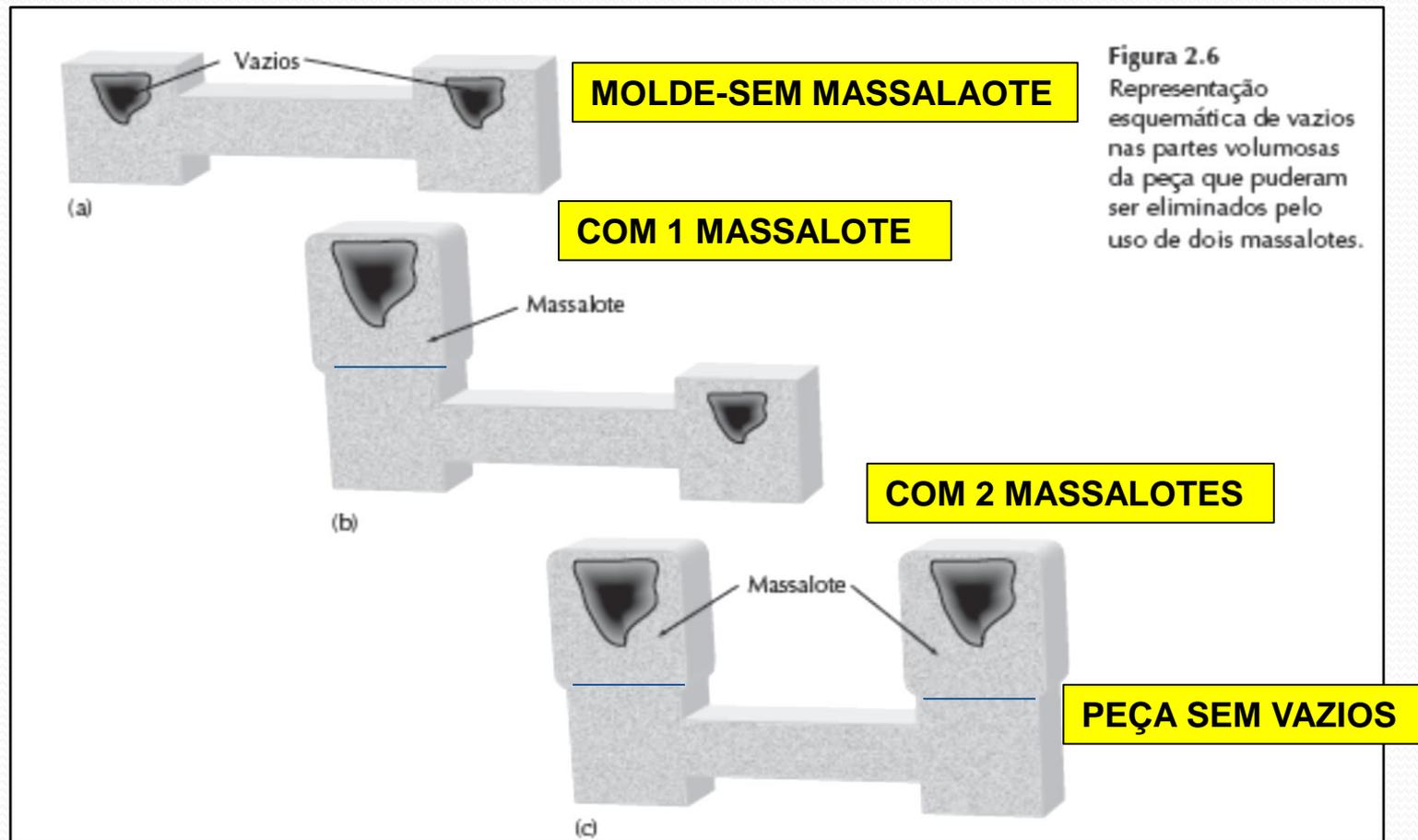
Figura 2.4
 Ilustração do diagrama de equilíbrio de uma liga Al-Si indicando as composições eutética (Al-11,7% em peso de Si), hipoeutética (Al-6% em peso de Si) e hipereutética (Al-18% em peso de Si) e as respectivas curvas de resfriamento.

Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos

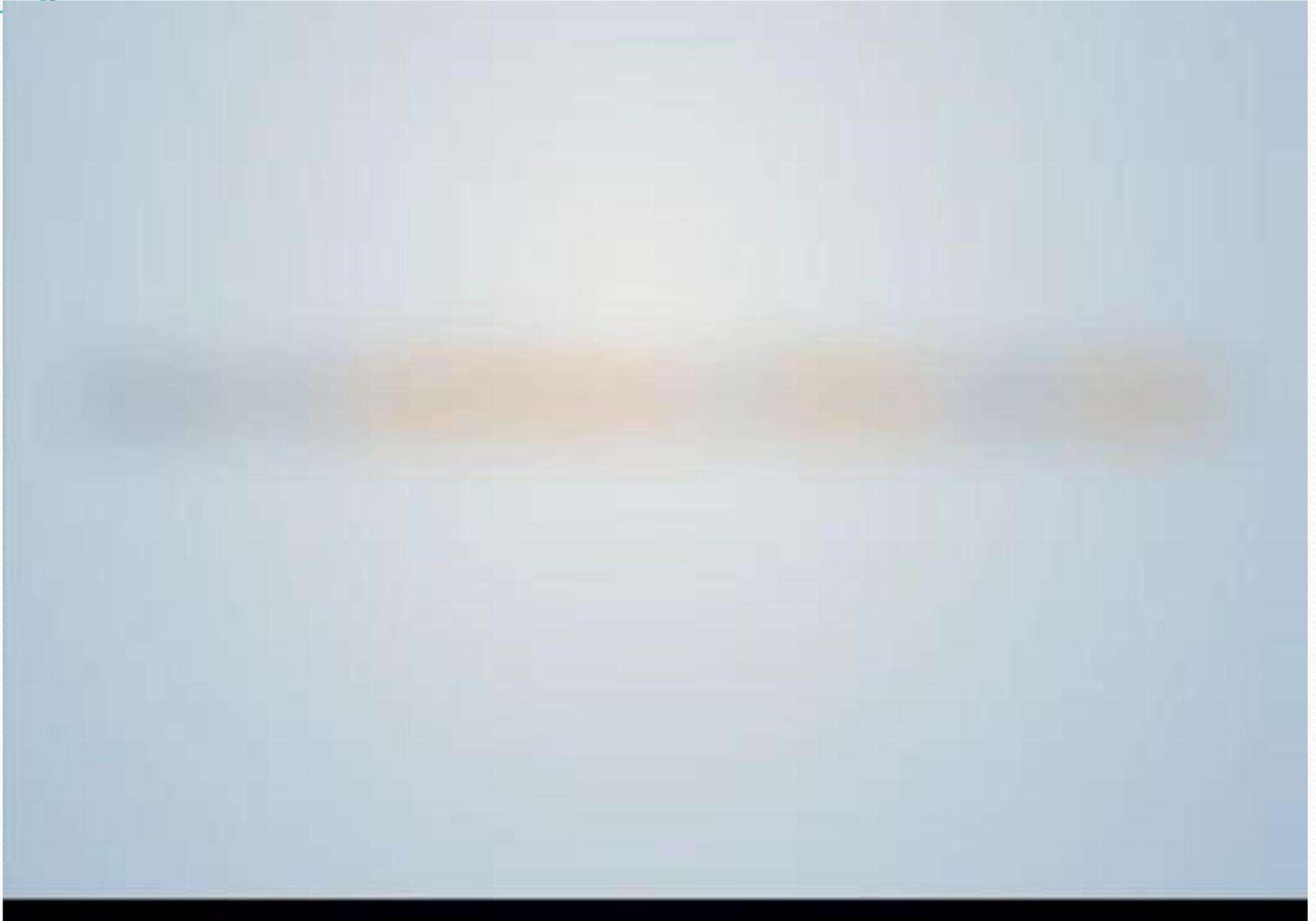
- Claudio Shyinti Kiminami / Walman Benício de Castro / Marcelo Falcão de Oliveira

FUNDIÇÃO - MASSALOTES

- O metal se contrai com a solidificação, gerando vazios;
- Al:6,3% e aço 2,2% na contração;
- Massalote: cavidade extra, não pertence à peça – reservatório de metal líquido para suprir a contração.

