

0655 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA

Cópia das transparências sobre:

FUNDIÇÃO

Prof. Demarchi

Capítulo 1 – FUNDIÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO

Transformação dos metais e suas ligas em peças de uso industrial tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido \Rightarrow derramamento do metal no interior de uma cavidade ou forma, chamada *molde*.

Molde \Rightarrow pode corresponder à forma final da peça desejada ou pode sofrer posteriores tratamentos de conformação no estado sólido até chegarmos às dimensões desejadas.

Cavidade no molde \Rightarrow “negativo” da peça.

1.2 – SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS NO INTERIOR DOS MOLDES

Transição do estado líquido para o sólido \Rightarrow pode levar ao surgimento de heterogeneidades, que se não controladas podem provocar defeitos e rejeição das peças.

1.2.1 – Cristalização

Consiste no aparecimento das primeiras células cristalinas unitárias, que servem como núcleos para o posterior crescimento dos cristais, dando origem aos grãos definitivos e à estrutura granular típica dos metais.

Crescimento dos cristais \Rightarrow não ocorre de maneira uniforme
 \Rightarrow velocidade depende da direção dos eixos cristalográficos
 \Rightarrow no interior do molde, depende da proximidade das paredes, que vai determinar também a velocidade de resfriamento.

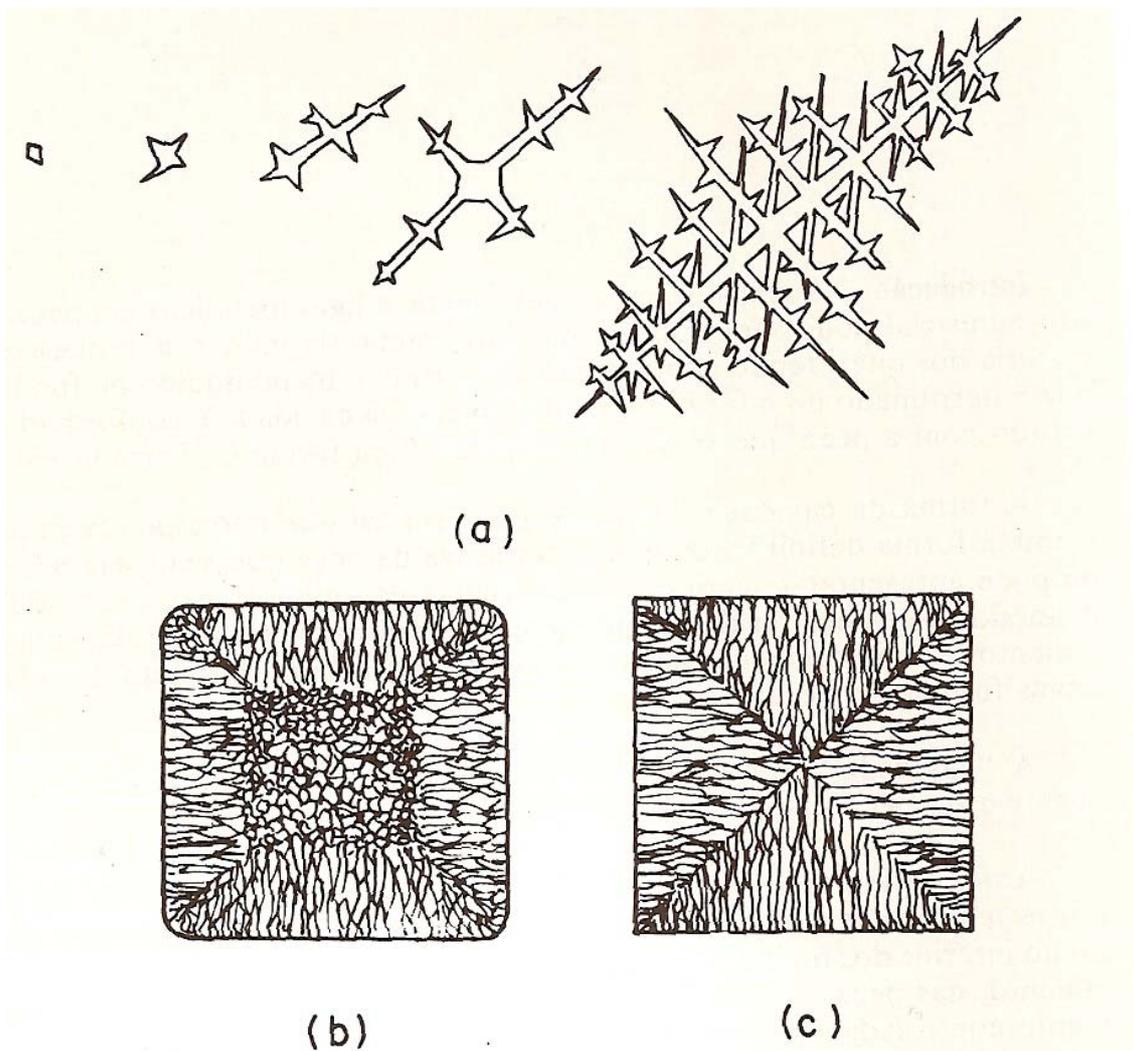


Figura 110 – Dendrita originada na solidificação (a); aspecto típico da secção de um “lingote” mostrando algumas formas que os órgãos adquirem durante a solidificação no interior de uma “lingoteira” (b); efeito dos cantos na cristalização (c)

Desenvolvimento e expansão de cada núcleo de cristalização origina um tipo de cristal chamado de *dendrita*
 ⇒ crescimento das dendritas ocorre até se encontrarem com as dendritas vizinhas, originando os *grãos* e os *contornos de grãos*, formando a massa sólida.

Figura item (b) ⇒ solidificação no interior de um molde metálico prismático, chamado de *lingoteira*, originando o *lingote* ⇒ início nas paredes ⇒ cristais tendem a crescer mais rapidamente na direção perpendicular às paredes do molde ⇒ estruturas colunares típicas, que se encontram

em planos diagonais \Rightarrow planos de maior fragilidade, podendo originar fissuras nos processos de conformação posteriores \Rightarrow emprego de cantos arredondados.

1.2.2 – Contração de volume

Durante a solidificação ocorrem 3 tipos de contrações:

\Rightarrow contração líquida – devido à diminuição da temperatura até o início da solidificação.

\Rightarrow contração de solidificação – variação de volume durante a mudança do estado líquido para o sólido.

\Rightarrow contração sólida – variação de volume já no estado sólido (da temperatura de fim de solidificação até a ambiente)

Pode ser expressa em % de volume ou linearmente (no caso da contração sólida).

Contração sólida \Rightarrow deve ser considerada no projeto do modelo \Rightarrow depende da liga utilizada.

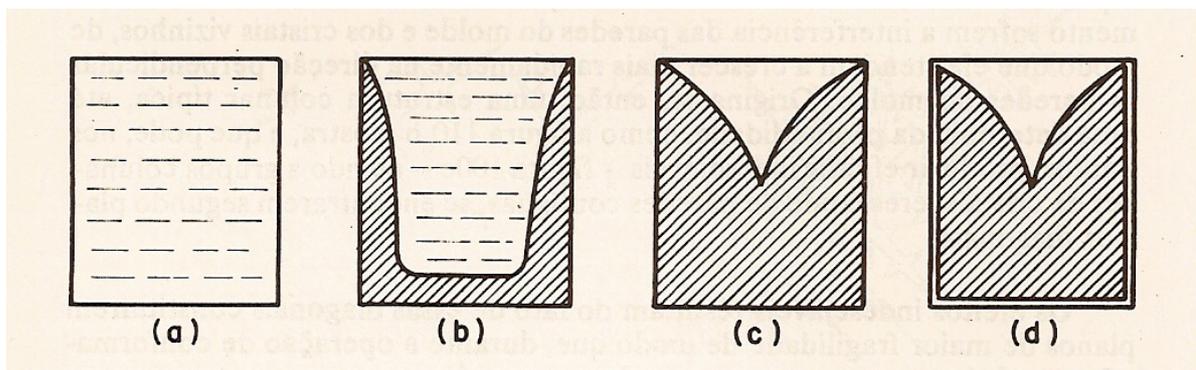
Exemplos de contração linear:

\Rightarrow aços fundidos: de 2,18% a 2,47% (menor para teores mais altos de C)

\Rightarrow ferros fundidos: de 1 a 1,5% (cinzento = 1% ; nodular = 1,3 a 1,5%)

\Rightarrow níquel e ligas cobre-níquel: de 8 a 9%

A contração provoca uma heterogeneidade chamada de *vazio* ou *chupagem*.



Os vazios podem ficar localizados na parte interna das peças, próximos à superfície, porém invisíveis externamente.

Contração pode provocar:

- ⇒ defeitos internos (vazios)
- ⇒ trincas a quente
- ⇒ tensões residuais

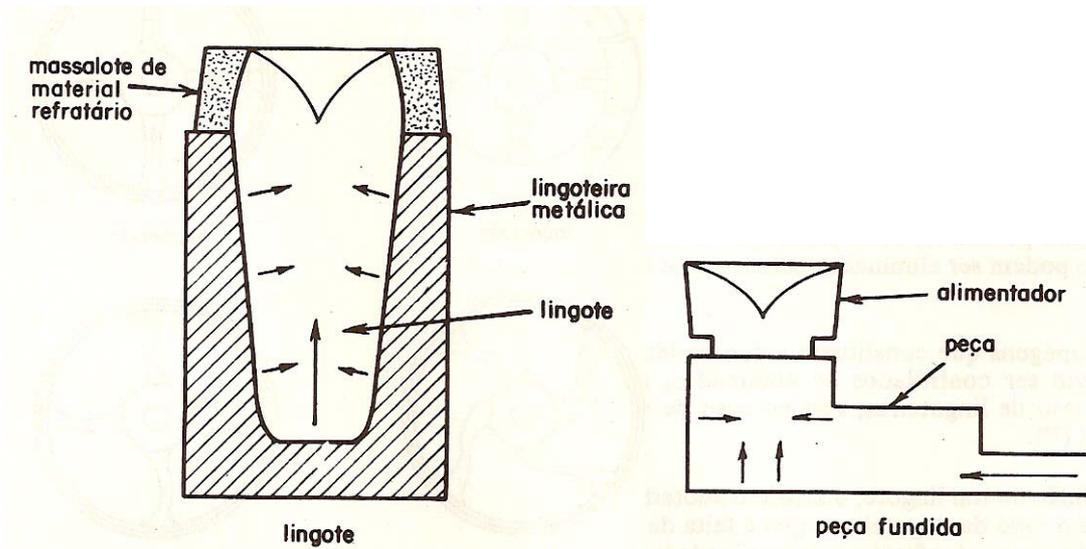
Estes problemas podem ser controlados através de:

- ⇒ projeto da peça
- ⇒ tratamentos de alívio de tensões
- ⇒ projeto do molde

Projeto do molde:

⇒ Lingoteira: utilização de uma peça postiça (de material refratário) no topo da lingoteira ⇒ chamada “cabeça quente” ou “massalote” ⇒ Material refratário retém o calor por um tempo mais longo e corresponderá à região que solidificará por último, concentrando o vazio nesta região, que será posteriormente eliminada do lingote.

⇒ Molde de peças: utilização de um “alimentador” ⇒ entrada do metal líquido através de canais é feita numa seção mais ampla, que alimenta as menos espessas ⇒ alimentador ficará com excesso de metal líquido, concentrando o vazio nesta região, que será eliminada posteriormente.



1.2.3 – Concentração de impurezas

Impurezas nas ligas apresentam comportamento diferente se a liga estiver no estado líquido ou no sólido:

- ⇒ líquido: impurezas totalmente dissolvidas, homogêneas.
- ⇒ sólido: menos solúveis (ex. P e S nas ligas ferro-carbono), ficando acumuladas nas regiões em que a solidificação ocorreu por último ⇒ *segregação*
- ⇒ composição química não uniforme ⇒ propriedades mecânicas diferentes em certas regiões.

1.2.4 – Desprendimento de gases

Mais comuns nas ligas ferro-carbono ⇒ Oxigênio dissolvido na liga tende a se combinar com o carbono, formando CO_2 , facilmente eliminado se a liga estiver no estado líquido. Porém, conforme a viscosidade aumenta durante a solidificação, este gás tende a ficar retido na peça, formando bolhas (vazios). ⇒ Adição ao metal líquido de “desoxidantes”, alguns tipos de ferro-ligas (tais como ferro-silício, ferro-manganês) ou alumínio ⇒ Oxigênio reage preferencialmente com estes elementos, formando óxidos sólidos (SiO_2 , MnO e Al_2O_3).