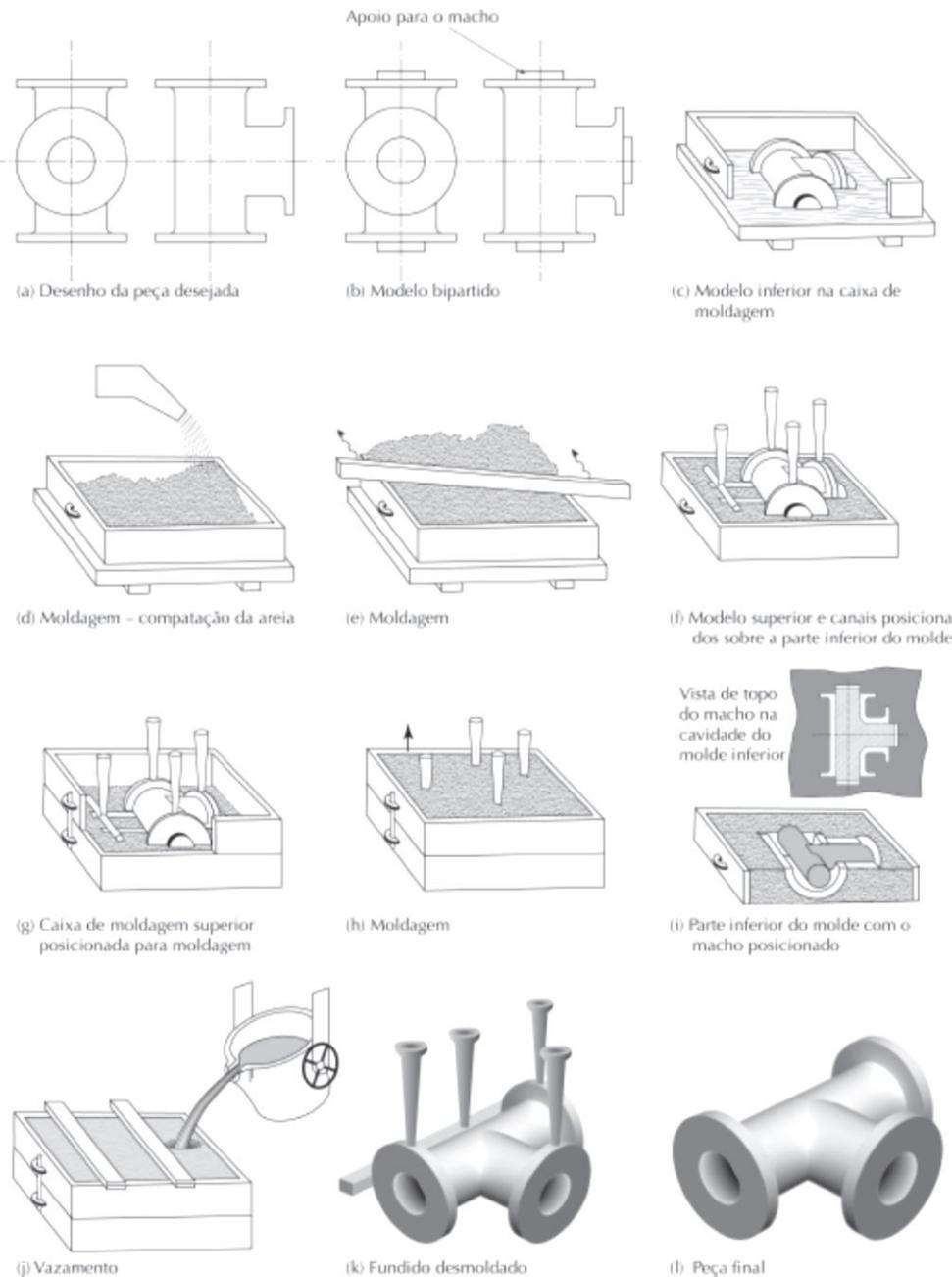


Explicação de Solidificação dos Metais e Ligas



PROCESSOS

- Processo mais popular - cerca de 90% (em volume do metal líquido) da produção de fundidos;
- Baixo custo;
- Amplamente utilizado tanto para pequenas quanto elevadas produções;
- Elevada versatilidade quanto ao peso (de poucas gramas até dezenas de toneladas);
- Utilizado para ligas ferrosas e não ferrosas;
- Material de moldagem: areia- 75%
 - argila - 3 a 15%
 - água
 - aditivos para fins específicos
- Limitação: geometrias complexas;



- Modelo bipartido com ou sem macho;
- Uma parte na caixa inferior;
- Modelagem com a areia
- Outra parte na caixa superior;
- Modelagem com a areia;
- Compactação;
- Colocação dos canais de alimentação;
- Vazamento;
- Desmoldagem, após solidificação, por quebra do molde.

Figura 2.8 Representação da sequência de operações na fundição em areia compactada em caixa.

Processo semelhante ao processo de fundição em areia verde;

- Diferença: necessidade de secagem antes de receber o metal líquido;

- Composição da areia: areia + ligantes que fornecem resistência mecânica após secagem (ex. ligantes orgânicos - óleos vegetais ou derivados de petróleo);

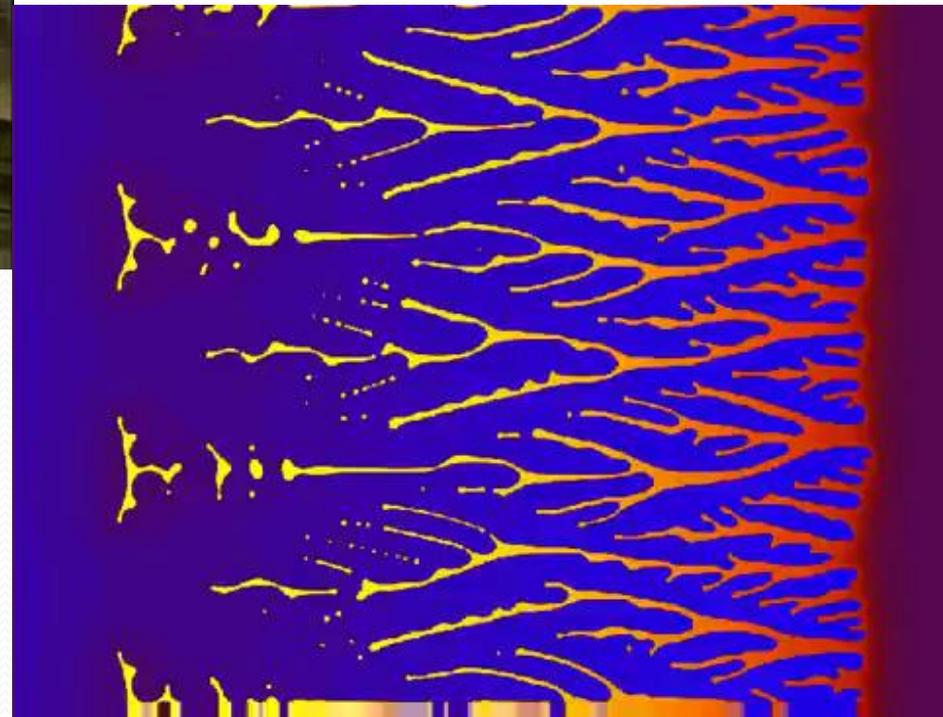
Secagem em estufa(200-300°C):

- aumenta resistência mecânica e à erosão pelo metal líquido;**
- reduz teor de água no molde - reduz possibilidades de defeitos na peça fundida, como porosidade;**
- fornece fundidos de melhor qualidade que a fundição em areia verde.**

Exemplo do uso do CAD e Programa Magma (Projeto Processo Fundição)



FILME FUNDIÇÃO EM CAIXA (AREIA)



- Conhecido como processo de moldagem em cascas ou processo Croning.
- Foi primeiramente apresentado na Alemanha, nos anos 40; hoje é amplamente utilizado para os mais variados produtos e ligas.
- Mistura de moldagem: areia + resinas de cura a quente.
- **Tipos de resinas:**
 - fenol-formaldeído
 - ureia-formaldeído
 - alquídicas

Modelo:

- metálico de alta qualidade e acabamento superficial;
- construídos em materiais estáveis com a temperatura de cura da resina (Al, aços);
- modelos em placas, em árvores contendo mais de uma cavidade, mais de uma peça - pode ser feita em um único vazamento.

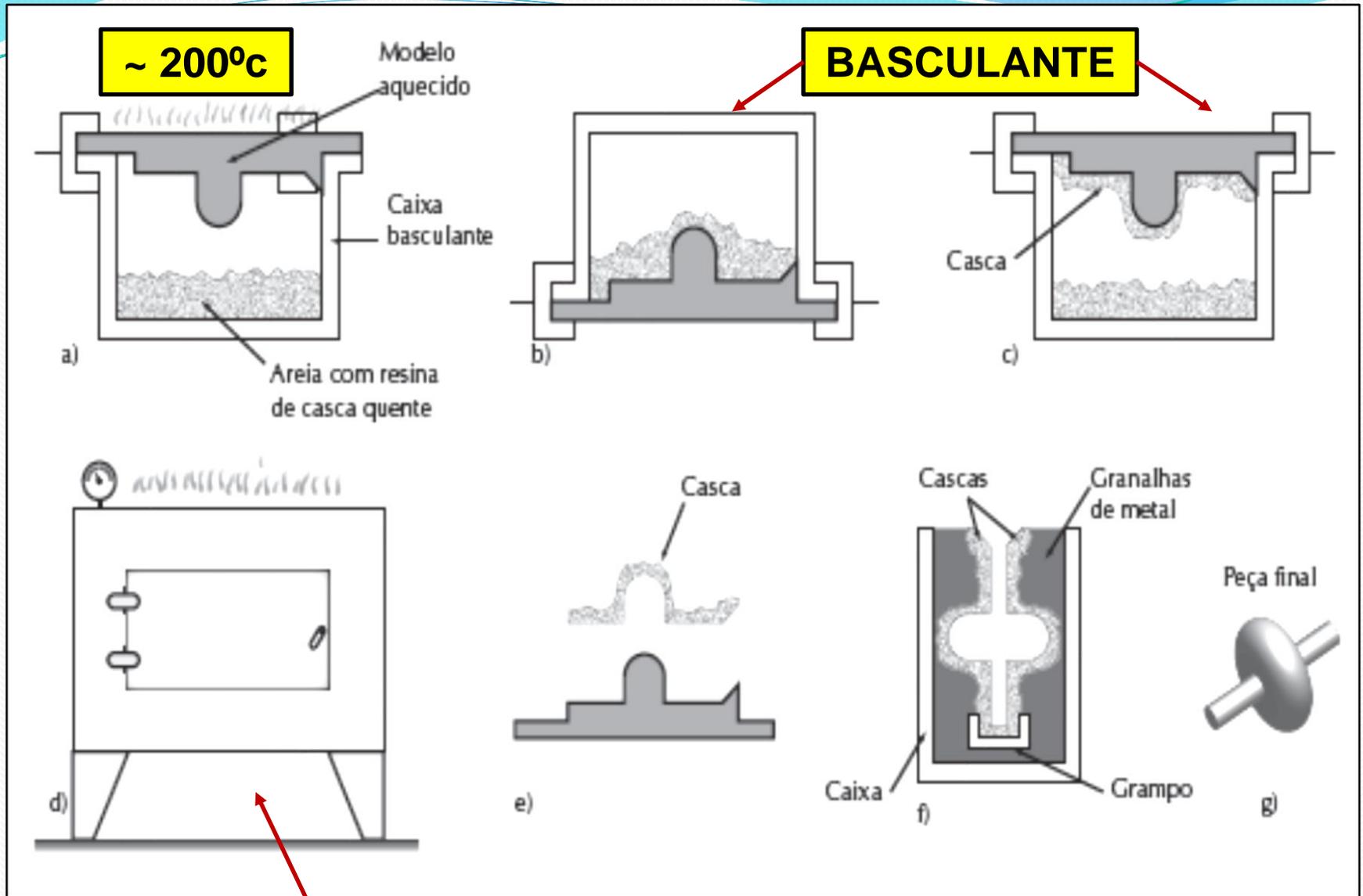
Técnica:

- mistura de moldagem é colocada em contato com molde aquecido em 200-250°C;
- A cura do molde: 350-400°C;
- não requer compactação da areia.
- são utilizadas areias de granulometria fina - para alta fluidez