1.3 – PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

- ⇒ Fundição por gravidade
- ⇒ Fundição sob pressão
- ⇒ Fundição por centrifugação
- ⇒ Fundição de precisão

Etapas dos processos de fundição:

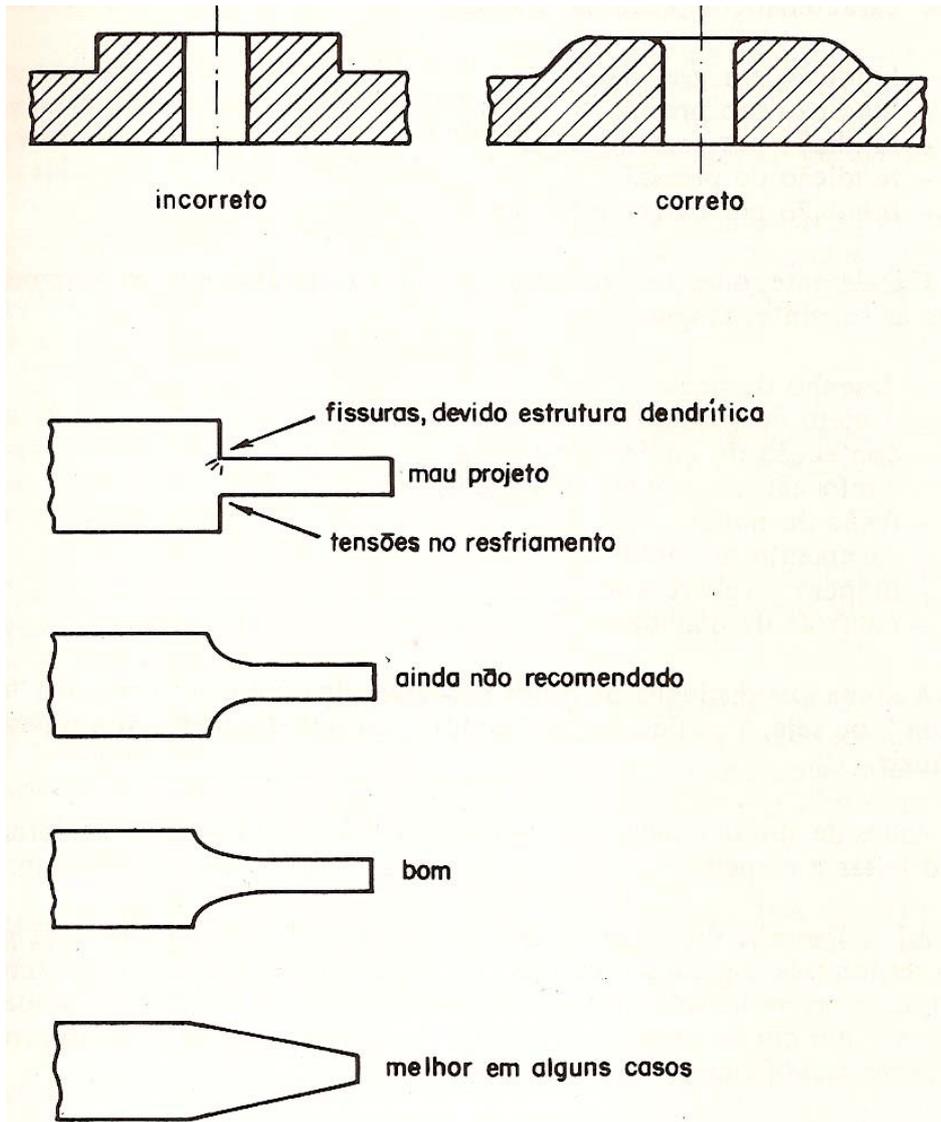
- Projeto da peça
- Projeto do modelo
- Confecção do modelo (modelagem ou modelação)
- Confecção do molde (moldagem)
- Fusão do metal
- Vazamento no molde
- Limpeza e rebarbação
- Controle de qualidade

1.3.1 – Projeto da peça

No projeto de uma peça a ser fundida, devem ser considerados os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal no molde, para que eventuais defeitos sejam evitados. A princípio, considerar:

- Estrutura dendrítica resultante
- Tensões residuais de resfriamento
- Espessura de paredes e regiões de difícil preenchimento

⇒ Evitar variações bruscas de seções e cantos vivos:



⇒ Considerar uma espessura mínima de paredes

- Paredes muito finas não são bem preenchidas com o metal líquido.
- Maior velocidade de resfriamento pode originar regiões de maior dureza

SECÇÕES MÍNIMAS RECOMENDADAS EM PEÇAS FUNDIDAS

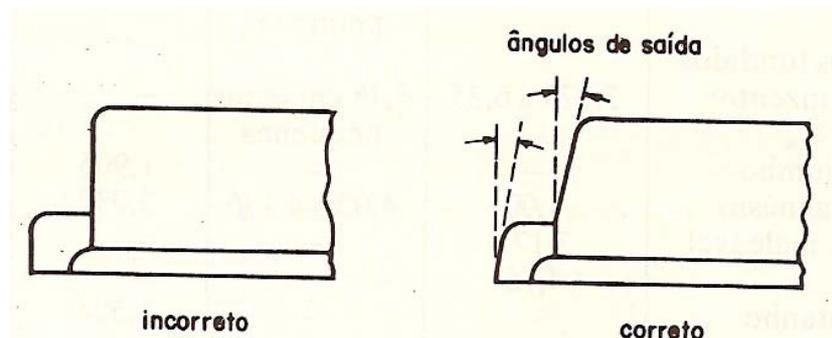
Liga	Secção mínima, em mm			
	Fundição em areia	Fundição em molde metálico	Fundição sob pressão	
			Grandes áreas	Pequenas áreas
De alumínio	3,175 a 4,76	3,175 em áreas pequenas	1,905	1,143
De cobre	2,38	3,175 em áreas pequenas	2,54	1,524
Ferros fundidos cinzentos	3,175 a 6,35	4,76 em áreas pequenas	—	—
De chumbo	—	—	1,905	1,016
De magnésio	4,00	4,00 a 4,176	2,032	1,27
Ferro maleável	3,175	—	—	—
Aço	4,76	—	—	—
De estanho	—	—	1,524	0,762
Ferro fundido branco	3,175	—	—	—
De zinco	—	—	1,143	0,38

SECÇÕES MÍNIMAS DE ORIFÍCIOS EM PEÇAS FUNDIDAS

Processo de fundição	Diâmetro, mm
Em areia	$D = 1/2 t$ onde D = diâmetro do macho t = espessura da secção em mm. D não deve, geralmente, ser menor que 6,35 mm
Em molde metálico	$D = 1/2 t$, geralmente maior que 6,35 mm
Sob pressão:	
ligas à base de Cu	4,76
ligas à base de Al	2,38
ligas à base de Zn	0,79
ligas à base de Mg	2,38

⇒ Evitar fissuras de contração do metal durante a solidificação

⇒ Prever conicidade para melhor confecção do molde, considerando os ângulos de saída recomendados (de 1° a 3°)



1.3.2 – Projeto do modelo

Os modelos são fabricados em:

- Madeira (cedro, imbuia, peroba, pinho, compensado)
- Materiais de fácil usinagem (alumínio)
- Resina

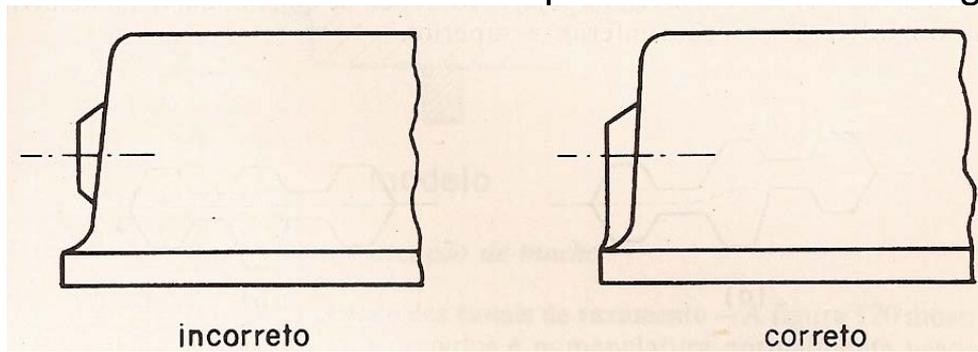
Podem ser em peça única (para peças grandes) ou montados em placas (para produção seriada e de peças pequenas, facilitando o uso de máquinas de moldar)

Devem ser considerados:

⇒ Contração do metal ao solidificar, ou seja, o modelo deve ser maior que a peça. Os valores dos acréscimos dependem do metal ou liga a ser fundido. Exemplos:

Ligas fundidas	Dimensão do modelo cm	Contração aproximada mm/cm
Ferro fundido cinzento	Até 60	0,1
	De 63,5 a 120	0,08
	Acima de 120	0,07
Aço fundido	Até 60	0,2
	De 63,5 a 183	0,15
	Acima de 183	0,13
Ferro maleável	–	0,01 a 0,10 dependendo da espessura da secção
Alumínio	Até 120	0,13
	De 124 a 183	0,12
	Acima de 183	0,10
Magnésio	Até 48	0,28
	Acima de 48	0,13
Latão	–	0,15
Bronze	–	0,1 a 0,2

⇒ Eliminar rebaixos e detalhes que dificultam a moldagem.



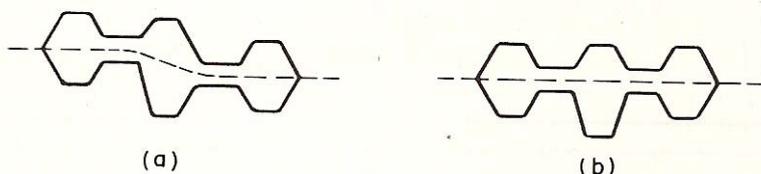
⇒ Acrescentar sobremetal para posterior usinagem de acabamento. Exemplos:

MARGENS DIMENSIONAIS RECOMENDADAS NOS MODELOS PARA PREVER A USINAGEM DE ACABAMENTO

Liga	Dimensões do modelo cm	Margens, mm	
		Orifício	Superfície
Ferro fundido	Até 15,2	3,175	2,38
	De 15,2 a 30,5	3,175	3,175
	De 30,5 a 50,8	4,76	4,0
	De 50,8 a 91,4	6,35	4,76
	De 91,4 a 152,4	7,94	4,76
Aço fundido	Até 15,2	3,175	3,175
	De 15,2 a 30,5	6,35	4,76
	De 30,5 a 50,8	6,35	6,35
	De 50,8 a 91,4	7,14	6,35
	De 91,4 a 152,4	7,94	6,35
Não-ferrosos	Até 7,6	1,59	1,59
	De 7,6 a 20,3	2,38	2,38
	De 20,3 a 30,5	2,38	3,175
	De 30,5 a 50,8	3,175	3,175
	De 50,8 a 91,4	3,175	4,0
	De 91,4 a 152,4	4,0	4,76

⇒ Verificar a divisão do modelo.

- Linha divisória ou linha de partição representa a linha que divide as partes que formam a cavidade superior e a cavidade inferior do molde.
- Deve-se objetivar uma linha divisória reta, ou seja, um único plano que divida o modelo em suas seções superior e inferior

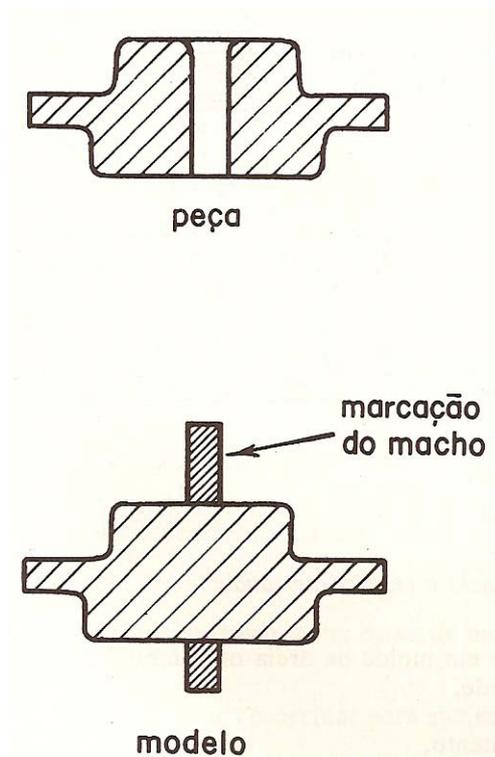


⇒ Considerar o volume de produção, para a escolha do material do modelo e de sua montagem em placa ou não.

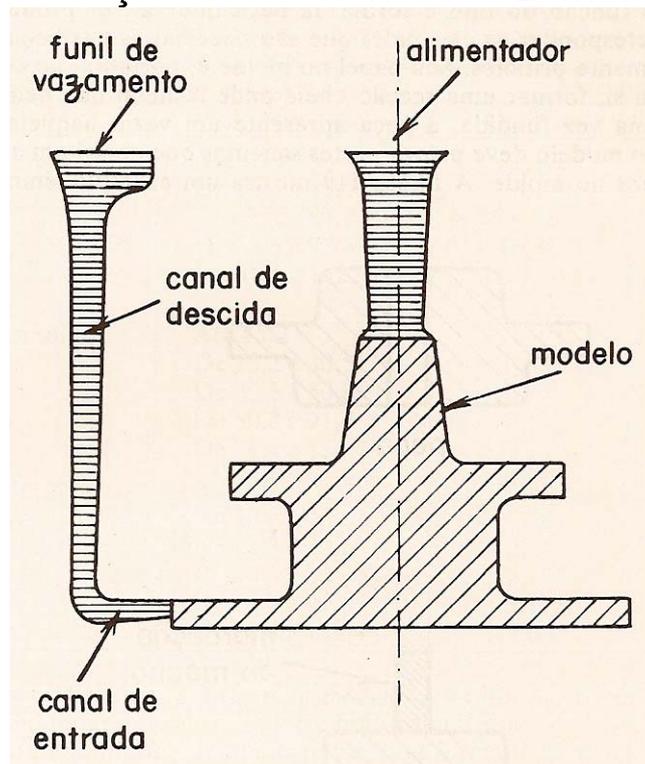
⇒ Determinar a localização dos machos.

Macho: corresponde às cavidades que são necessárias nas peças fundidas (principalmente orifícios). Sua função no molde é, ao contrário do modelo em si, formar uma seção cheia onde o metal não penetrará, de modo que a peça apresente um vazio naquela região.

O modelo deve prever partes salientes que permitam a montagem dos machos no molde. Exemplo:



⇒ Prever a colocação dos canais de vazamento.



1.3.3 – Confeção do molde ou moldagem

Molde: é o “recipiente” que contém em seu interior a cavidade ou as cavidades com a forma da peça que será fundida, dentro da(s) qual(is) será vazado o metal líquido.

A etapa de moldagem permite distinguir os vários processos de fundição:

- Moldagem em molde de areia ou temporário por gravidade:
 - Areia verde
 - Areia seca
 - Areia – cimento
 - Areia de macho
- Moldagem em molde metálico ou permanente
 - Por gravidade
 - Sob pressão
- Moldagem pelo processo CO₂
- Fundição por centrifugação

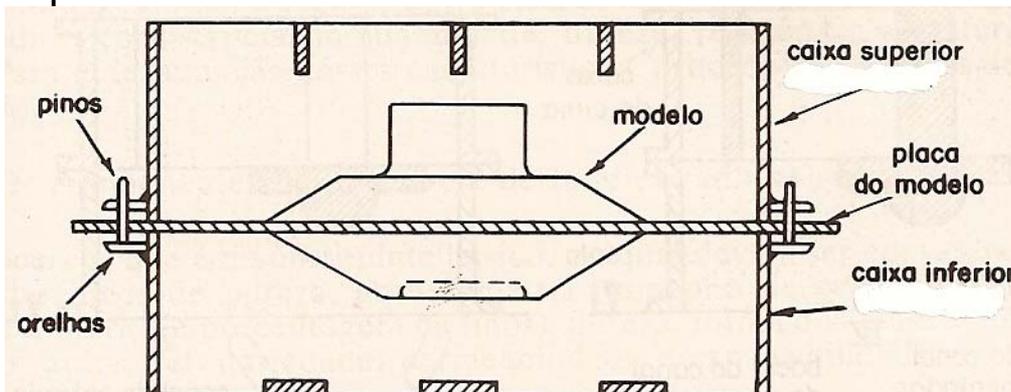
- Fundição de precisão
 - Em casca
 - Cera perdida (de investimento)

1.3.3.1 – Moldagem em areia

Requisitos do molde:

- Resistência para suportar o peso do metal líquido
- Resistência à ação erosiva do metal líquido
- Gerar a menor quantidade possível de gases
- Facilitar a saída dos gases gerados para a atmosfera

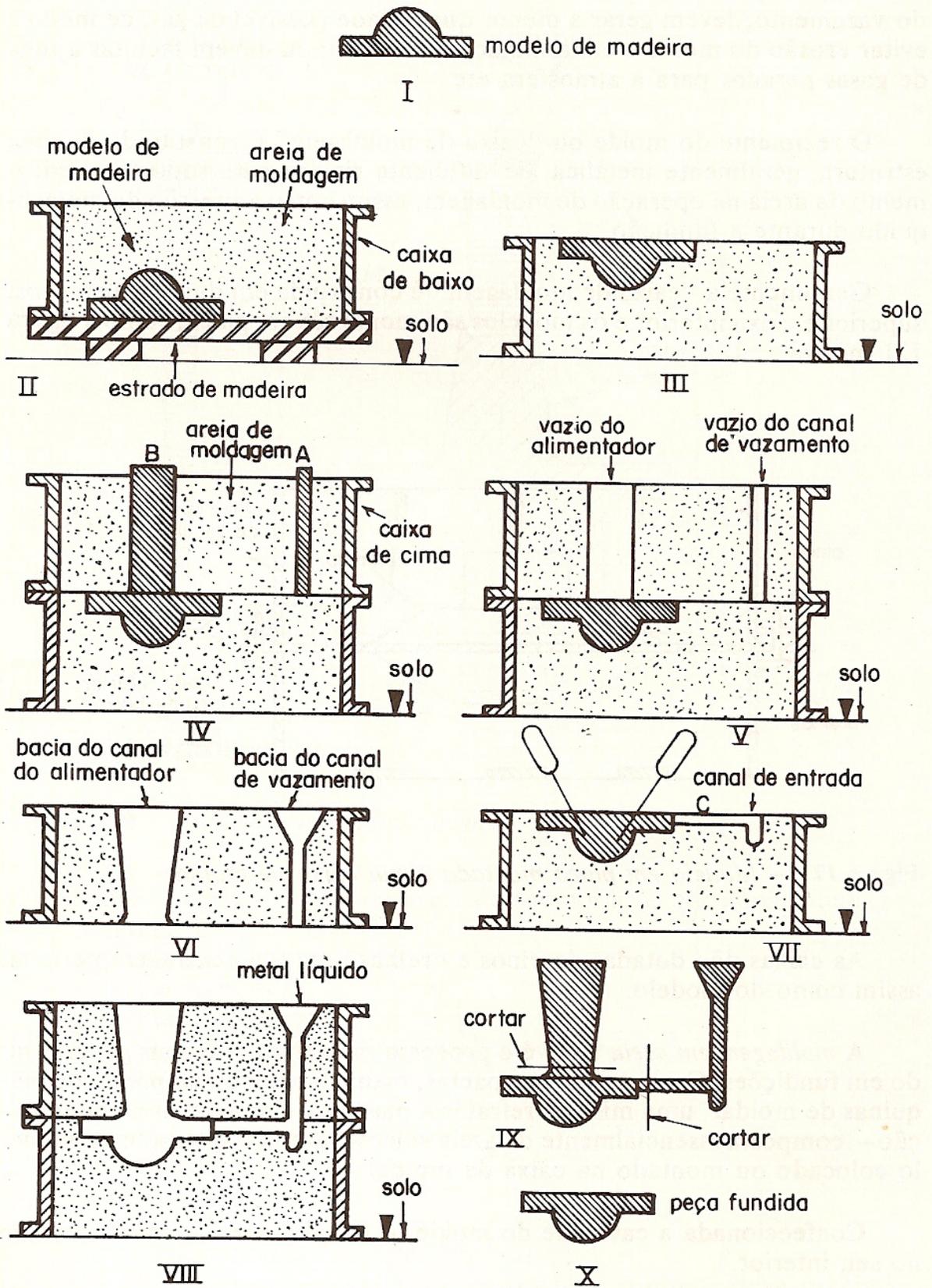
Caixa de moldagem: estrutura, geralmente metálica, com resistência suficiente para suportar o socamento da areia na operação de moldagem, bem como a pressão do metal líquido durante a fundição. Normalmente construída em duas partes:

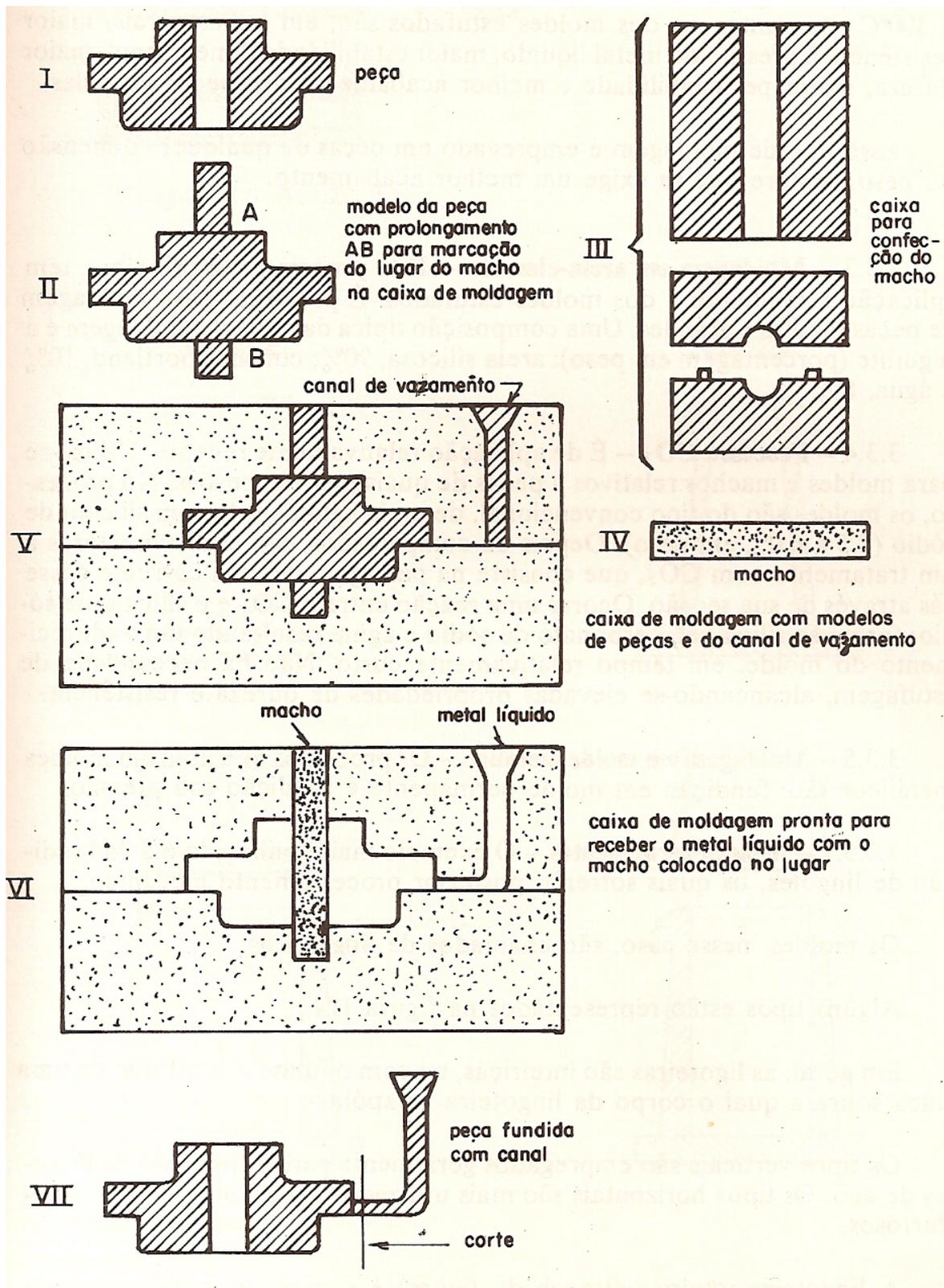


Possuem pinos e orelhas para a centragem das partes da caixa e da placa do modelo.

Moldagem em areia verde: consiste em compactar (manualmente ou com máquina de moldar) uma mistura refratária chamada areia de fundição (composta de areia silicosa, argila e água) sobre o modelo colocado ou montado na caixa de moldar.

Seqüência de operações na fundição em areia verde





Areia de fundição:

Principais características: plasticidade e consistência, moldabilidade, dureza, resistência, refratariedade, etc.

Componentes:

- Areia: é o constituinte básico, em que devem ser consideradas a pureza, granulometria (tamanho de grãos, distribuição granulométrica e porcentagem de finos), dureza, forma dos grãos, integridade dos grãos, refratariedade, permeabilidade e expansibilidade.
- Argila: aglomerante usual nas areias de fundição sintéticas (especialmente preparadas).
- Carvão moído: eventualmente usado para melhorar o acabamento superficial das peças.
- Dextrina: aglomerante orgânico usado para dar maior resistência mecânica à areia quando seca em estufa.
- Farinha de milho gelatinizado (Mogul): melhora a trabalhabilidade da areia.
- Breu em pó: aglomerante, que dá principalmente à areia seca, grande resistência mecânica.
- Serragem: para atenuar os efeitos de expansão.

Composição típica de areia sintética de fundição:

Partes em peso: areia \Rightarrow 100 argila \Rightarrow 20 água \Rightarrow 4

Para a confecção dos machos, as areias devem apresentar alta resistência depois de secas em estufas (“estufadas” entre 150 e 250°C), alta dureza, alta permeabilidade e inalterabilidade. Seus componentes, além da areia e água, incluem vários tipos de aglomerantes: silicato de sódio, cimento portland, resinas piche, melação, farinha Mogul, óleos, etc.

A moldagem em areia verde pode ser feita manualmente (com socador manual ou pneumático) ou mecanicamente (com máquinas de compressão, de impacto, compressão vibratória, sopragem ou projeção centrífuga).

Moldagem em areia seca ou em molde “estufado”

Neste caso, a areia deve conter aditivos orgânicos para melhorar suas características. A secagem é feita em estufas entre 150°C e 250°C.

Vantagens do molde estufado:

- Maior resistência à pressão do metal líquido
- Maior estabilidade dimensional
- Maior dureza
- Melhor acabamento das peças fundidas.

Moldagem em areia-cimento

Vantagens semelhantes às dos moldes estufados e empregada para peças médias e grandes.

Composição típica da areia de moldagem:

Porcentagens em peso: areia silicosa ⇨ 82%
 cimento portland ⇨ 10%
 água ⇨ 8%

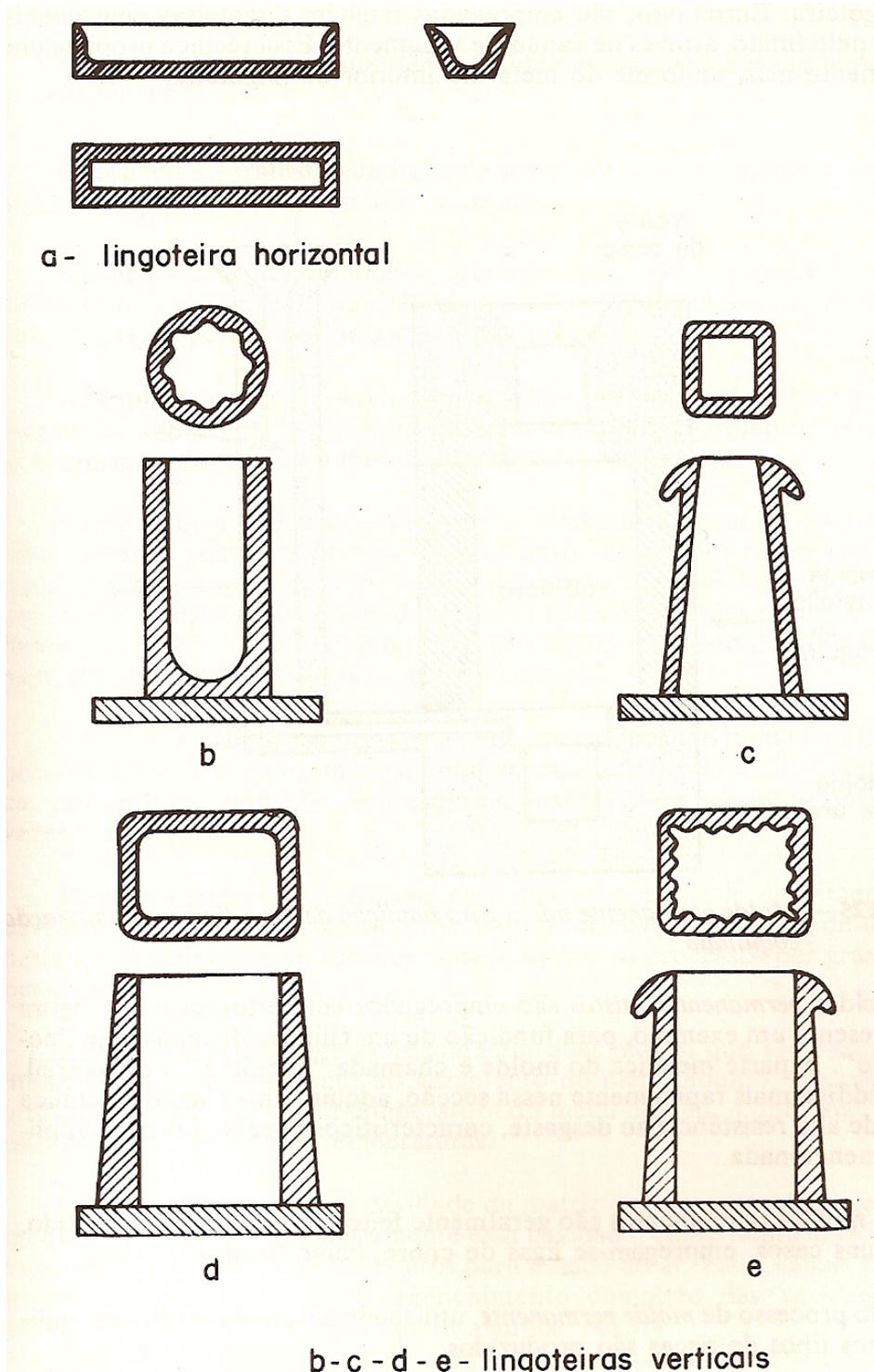
1.3.3.2 – Moldagem pelo processo CO₂

Os moldes são confeccionados em areia aglomerada com silicato de sódio (2,5 a 6,0% em peso). Depois de compactados, são submetidos a um tratamento com CO₂, que consiste na passagem de um fluxo deste gás através de sua seção ⇨ reação entre o CO₂ e o silicato de sódio formando sílica-gel, carbonato de sódio e água, resultando num endurecimento do molde em tempo relativamente curto ⇨ dispensa-se o tratamento em estufa, obtendo-se resistência e durezas elevadas.