Fornecer fundidos de excelente acabamento e precisão dimensional

FUNDIÇÃO EM CASCA – SHELL MOLDING



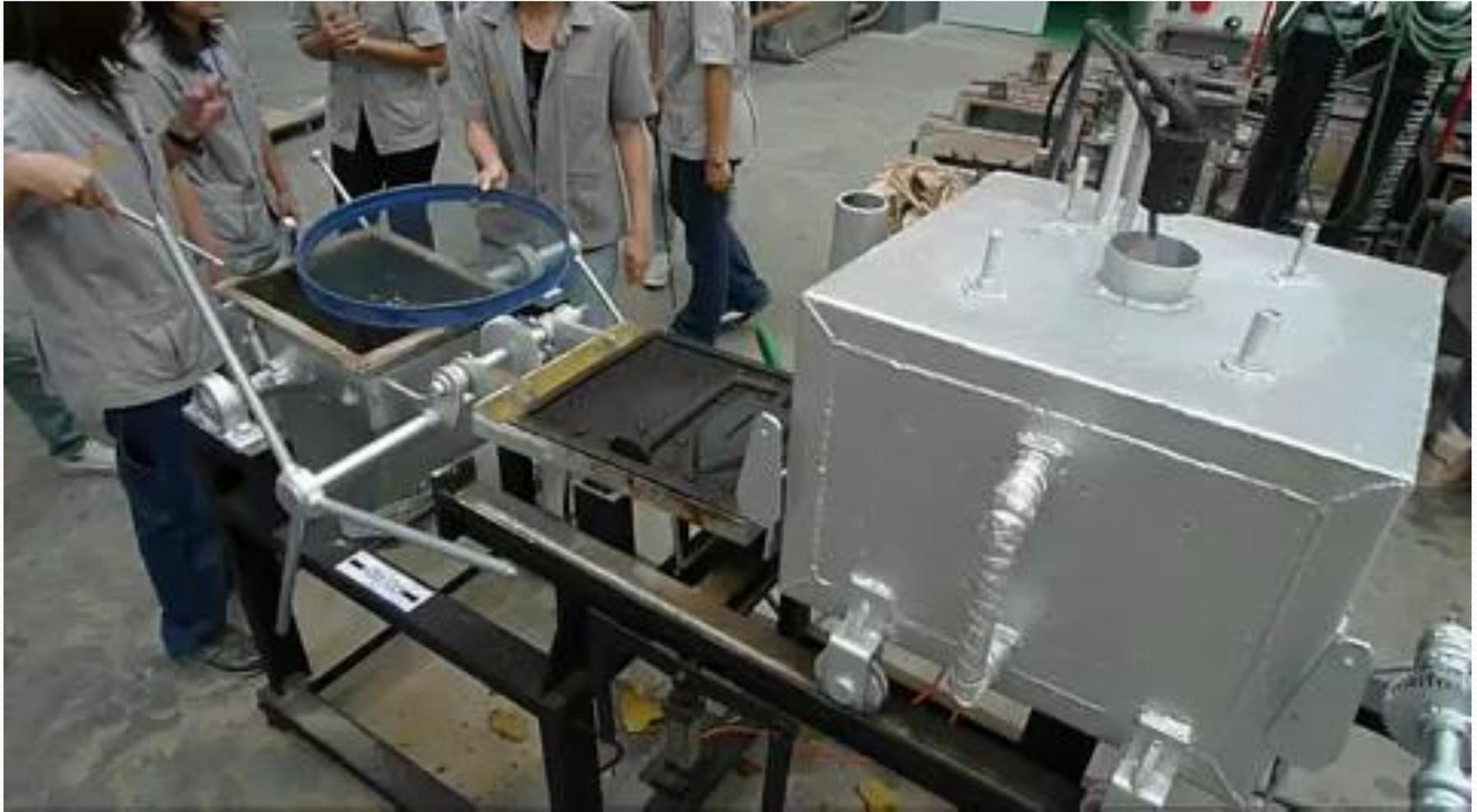
350°C-400°C – TERMINAR A CURA

FUNDIÇÃO EM CASCA – SHELL MOLDING

- A resina, com aquecimento, polimeriza formando uma casca sobre o modelo, em tempos de 1 a 3 min. (atualmente- existem resinas que curam a frio);
- Casca é destacada do modelo e montado o molde, estando pronto para o vazamento do líquido;
- Espessura da casca: suficiente para suportar pressão do líquido; valores típicos: 5 a 10 mm.

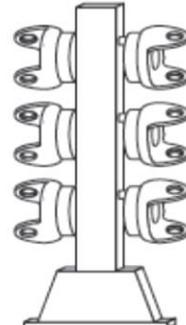
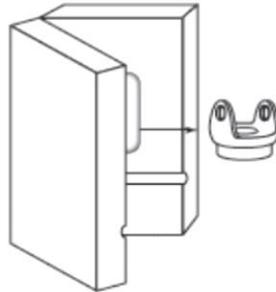
- Shell molding produz fundidos de superior qualidade para ampla gama de ligas metálicas como Al, Cu, ferro fundido, aços;
- Processo permite alta flexibilidade de formas;
- Ampla aplicação comercial na indústria automobilística principalmente na fabricação de componentes de ligas de Al;
- Areias não são recuperáveis.

FILME FUNDIÇÃO EM CASCA – SHELL MOLDING



- Também conhecido: *investment casting, lost wax.*
- Já conhecido dos chineses ~ 1700aC
objetos decorativos (esculturas), ornamentos, jóias.
- Ganha importância comercial a partir dos anos 40
componentes de precisão na indústria aeronáutica.
- Modelo consumível:
⇒ número de modelos = número de peças

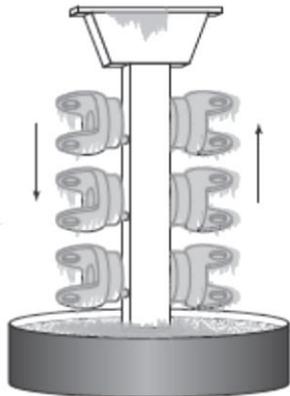
Molde para confeccionar modelos



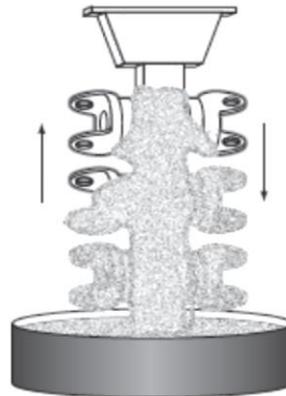
a) Injeção de cera

b) Modelo de cera

c) Montagem dos modelos (árvore)



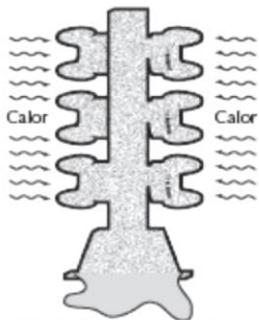
d) Recobrimento com suspensão cerâmica



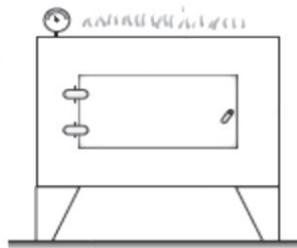
e) Pulverização com partículas cerâmicas



f) Molde completo



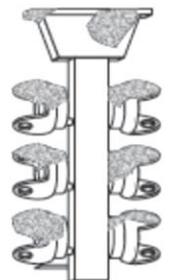
g) Fusão da cera em autoclave



h) Sinterização do molde cerâmico



i) Vazamento



j) Desmoldagem

Processo:

- Injeção do modelo: cera;
- Montagem dos modelos em árvore;
- Recobrimento com suspensão cerâmica;
- Recobrimento com partículas cerâmicas;
- Fusão da cera em autoclave;
- Sinterização do molde cerâmico;
- Vazamento;
- Desmoldagem por quebra.

Figura 2.14 Ilustrações das principais etapas do processo de fundição de precisão.

PROCESSO

⇒ modelo feito em cera, por injeção em molde metálicos de elevada precisão;

⇒ várias unidades, dezenas de modelos são montados num único canal central → formando uma árvore;

⇒ árvore é mergulhada em pasta refratária (alumina, sílica, gesso, silicato de Zr e outros refratários de granulometria muito fina + ligantes à base de etil-silicatos, Na-silicatos, sílica gel bem hidratada);

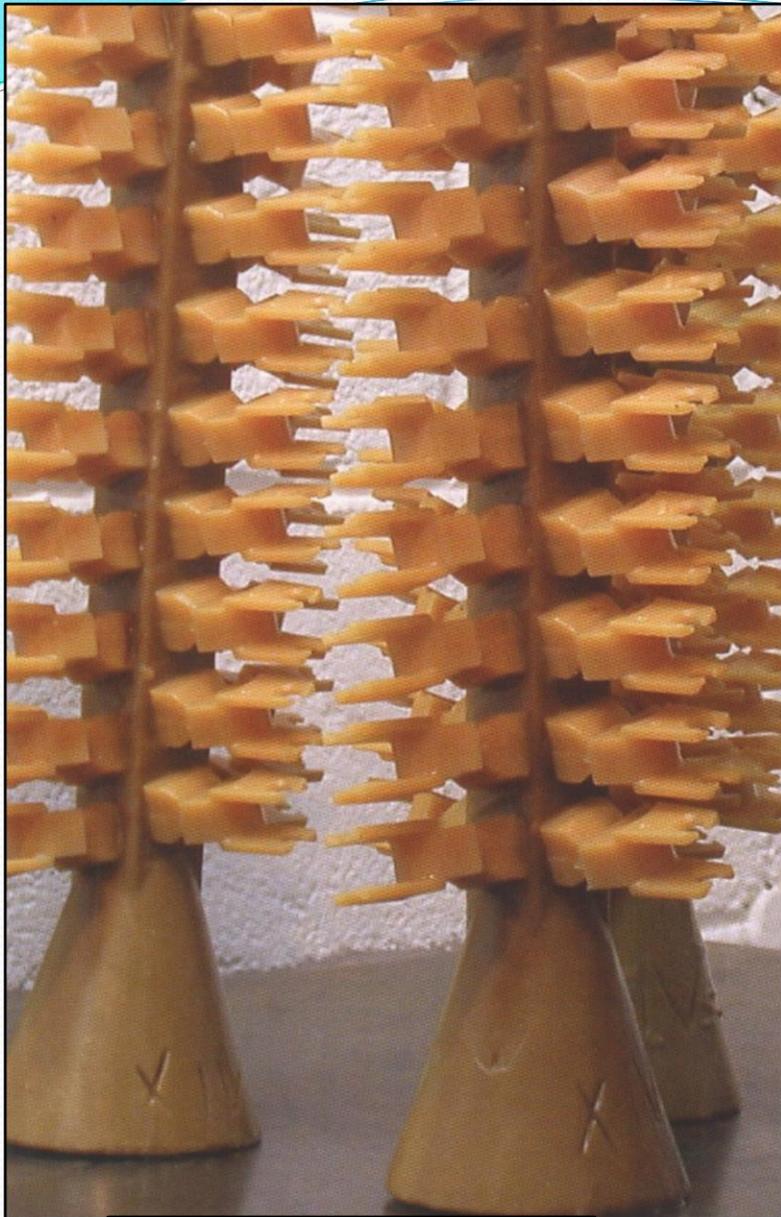
⇒ mistura refratária adere à cera:

→ casca de superfície bastante lisa é formada.

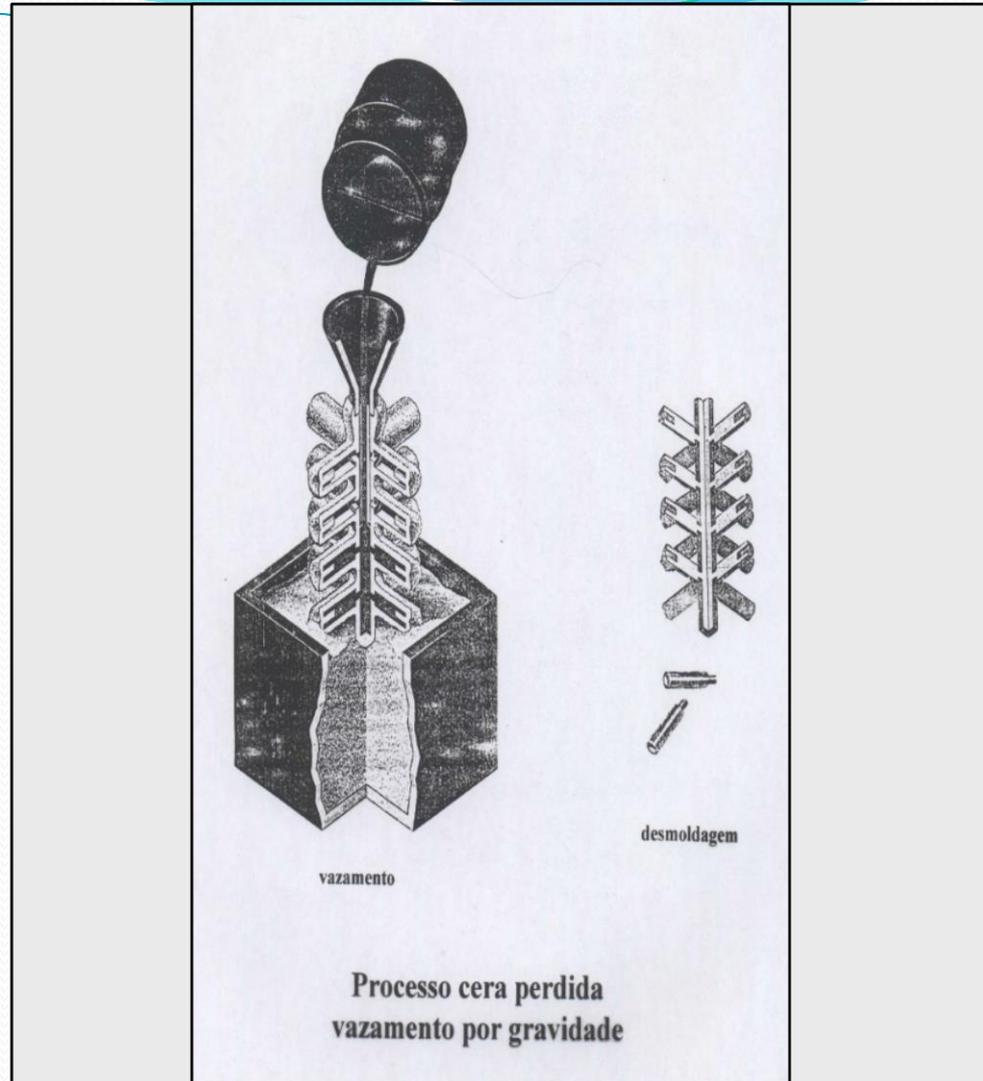
FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA – INVESTMENT CASTING

- **Conjunto é mergulhado em leito fluidizado:**
 - casca é revestida com grãos mais grosseiros de materiais refratários à base de zirconita, silimanita e alumino-silicatos.
- **Secagem por aquecimento ou reações químicas:**
 - para desidratação da sílica gel
 - casca rígida é formada
 - espessuras de 5-15mm
- **Modelo + casca → T e pressão em autoclave**
 - cera é volatilizada → fornece cavidade do molde.
- **Vazamento**
- **Desmoldagem por quebra das cascas:**
 - produtos de excelentes acabamento e precisão dim.;
 - amplo emprego para ligas ferrosas e não ferrosas;
 - geometrias complexas, seções reduzidas;
 - limitações: peso (poucos kg); custo do equipamento e da mão de obra; processo laborioso e lento.

FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA – INVESTMENT CASTING



Modelo de cera



FILME
FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA – INVESTMENT
CASTING



**Fundição por gravidade
Fundição sob pressão
Fundição por centrifugação
total**

- **Moldes permanentes: coquilhas, matrizes, ferramentas;**
- **Fabricados em fofo, aços resistentes ao calor, ligas Cr/Ni, Be/Cu;**
- **Confeccionado por processos de conformação sofisticados (eletro-erosão).**

FUNDIÇÃO EM MOLDES METÁLICOS

- Requerem alta qualidade de acabamento superficial e precisão dimensional;
- Devem ser providos de canais, marcações de macho, respiros para a saída de ar, alimentadores;
- Devem ser providos de mecanismos de fechamento do molde e de injeção do fundido;

Vantagens sobre moldes colapsáveis:

- Alta produtividade (facilidade de desmoldagem);
- Eliminação de operações desmoldagem e limpeza;
- Reduzido tempo total de solidificação;
- Reduzido custo operacional.