1.3.3.3 – Moldagem em molde metálico

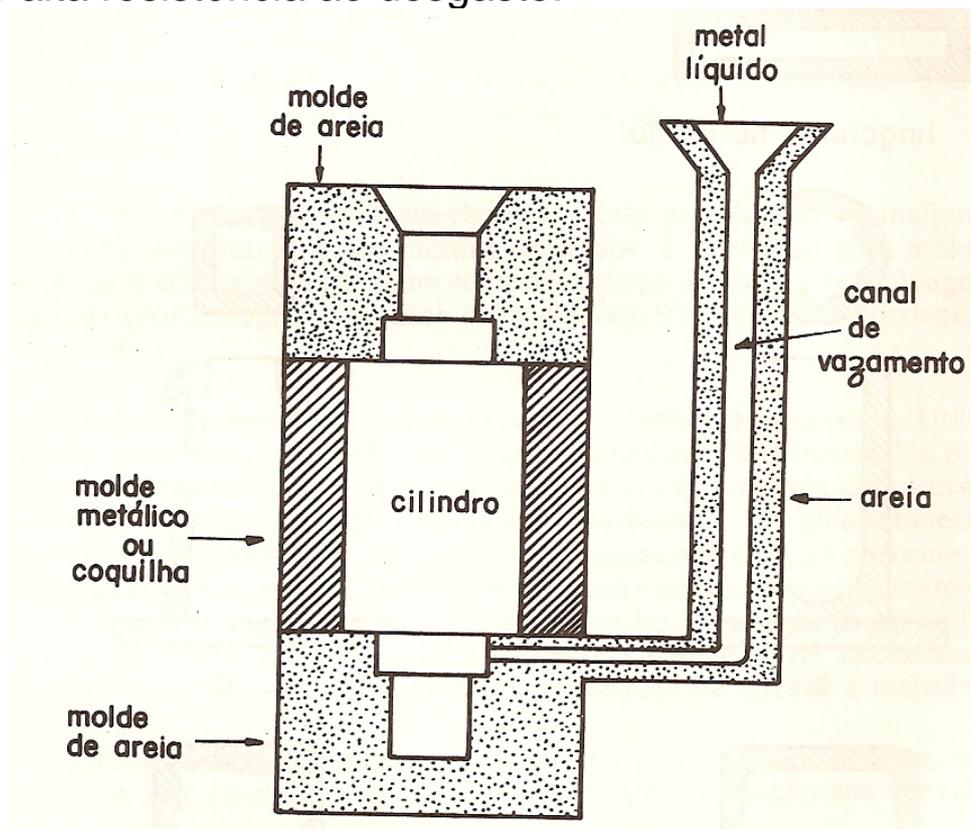
1.3.3.3.1 – Molde permanente por gravidade

Mais conhecido: fundição de lingotes. Moldes = lingoteiras



Normalmente, o vazamento do metal é feito pela parte superior da lingoteira, porém, são usadas também lingoteiras com enchimento pelo fundo através de canais de vazamento.

Moldes permanentes mistos: parte metálica do molde é chamada de *coquilha* e o material que se solidifica mais rapidamente nessa seção adquire uma camada mais dura e de alta resistência ao desgaste.



Molde permanente por gravidade também é utilizado para vários outros tipos de peças: o molde é composto de duas ou mais partes que, quando fechadas, formam a cavidade correspondente à forma da peça desejada.

Vantagens (em relação a peças produzidas em molde de areia):

- maior uniformidade
- melhor acabamento superficial
- tolerâncias dimensionais mais estreitas
- melhores propriedades mecânicas.

Desvantagens: - limitado a peças pequenas
 - custo elevado do molde (alto volume de produção)
 - formas complexas dificultam o projeto do molde (extração da peça)

1.3.3.3.2 – Fundição sob pressão

Metal líquido é forçado (sob pressão) a entrar na cavidade do molde, chamado neste caso de *matriz* (metálica, permanente).

Permite a fabricação de peças mais complexas e de paredes mais finas que os processos por gravidade.

Matriz pode ser fria ou aquecida à temperatura de vazamento; possui canais para saída de ar e para garantir o total preenchimento das cavidades. A pressão é mantida até o final da solidificação. Após abertura da matriz e expulsão da peça, procede-se à limpeza e lubrificação da matriz, preparando-a para o próximo ciclo.

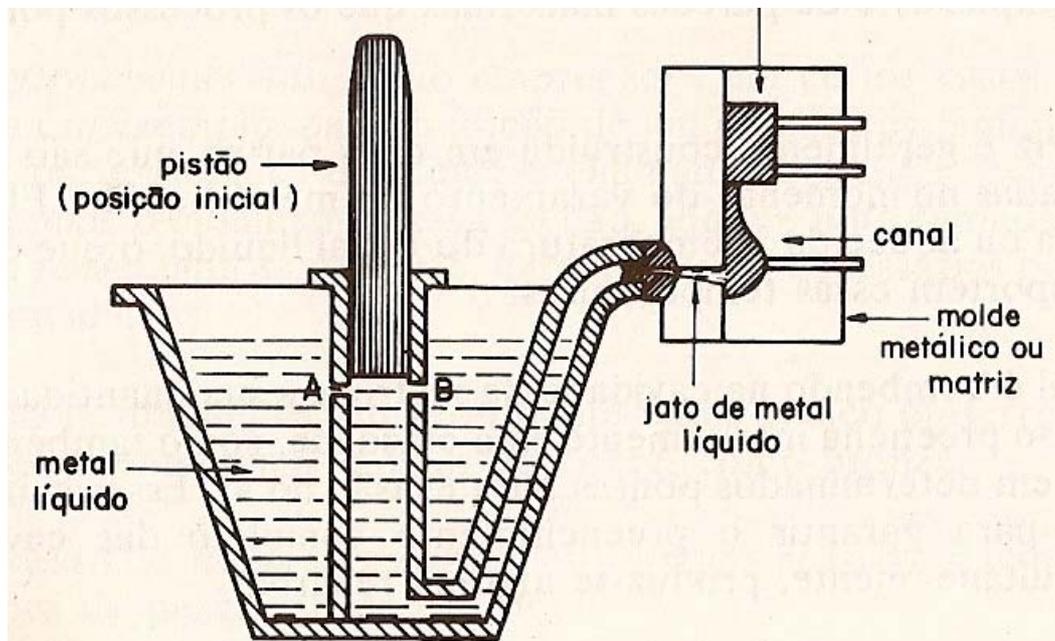
Vantagens:

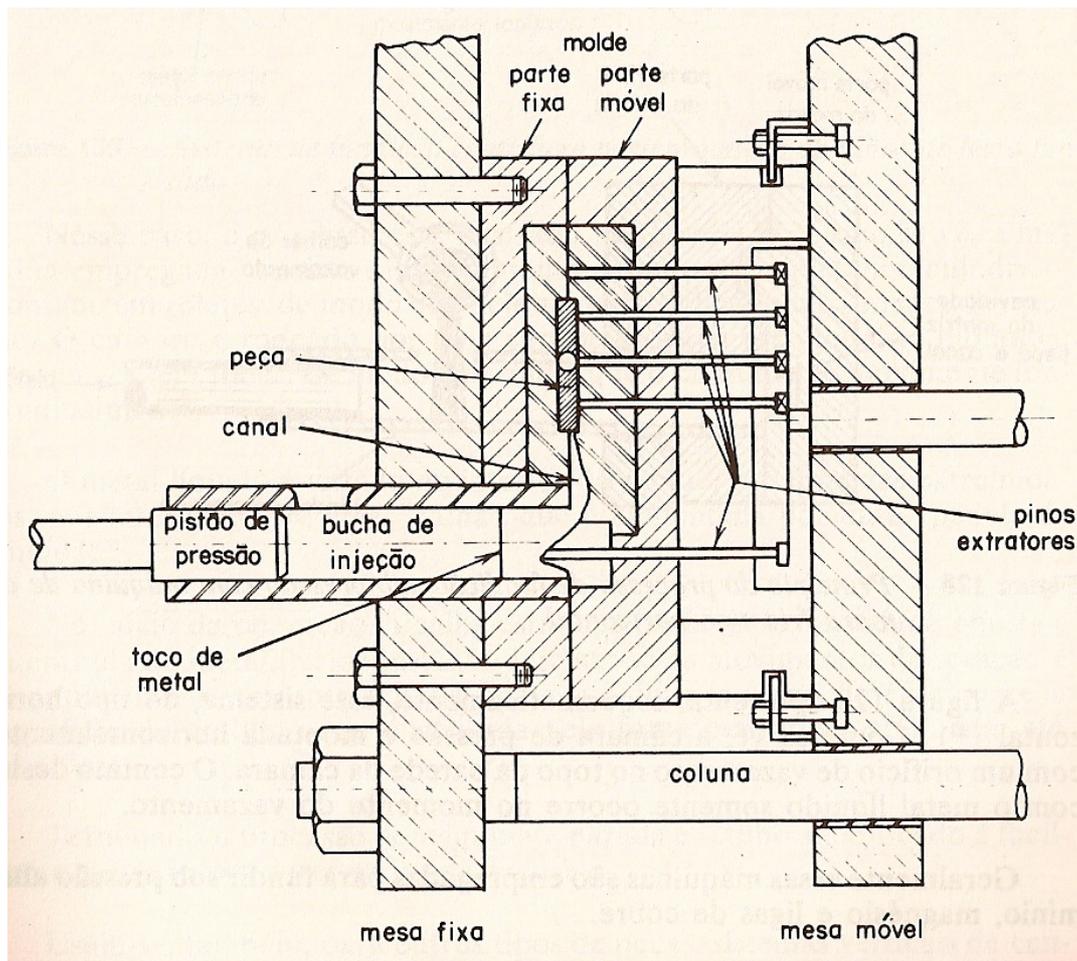
- Produção de formas mais complexas;
- Produção de peças com paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas;
- Alta capacidade de produção;
- Acabamento superficial de ótima qualidade;
- Matrizes de alta durabilidade;
- Permitem aplicação de revestimentos superficiais com pouco preparo prévio da superfície;
- Algumas ligas, como as de alumínio, apresentam maiores resistências que se fundidas em areia.

Desvantagens:

- Dimensões das peças são limitadas (normalmente <5kg);
- Ar retido no interior da matriz pode causar porosidades nas peças;
- Equipamento e acessórios de alto custo, sendo viáveis apenas para altos volumes de produção;
- Processo só é empregado para ligas cujas temperaturas de fusão não são superiores às das ligas à base de cobre.

Exemplos:





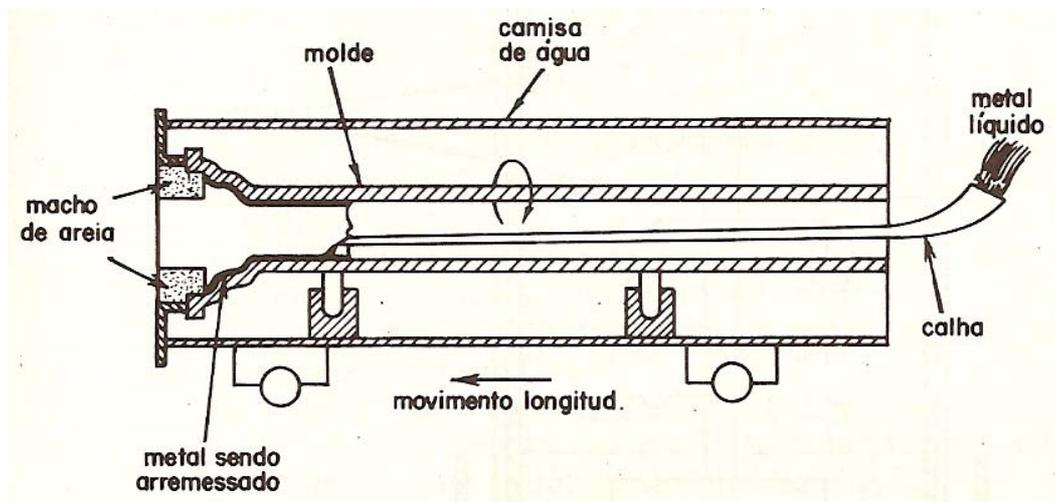
Máquinas para fundição sob pressão:

⇒ Câmara quente: se o metal a ser utilizado funde a temperatura baixa e não ataca o material do cilindro e pistão de injeção, este pode ser colocado diretamente no banho de metal líquido.

⇒ Câmara fria: caso em que o material fundido ataca o sistema de pressurização (cilindro e pistão). A câmara de pressão possui um orifício de vazamento e o contato com o metal líquido ocorre apenas no momento do vazamento. Empregada para ligas de alumínio, magnésio e cobre.

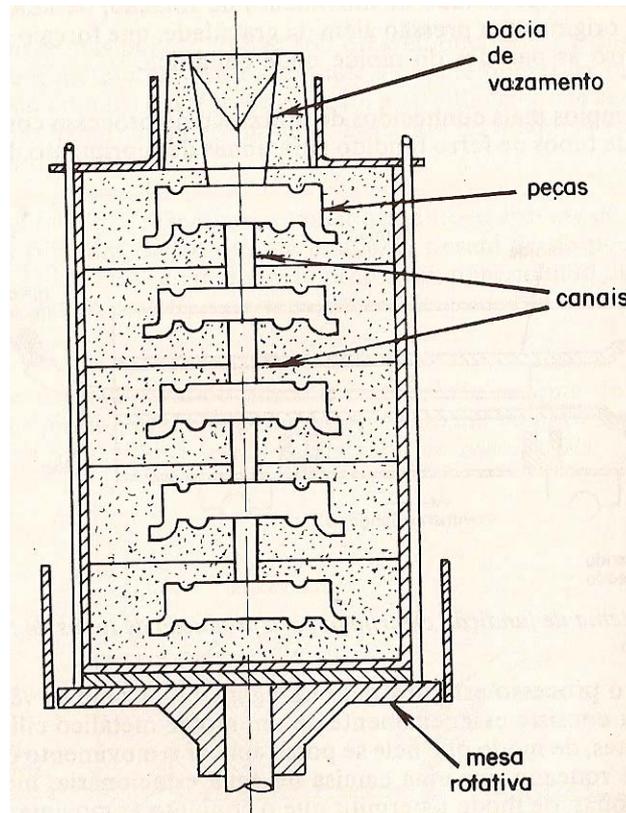
1.3.3.4 – Fundição por centrifugação

O metal líquido é vazado num molde dotado de movimento de rotação, de modo que a força centrífuga origina uma pressão que força o metal de encontro às paredes do molde, onde solidifica.



Características:

- Molde metálico cilíndrico montado em roletes;
- Camisa de água;
- Conjunto com movimento longitudinal;
- Alimentação através de calha e panela de fundição;
- Sistema horizontal ou vertical.



1.3.3.5 – Fundição de precisão

Utiliza-se um molde obtido pelo revestimento de um modelo consumível com uma pasta ou argamassa refratária que endurece à temperatura ambiente ou mediante aquecimento adequado ⇒ uma vez endurecida esta pasta refratária, o modelo é consumido ou inutilizado ⇒ casca endurecida que constitui-se no molde propriamente dito ⇒ após vazamento da peça, o molde também é inutilizado.

Vantagens:

- Produção em massa de peças com geometrias complexas;
- Reprodução de detalhes, cantos vivos, paredes finas;
- Grande precisão dimensional;
- Excelente acabamento superficial;
- Grande variedade de materiais que podem ser fundidos por este processo;
- Controle das propriedades mecânicas através do controle da solidificação;

- Possibilidade de utilização de atmosfera protetora ou vácuo.

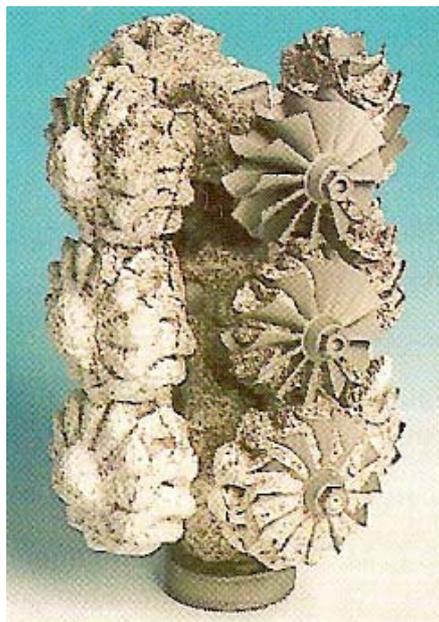
Limitações:

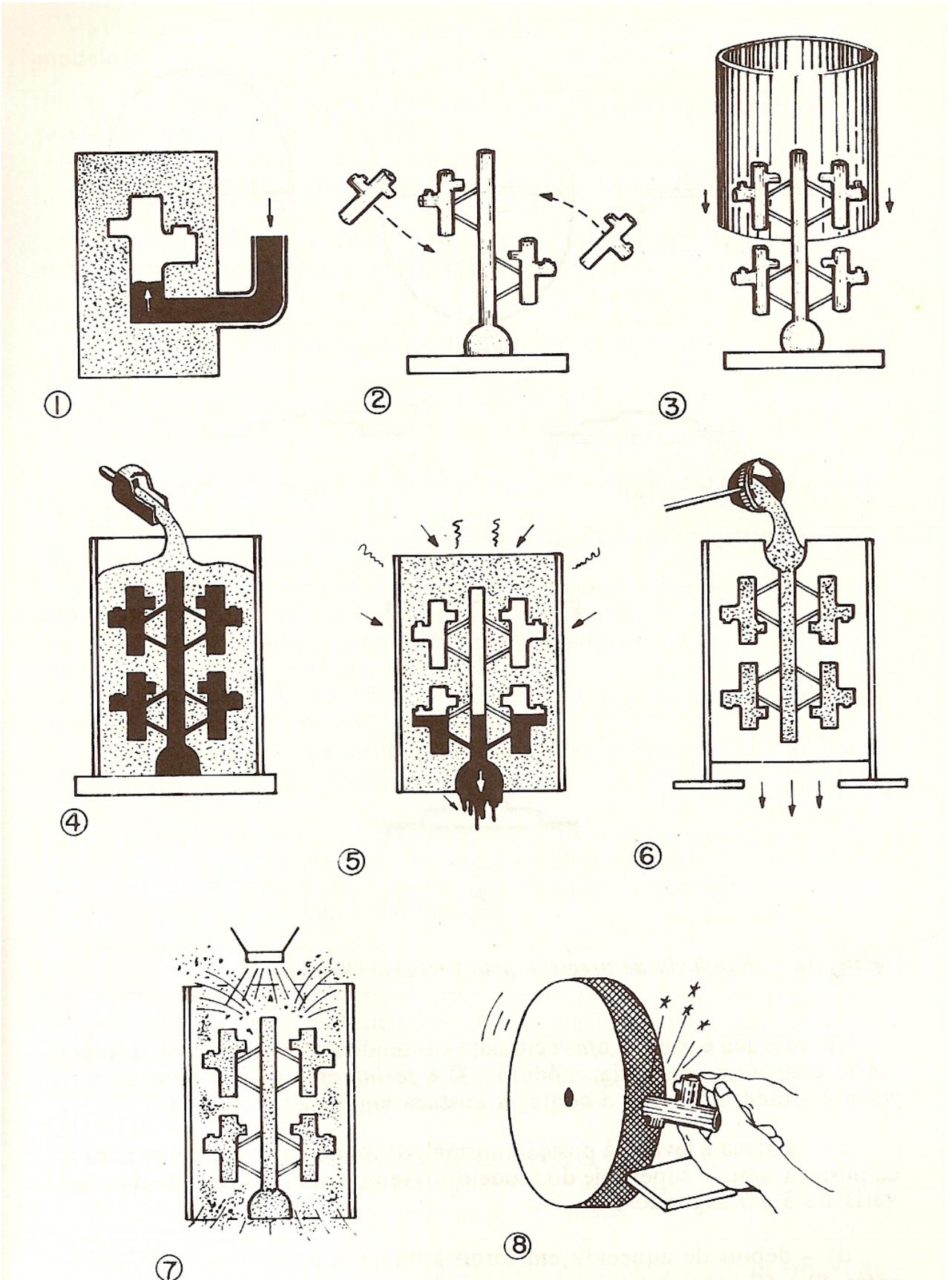
- Devido à capacidade dos equipamentos e investimentos em ferramental, as dimensões e peso das peças são limitados (<5kg).

Processo de cera perdida

Etapas:

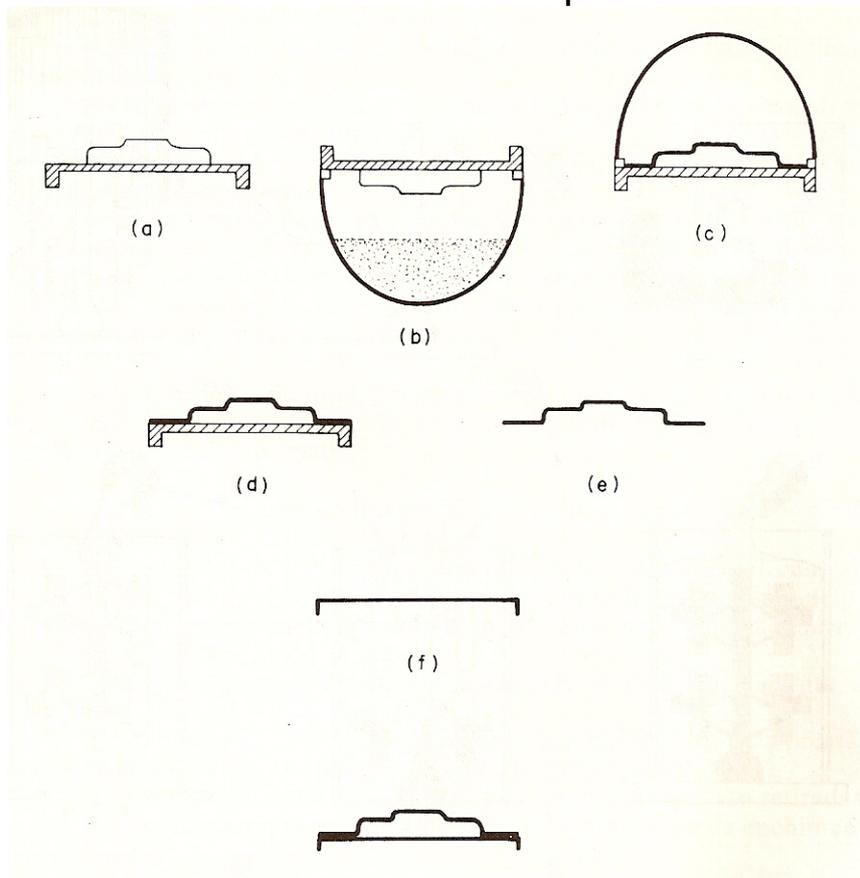
1. Injeção da cera na matriz para fabricação dos modelos.
2. Ligação dos modelos a um canal central.
3. Grupo de modelos é colocado num recipiente.
4. O recipiente é preenchido com uma pasta refratária (chamada de investimento).
5. Aquecimento provoca o endurecimento do molde e o derretimento dos modelos de cera.
6. Vazamento do metal no molde por gravidade, sob pressão, a vácuo ou com auxílio de centrifugação.
7. Quebra do molde e retirada das peças.
8. Separação das peças do canal central e esmerilhamento ou lixamento.





Processo de fundição em casca (Shell molding)

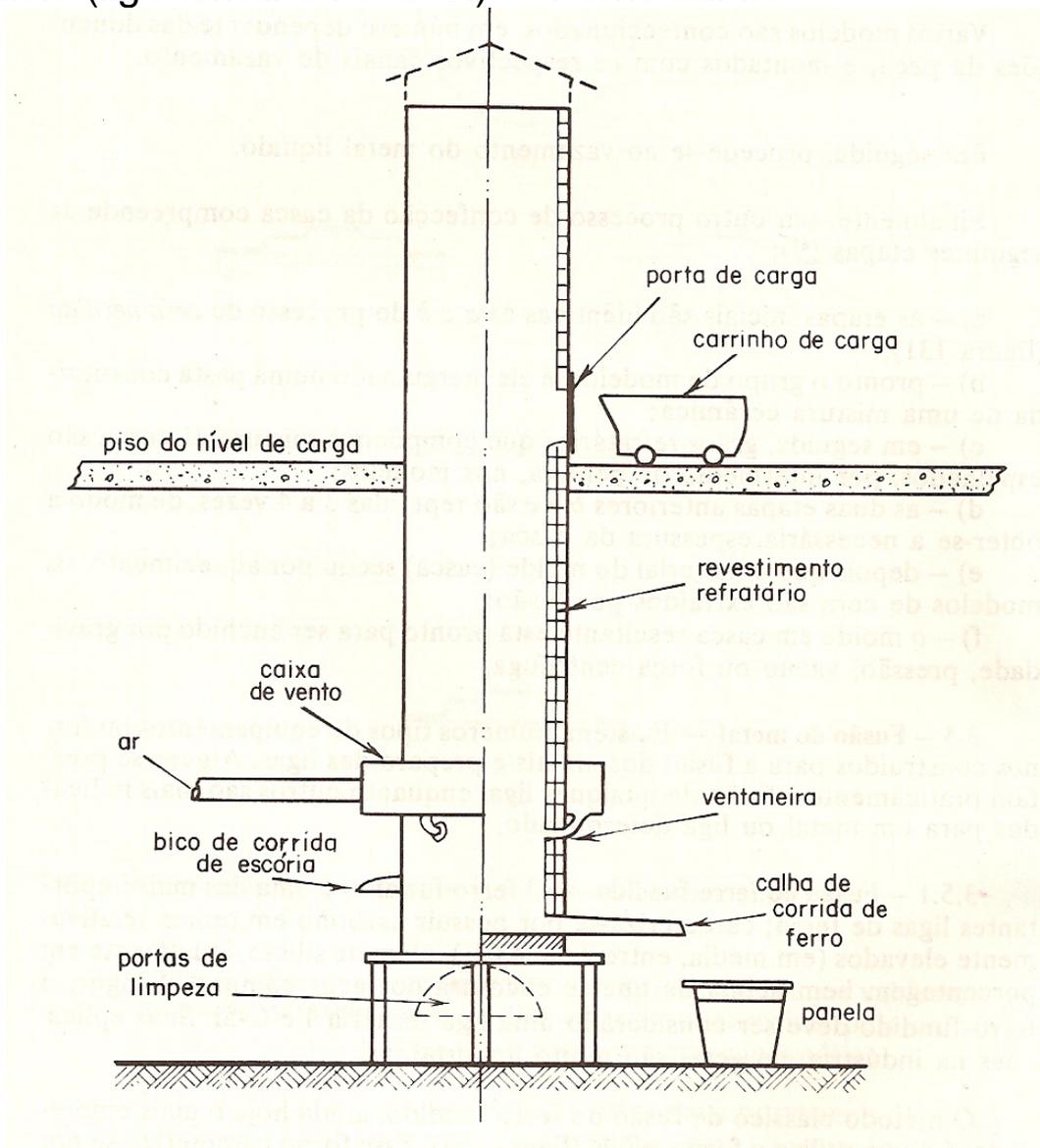
O molde é fabricado a partir de uma mistura de areia e resina endurecível ao calor que funciona como aglomerante
⇒ esta mistura é colocada sobre um modelo metálico que é aquecido (por volta de 450°C), resultando uma casca resistente e rígida que formará uma das metades do molde
⇒ a outra metade é feita de forma semelhante ⇒ montagem dos machos se necessário ⇒ fechamento das cascas por prensagem e colagem ⇒ montagem dos canais de vazamento ⇒ vazamento do metal líquido.