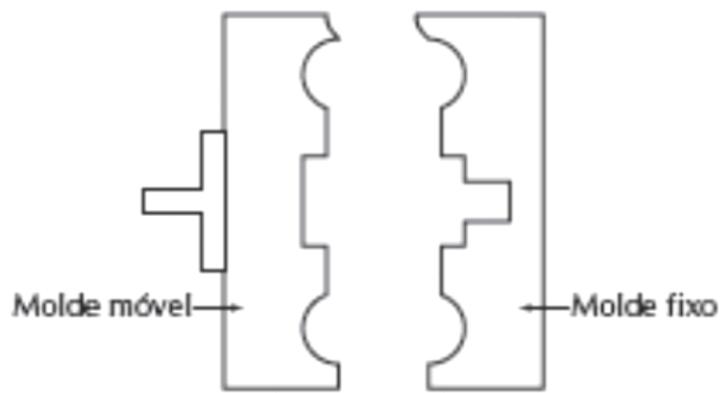
Desvantagens:

- elevado custo de moldes e equipamentos;
- requerem elevada qualidade na confecção de moldes;
- maior restrição quanto à geometria;
- limitados a materiais de:
 - reduzida T_v ;
 - reduzida contração (coquilha não colapsável
⇒ trincas no fundido).

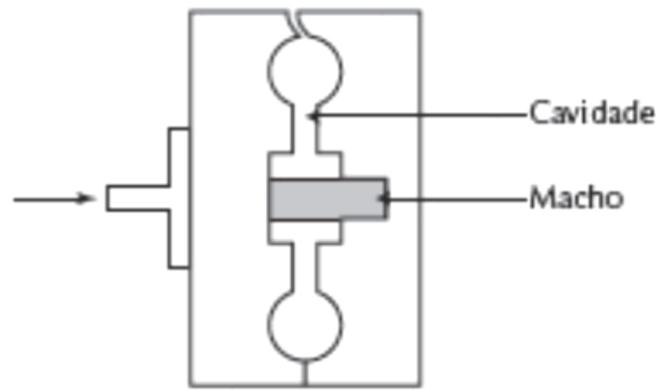
Preenchimento do molde por ação da gravidade.

- **preparo do molde limpeza com jatos de ar ou escova; aspensão de lubrificantes/revestimentos.**
- **controle de sua temperatura;**
- **montagem de machos refratários ou metálicos - vazamento pela parte superior ou por canais que dão entrada do líquido pela parte inferior;**
- **abertura para ejeção do produto - o mais rápido possível para que as contrações de resfriamento não sejam restringidas pelo molde não colapsável;**
- **início do novo ciclo.**

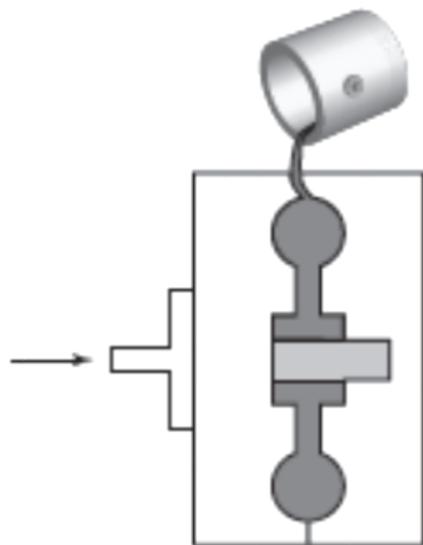
FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE



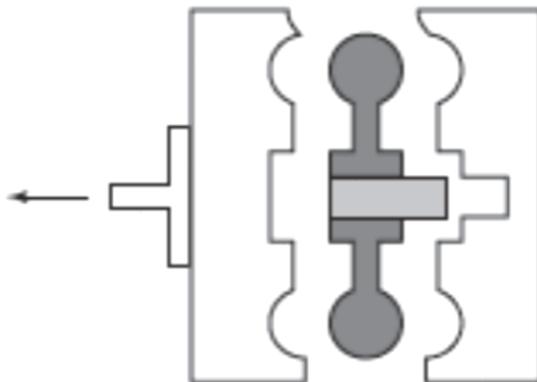
a)



b)



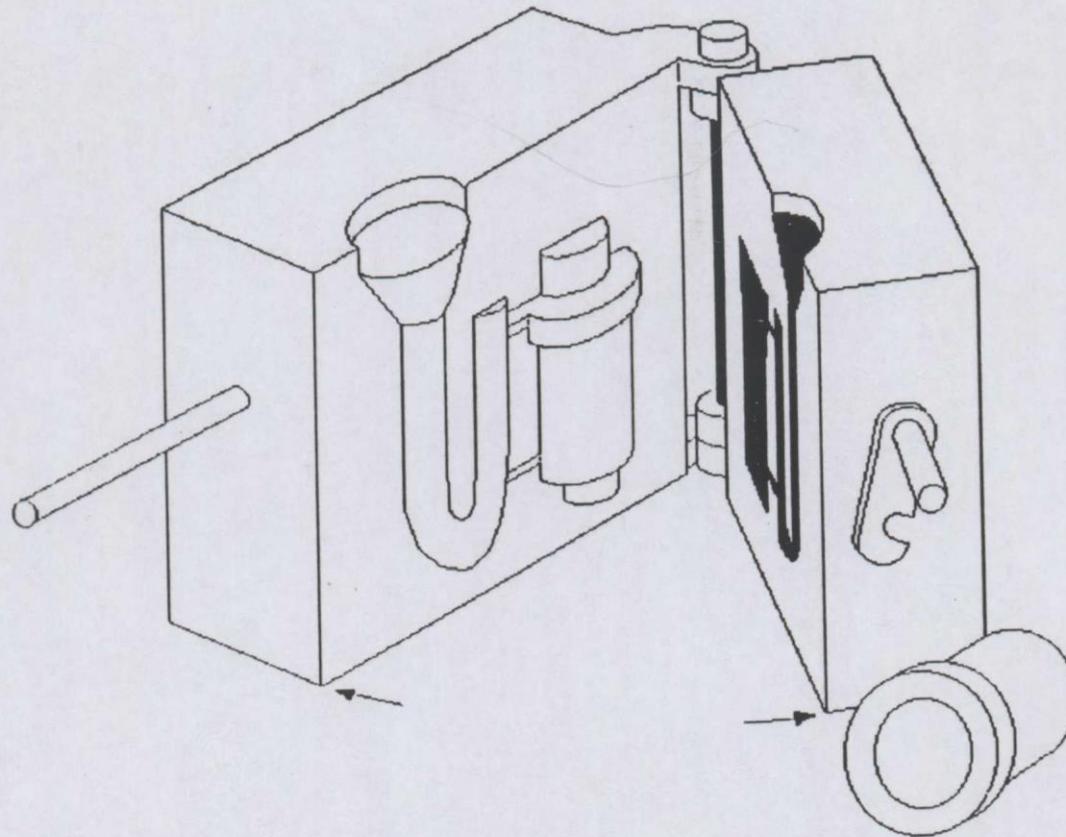
c)



d)



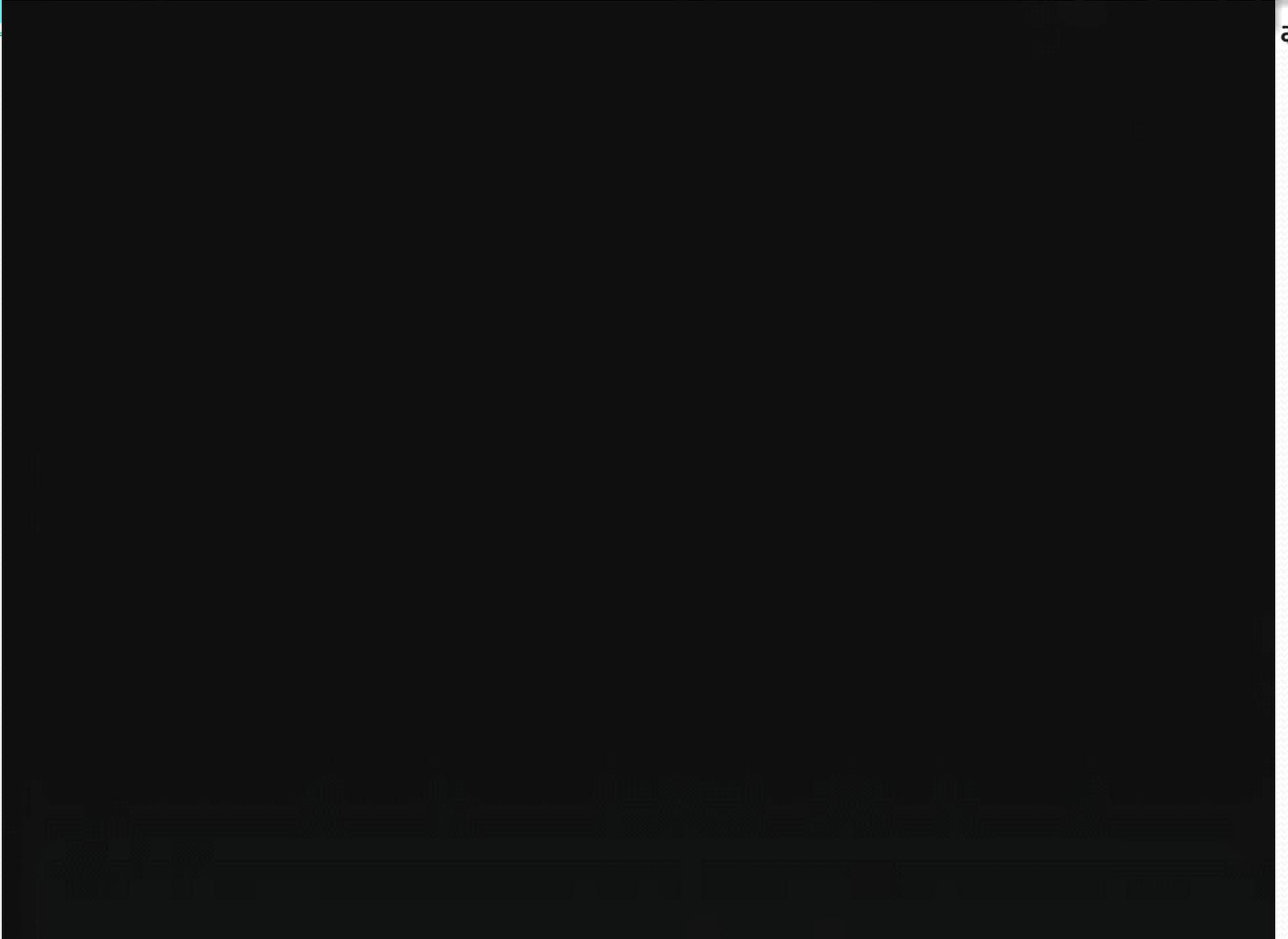
e)



Coquilha para vazamento por gravidade

- Vida útil de moldes:

Material a ser fundido	Faixa de Tv	Vida do molde (n° de ciclos)
Fefo cinzento	1.250-1.500	5.000-20.000
Ligas de Al	700-760	até 100.000
Ligas de Cu	1.050-1.150	5.000-2.0000
Ligas de Mg	650-700	20.000-100.000
Ligas de Zn	390-430	100.000 +



FILME
FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE



Vazamento sob pressão ⇒ garante o perfeito preenchimento do molde.

Pressões da ordem de até 70 kg/mm²; mantida até o final da solidificação.

Moldes fabricados com ligas especiais:

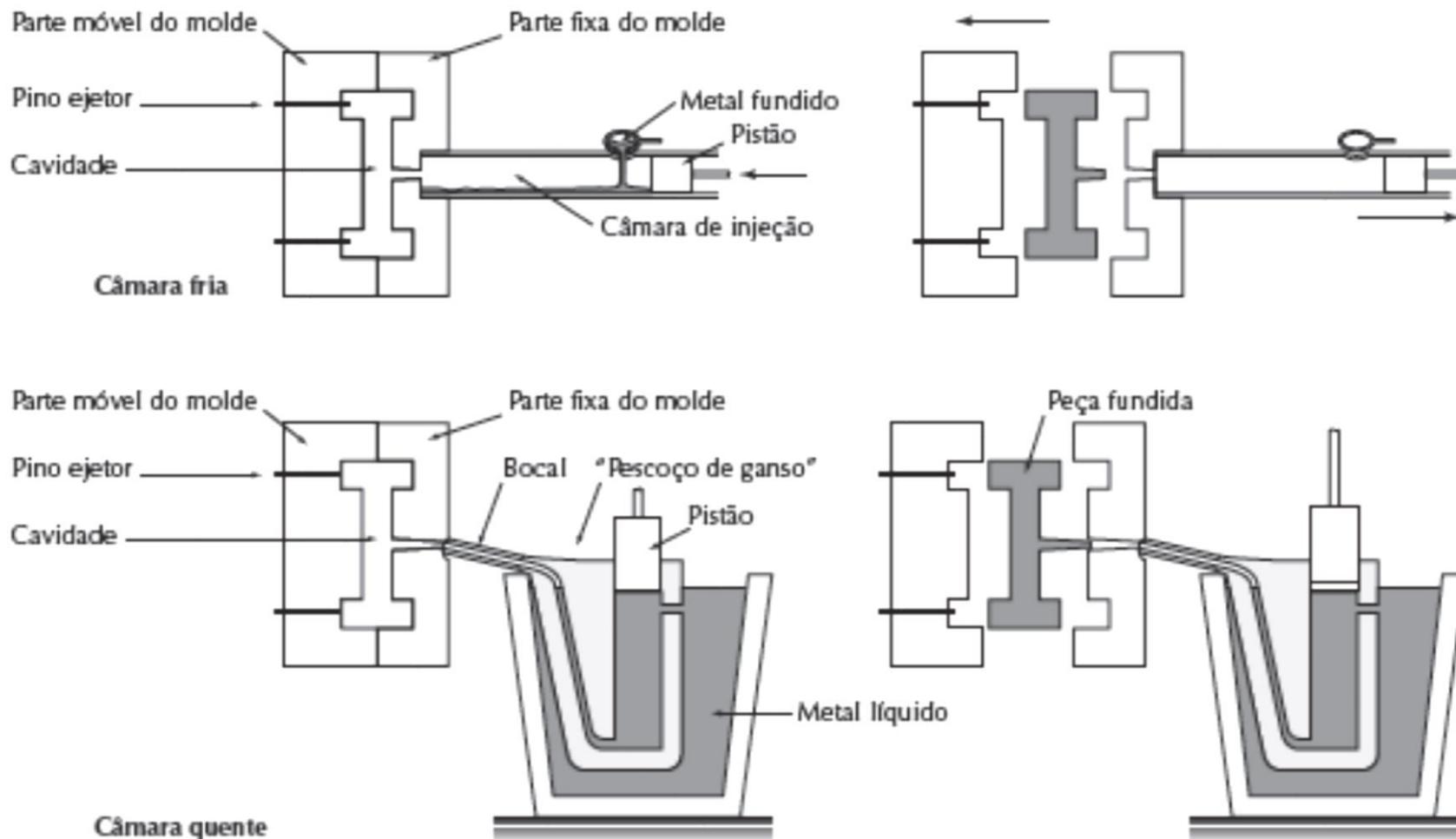
- ⇒ resistentes a alta temperatura e a à abrasão;**
- ⇒ aços Cr, aços ferramenta.**

Produto:

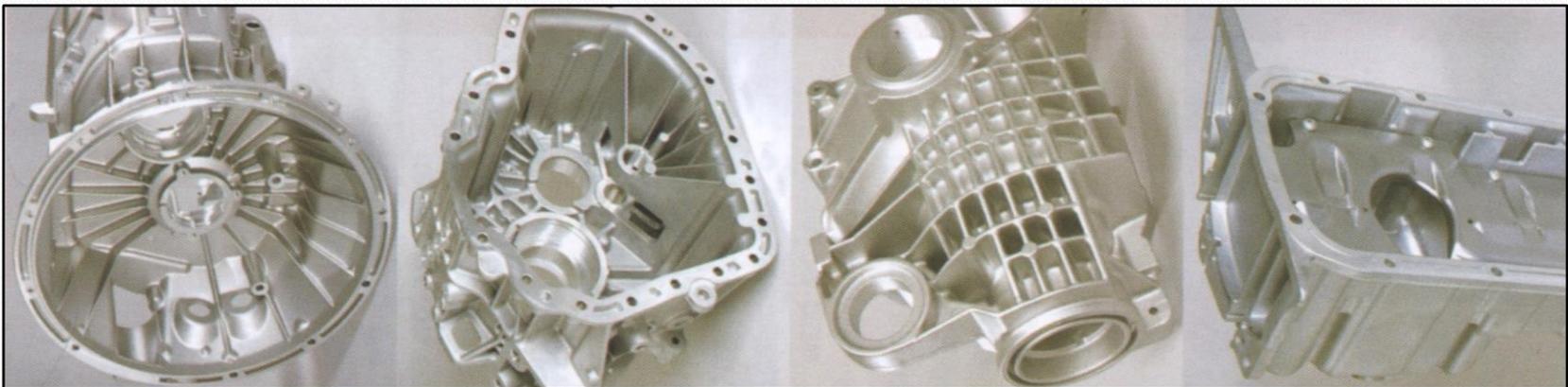
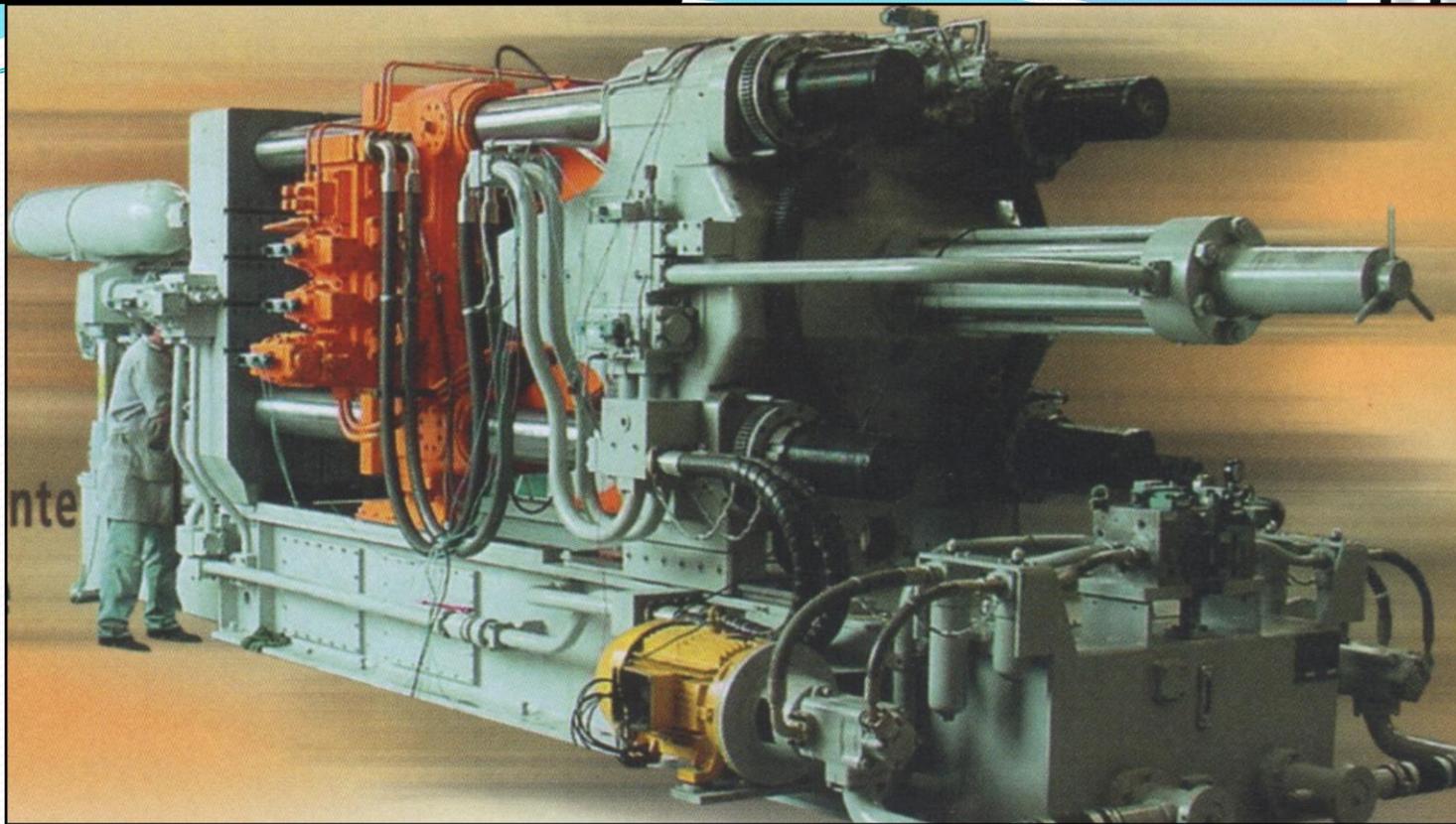
- ⇒ alta qualidade superficial e precisão dimensional.**
- ⇒ produto com paredes finas, geometrias complexas.**
- ⇒ estrutura refinada, boas propriedades mecânicas.**

Limitação

- alto custo de equipamentos e ferramental;**
- não permite fabricação de fundidos com cavidades intrincadas;**
- limitações quanto T_v ⇒ restringe tipos de ligas;**
- limites de dimensão;**
- forte turbulência no preenchimento ⇒ porosidade e inclusões.**



FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO



FILME
FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO



FILME
FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO



FIM