1.3.4 – Fusão do metal

1.3.4.1 – Fusão do ferro fundido

Liga de ferro com alto teor de carbono (2,5% a 4,0%) e silício (liga ternária Fe-C-Si) ⇒ Forno cubilô



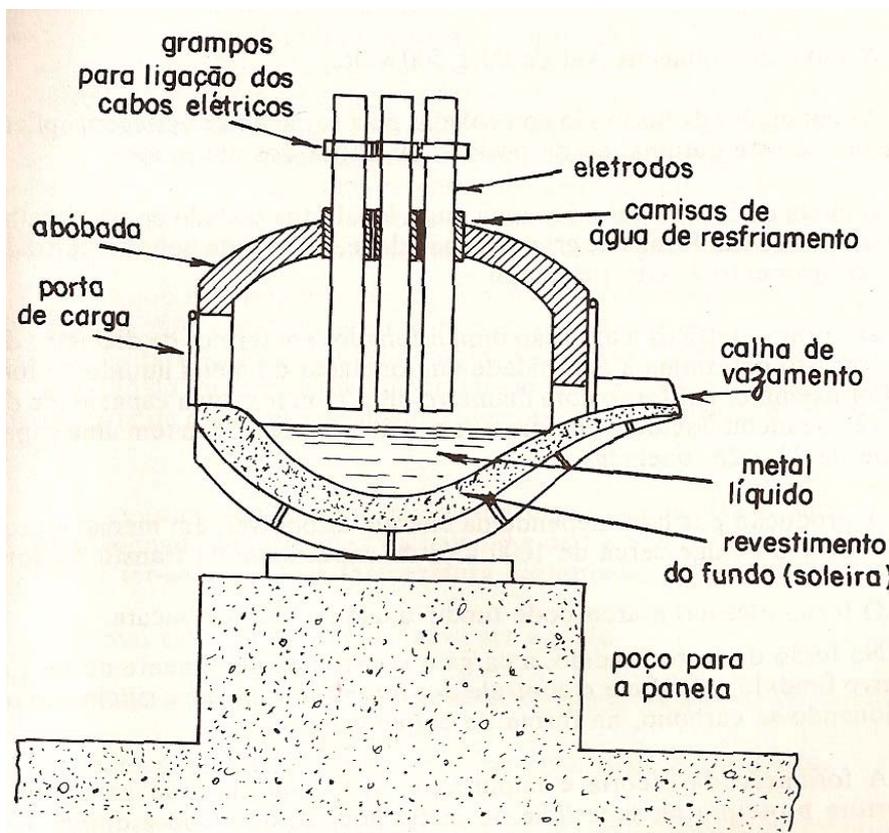
Carga: metal, combustível (carvão coque) e fundente (calcário – facilitar a separação de impurezas e formação da escória)

Carga metálica: sucata de fundição (canais, alimentadores, refugos, etc), sucata em geral, ferro-gusa de alto forno, sucata de aço, ferro-silício e ferro-manganês.

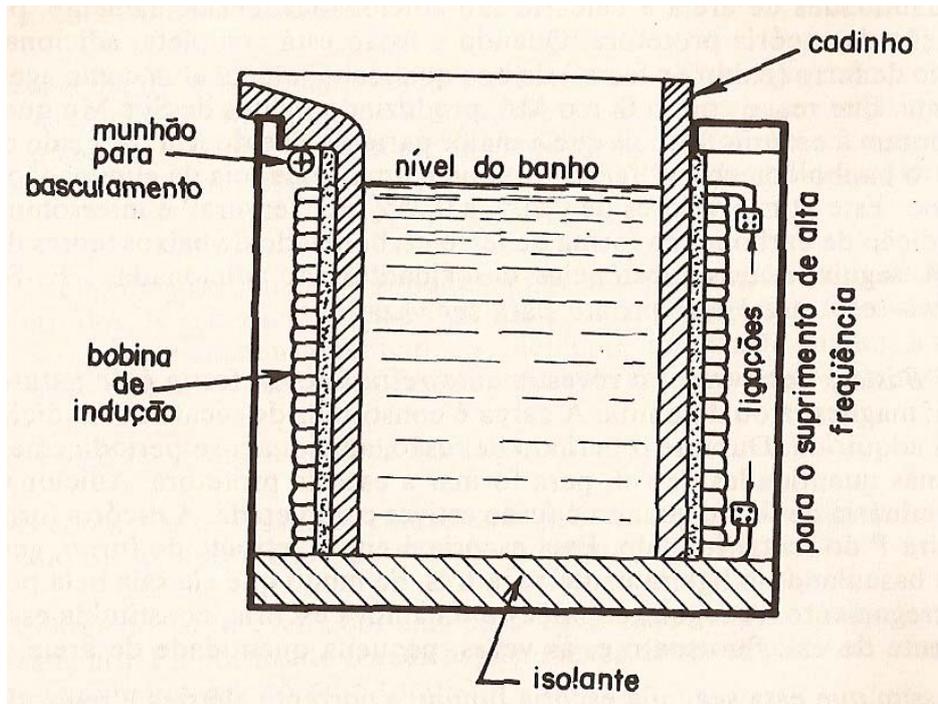
Dificuldade em controlar a composição química e propriedades mecânicas \Rightarrow necessidade de utilização de forno elétrico a arco (como na fundição de aço).

1.3.4.2 – Fusão do aço

Forno elétrico a arco \Rightarrow aquecimento é produzido por arcos que se formam entre os eletrodos (de carbono ou grafita) \Rightarrow tensões de operação de 90V a 500V \Rightarrow controle das condições de fusão através da variação de tensão elétrica ou da posição (altura) dos eletrodos.

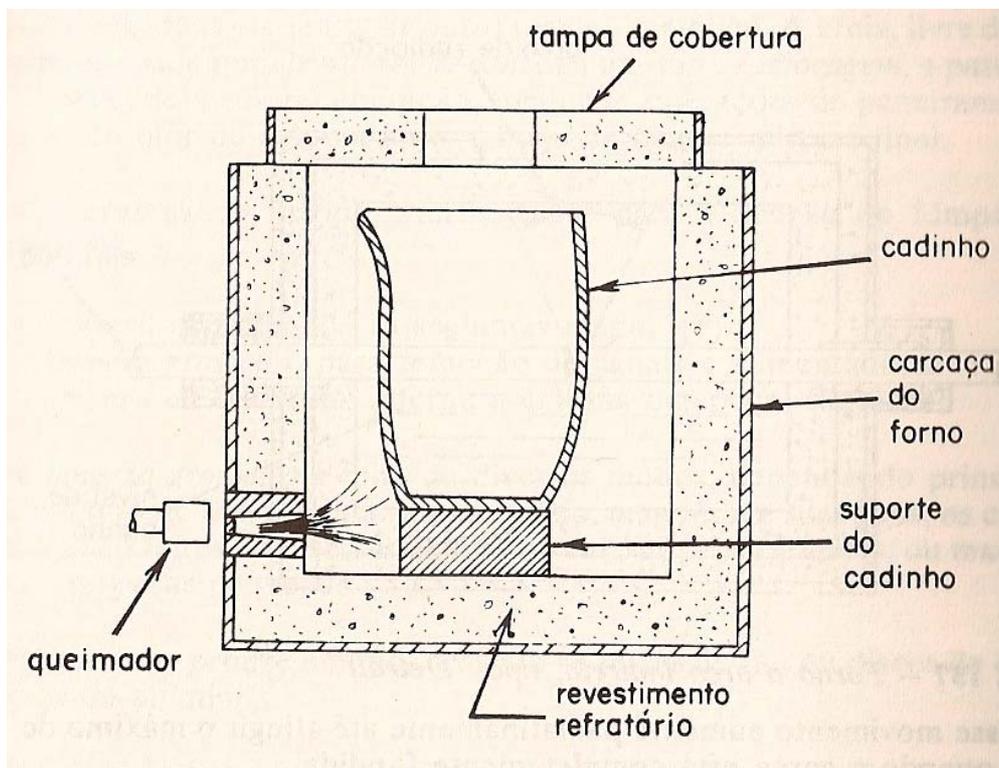


Forno de indução \Rightarrow Corrente elétrica de alta freqüência passando pelo enrolamento primário, que é constituído por uma bobina de tubos de cobre resfriados a água, colocada no interior da carcaça do forno. A carga metálica constitui o enrolamento secundário do circuito.



1.3.4.3 – Fusão de não-ferrosos

São empregados fornos elétricos (indução) e principalmente fornos de cadinho (aquecidos a óleo ou gás, por meio de um queimador).



1.3.5 – Desmoldagem, limpeza e rebarbação

Após solidificação das peças no interior dos moldes, são feitas as operações de desmoldagem, corte dos canais, limpeza e rebarbação.

Desmoldagem ⇒ separação da areia das peças solidificadas ⇒ Desmoldador em grade com movimento vibratório, onde a areia cai sobre correias transportadoras e é levada a armazéns para reaproveitamento (após separação dos resíduos metálicos).

Limpeza:

- Grosseira, para remoção dos canais e alimentadores (com serras de fita, discos de corte, maçaricos ou marteletes).
- Da superfície, através de jateamento de areia, tamboreamento.

Rebarbação ⇒ remoção de rebarbas ou outros excessos de metal na peça com o emprego de marteletes pneumáticos e esmeril.

1.3.6 – Controle da qualidade das peças fundidas

⇒ Inspeção visual

⇒ Inspeção dimensional

⇒ Inspeção metalúrgica / mecânica

- Análise composição química
- Metalografia
- Ensaio mecânicos para determinação das propriedades mecânicas
- Ensaio não-destrutivos (radiografia (raio-X), ultrassonografia, Eddy current)

1.4 – COMPARAÇÃO (resumida) DE ALGUNS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

Fator	Fundição em areia	Fundição em molde permanente	Fundição sob pressão	Fundição por centrifugação
Metal processado	Todos	Ferros fundidos e não-ferrosos	Não-ferrosos de baixo ponto de fusão	Todos
Dimensões comerciais min. máx.	As maiores	0,5 kg a cerca de 150 kg	Diminutas a 35 kg em Al, a 150 kg em Zn	Acima de 25 t
Espessura min., mm	3,2 – 4,7	3,2	0,8 – 1,6	1,6
Resist. à tração* kgf/mm ²	13	16	19,5	17,5
Ordem de produção ** (Peças por hora)	10 – 15	40 – 60	120 – 150	30 – 50
Custo do molde ou modelo***	100	660	1650	500

* Para uma liga de alumínio, como exemplo.
 ** Produção foi estimada para uma peça fundida de alumínio de cerca de 1,5 kg de peso e moderada complexidade.
 *** Tomando como base 100 para fundição em areia.

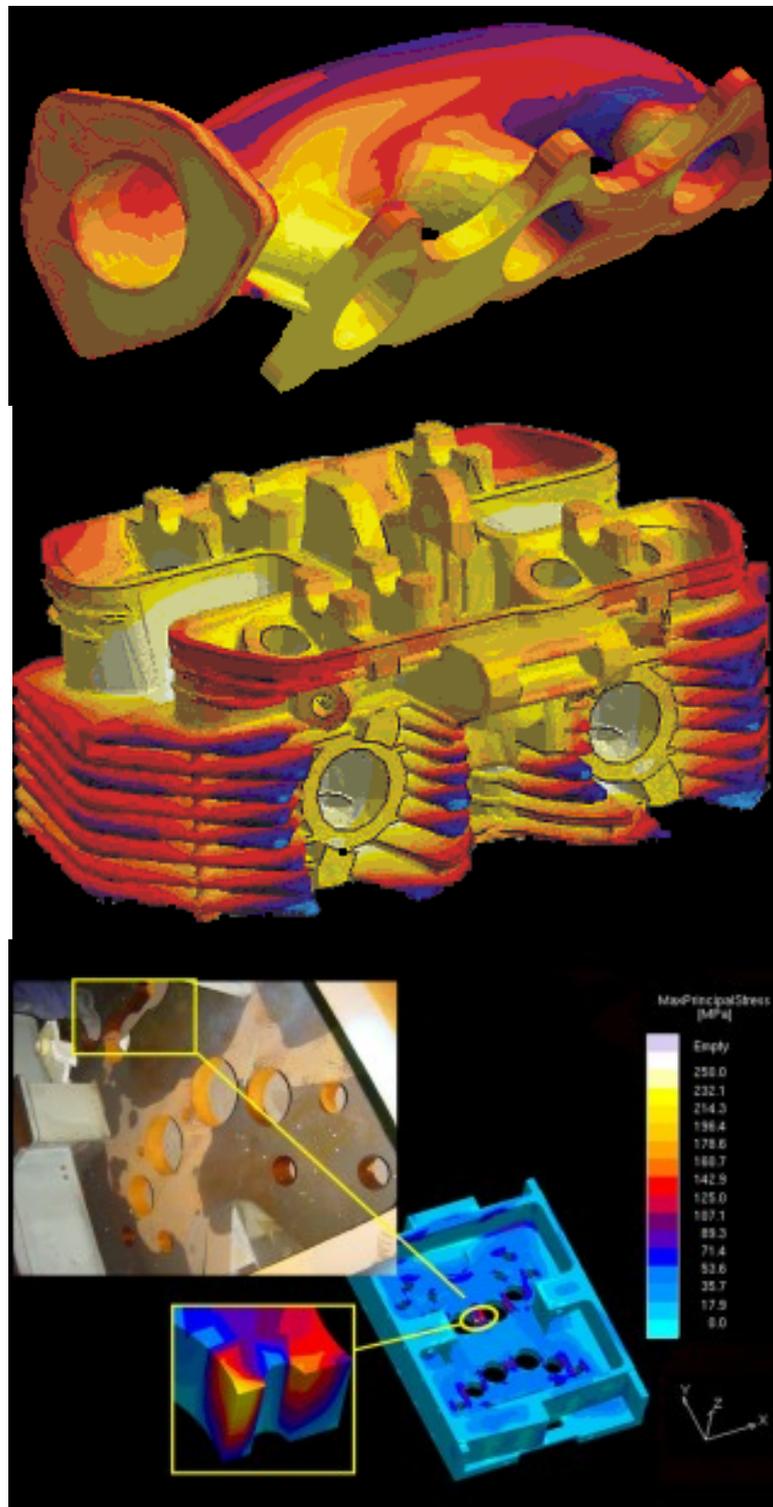
1.5 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA AOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

⇒ Programas de cálculo que:

- Auxiliam no projeto das matrizes e modelos.
- Executam análises do processo, simulando o fluxo interno do metal no molde e prevendo/corrigindo problemas de regiões com alta turbulência, dificuldades de preenchimento, etc.

- Simulam o processo de resfriamento das peças no molde, corrigindo eventuais regiões críticas.

⇒ Exemplo: www.magmaflow.com



1.6 – TABELA COMPARATIVA DOS DIVERSOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO (orientativa)

Molde não permanente não rígido (areia a verde)

PROCESSO	LIGA	PESO DA PEÇA*	CUSTO DO FUNDIDO	ACABAM SUPERF	PRECISÃO DIMENS	ESPESSURA DA PEÇA*	COMPLEXIDADE DA PEÇA	CUSTO DA FERRAM	VIDA ÚTIL DA FERRAM
Mold. manual	todas	Sem limitação	baixo	baixo	baixa	> 7 mm	Sem restrições	baixo	500 moldes
Mold. mecanizada	todas	Até 20 kg	baixo	baixo	baixa	> 7 mm	Sem restrições	baixo	5.000 moldes
Mold. em conjunto	todas	Até 200 kg	baixo	baixo	baixa	> 7 mm	Sem restrições	médio	30.000 moldes
Mold. automatizada	todas	Até 200 kg	baixo	baixo	baixa	> 7 mm	Sem restrições	médio	30.000 moldes

** em ferro fundido

Molde não permanente rígido

PROCESSO	LIGA	PESO DA PEÇA*	CUSTO DO FUNDIDO	ACABAM SUPERF	PRECISÃO DIMENS	ESPESSURA DA PEÇA*	COMPLEXIDADE DA PEÇA	CUSTO DA FERRAM	VIDA ÚTIL DA FERRAM
Resina cura a frio	todas	Sem limitação	médio	médio	médio	> 7mm	Sem restrições	baixo	500 moldes
Silicato de sódio	todas	Sem limitação	baixo	médio	médio	> 7 mm	Sem restrições	baixo	500 moldes
Shell molding	Todas	Até 20 kg	médio	Médio	médio	> 7 mm	Sem restrições	médio	10.000 moldes

** em ferro fundido

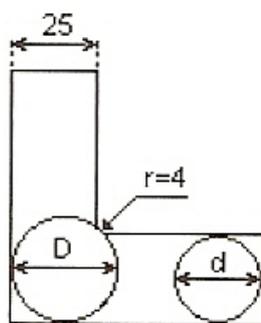
Molde permanente rígido

PROCESSO	LIGA	PESO DA PEÇA*	CUSTO DO FUNDIDO	ACABAM SUPERF	PRECISÃO DIMENS	ESPESSURA DA PEÇA*	COMPLEXIDADE DA PEÇA	CUSTO DA FERRAM	VIDA ÚTIL DA FERRAM
Coquilha p/ gravid	LNF	Até 50 kg	médio	Médio	bom	> 5 mm	Sem restrições	médio	30.000 peças
Sobre pressão (inj.)	LNF	Até 10 kg	Médio	Bom	excelente	> 3 mm	Com restrições	alto	100.000 peças
Baixa pressão	"rodas"	Até 15 kg	Médio	bom	bom	> 4 mm	Mais p/ rodas	médio	30.000 peças
Vácuo	"rodas"	Até 50 kg	médio	bom	bom	> 4 mm	Mais p/ rodas	médio	30.000 peças
centrifugação	todas	Até 3.000 kg	Baixo	baixo	médio	> 15 mm	Mais p/ tubos	alto	30.000 peças

** em alumínio

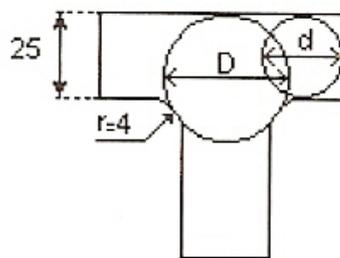
1.7 – DETALHES DO PROJETO DA PEÇA PARA EVITAR DEFEITOS DE FUNDIÇÃO SEÇÕES E TIPOS DE JUNÇÕES ENTRE PAREDES DE UMA MESMA PEÇA

Espessamento local ligado ao resto da peça por paredes mais delgadas \Rightarrow massa isolada em arrefecimento ou “ponto quente” \Rightarrow regularizar as espessuras pela aplicação da lei dos círculos inscritos ou “lei de Heuvers” (assume que a massa de metal em duas regiões diferentes é proporcional às seções destas regiões. Exemplos:



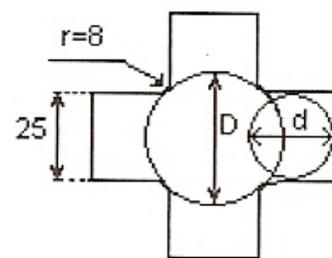
50% de aumento de massa

$$\left(\frac{D}{d}\right)^2 = \left(\frac{31}{25}\right)^2 = 1.5$$



77% de aumento de massa

$$\left(\frac{33}{25}\right)^2 = 1.7$$



190% de aumento de massa

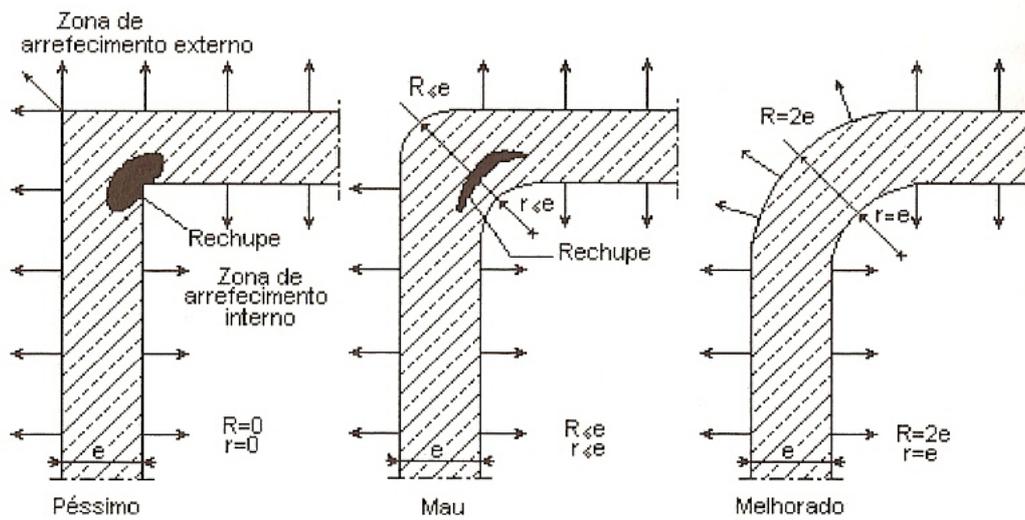
$$\left(\frac{42.5}{25}\right)^2 = 2.9$$

Se as espessuras forem regulares, o círculo inscrito deve “deslocar-se” sem que seu raio sofra variações bruscas.

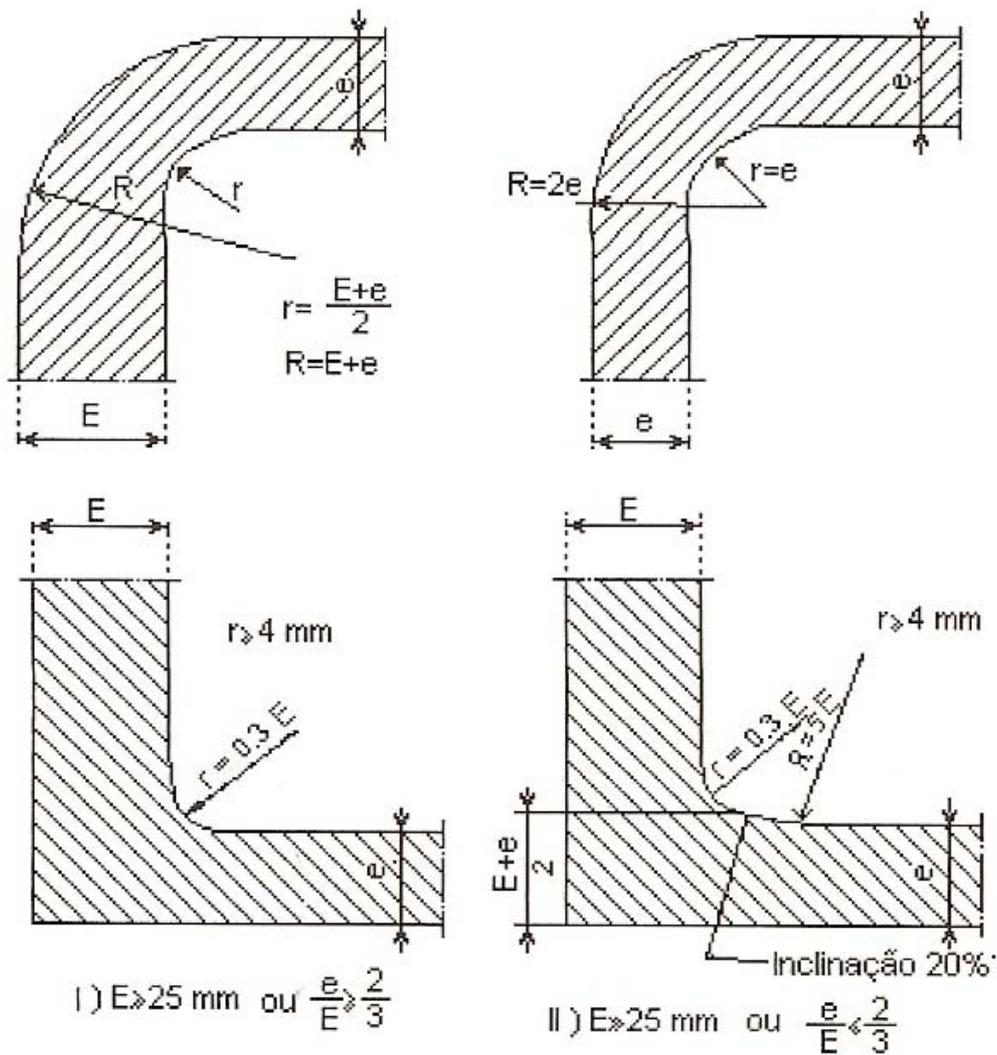
Aumento de 15% no raio do círculo entre dois pontos distanciados de 5mm \Rightarrow aumento de massa de 30% \Rightarrow OK!

Ligações entre paredes:

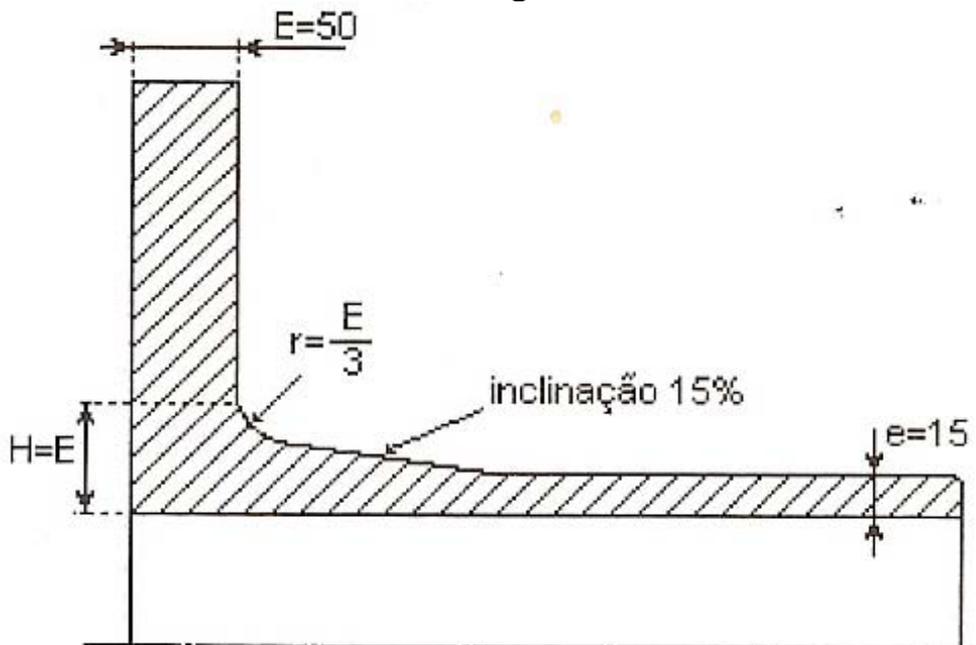
- Provocam sempre concentração de massa
- Raios de concordância grandes proporcionam velocidades de solidificação aprox. iguais
- Raios pequenos \Rightarrow parede externa arrefece mais depressa
- Canto vivo: rechupe ou trincas



- Considerar raios de concordância

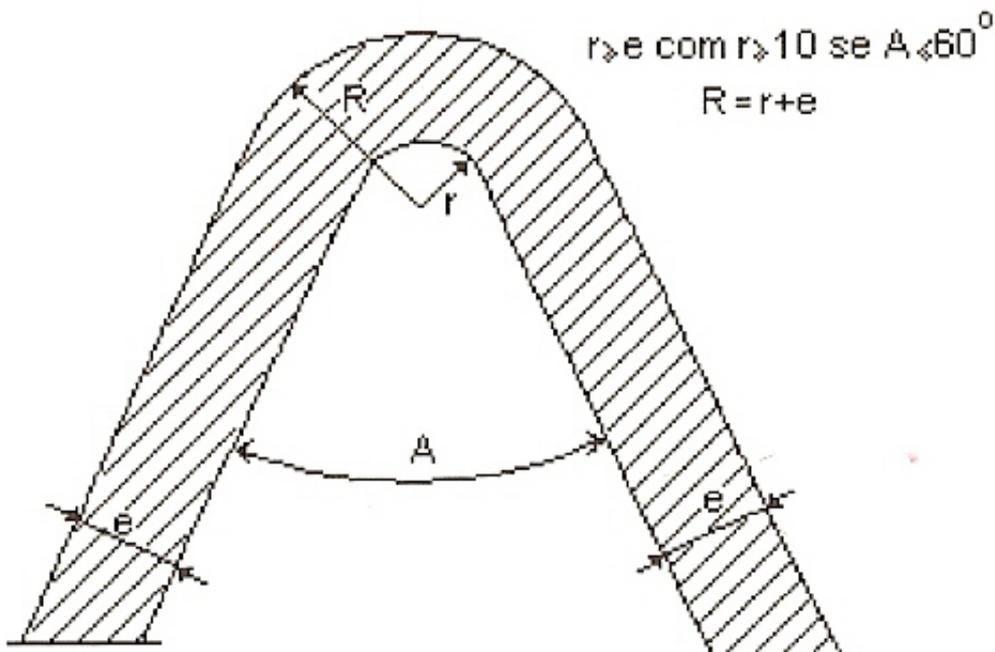


- Concordância entre flange e tubo

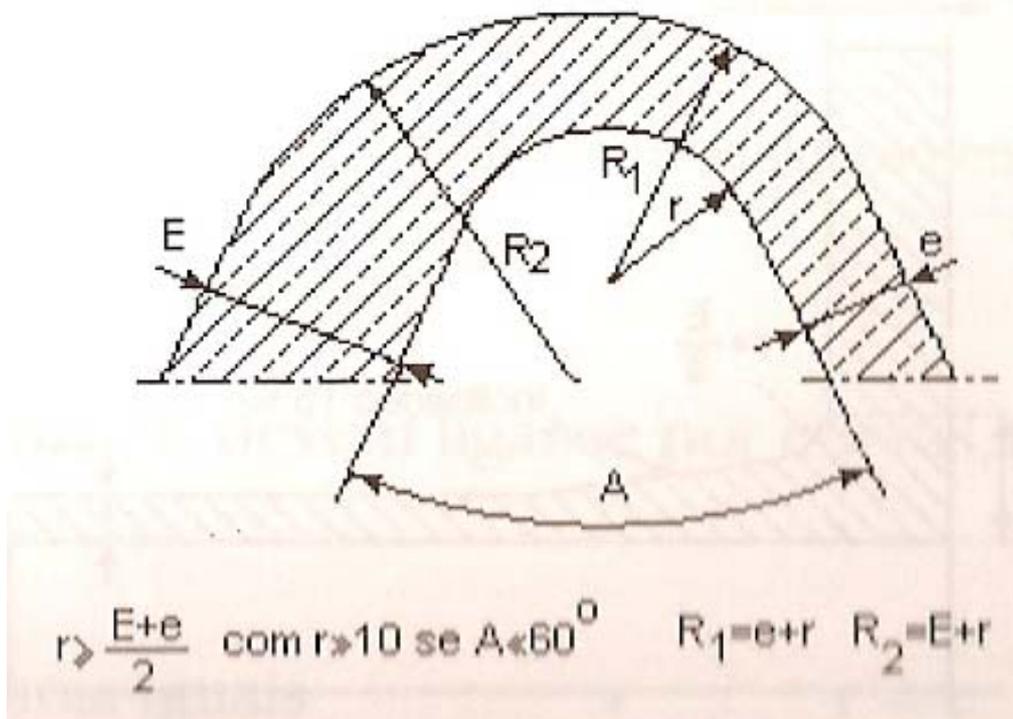


Ligações entre paredes com ângulos menores que 90°:

- Para espessuras iguais: $r \geq e$ $R=r+e$
 com $r \geq 10\text{mm}$ se o ângulo for menor que 60°
 Se as espessuras forem maiores que 40mm será $r=1.5e$ $R=r+e$

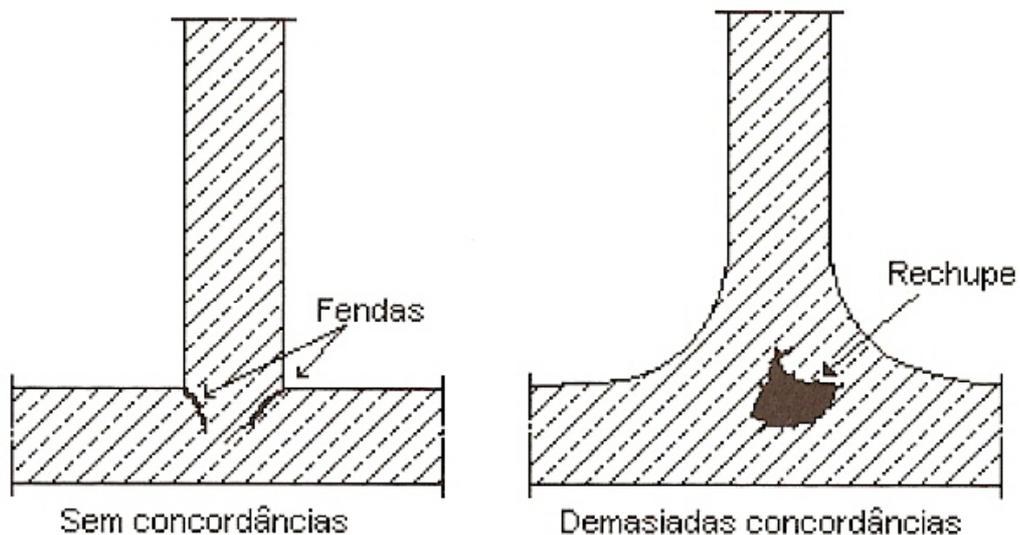


- Para espessuras diferentes:

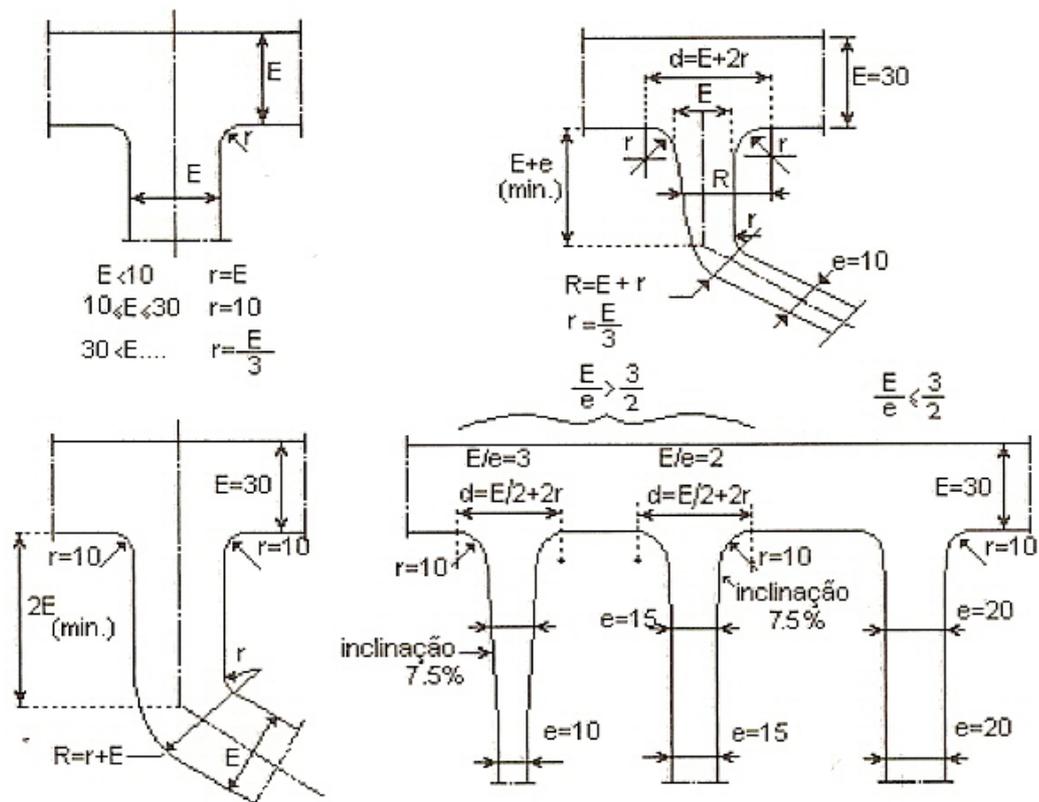


Ligações em "T"

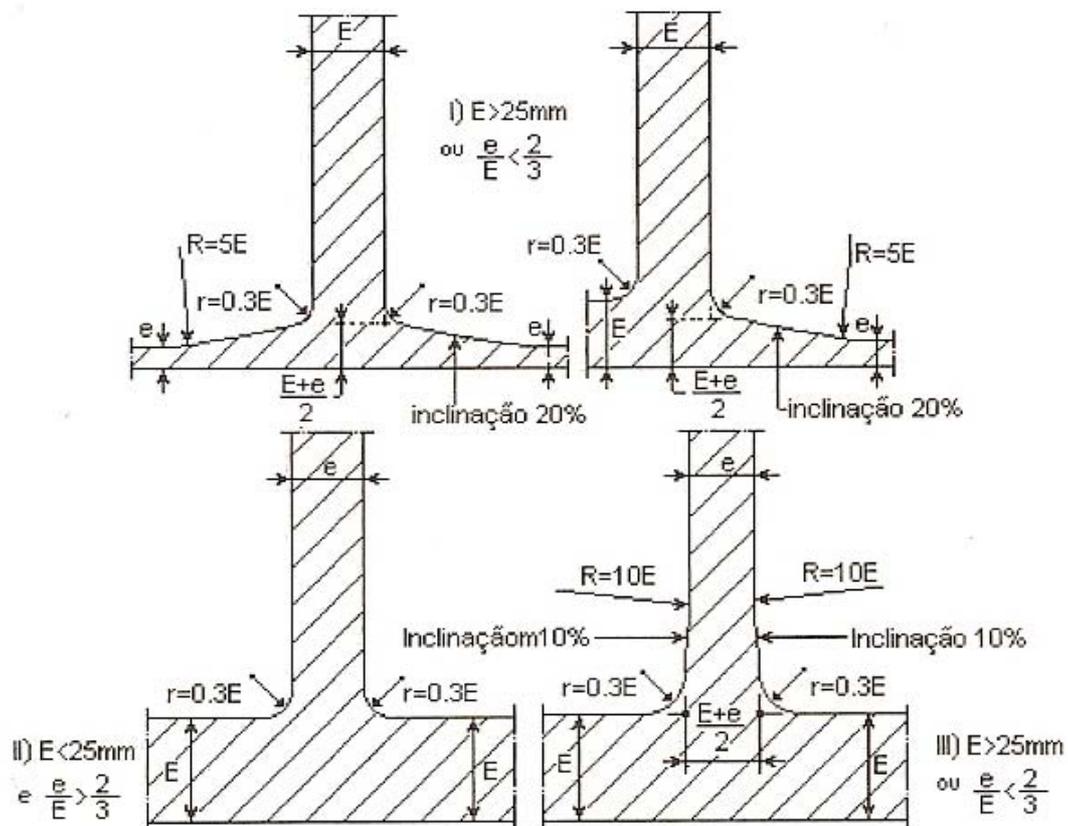
- Defeitos típicos em ligações mal dimensionadas:



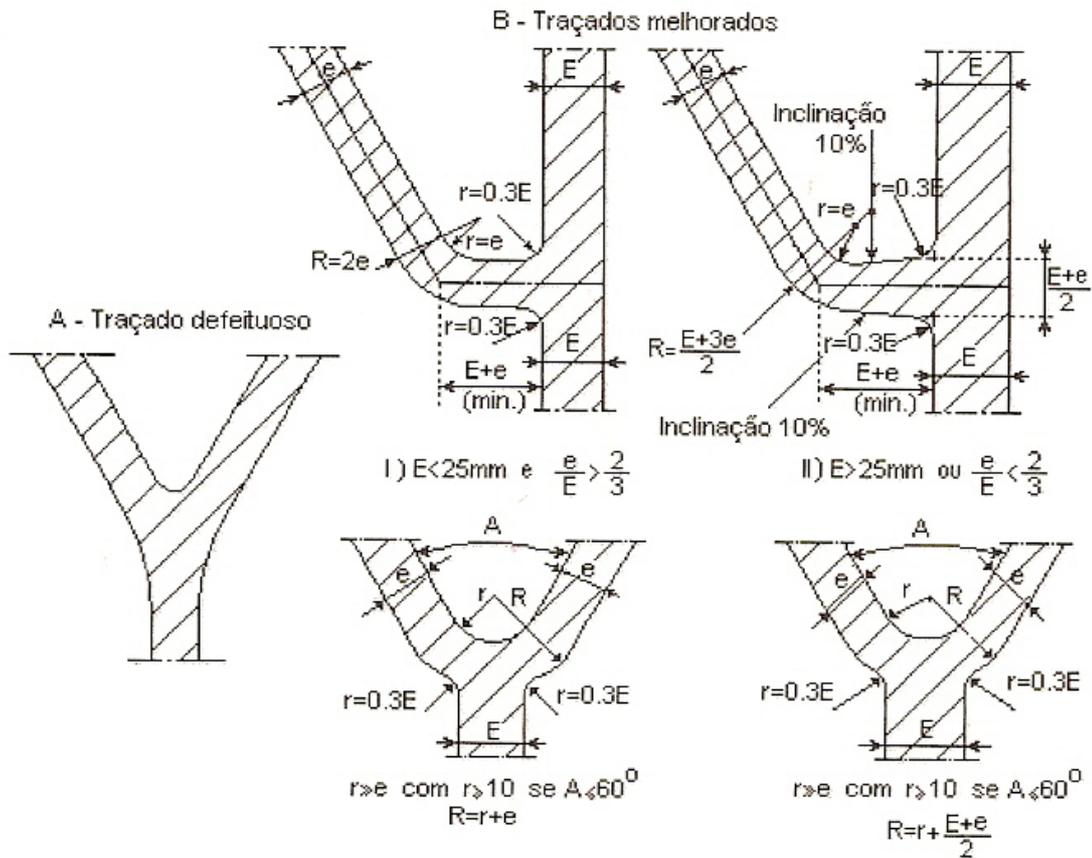
- Perfis de concordância aconselhados:



- Uniões progressivas se $E > 1,5e$

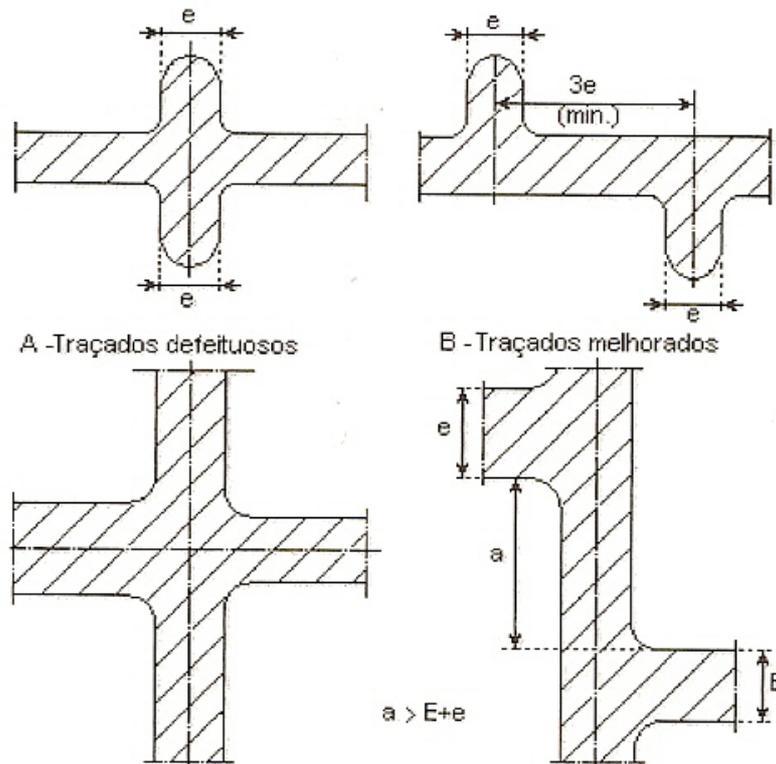


Ligações em “Y”



Ligações em “cruz” ou “+” ou “X”

- Deve-se evitar, quando possível, o cruzamento:



- Se por razões de simetria não for possível o desvio do alinhamento das paredes da peça, pode-se recorrer ao uso de machos para reduzir o volume da união e para conservação de espessuras uniformes:

