

Introdução à Manufatura Mecânica PMR 2202

Processos de Fundição e Sinterização (Metalurgia do Pó)

Profa. Izabel Machado

Índice

1. Fundição
 - 1.1. Solidificação de Metais e Ligas
 - 1.1.1 Temperatura de vazamento.
 - 1.1.2 Taxa de resfriamento.
 - 1.1.3 Fluidez
 - 1.1.4 Características do escoamento.
 - 1.1.5 Contração de solidificação.
 - 1.1.6 Transferência de calor no molde.
 - 1.1.7 Tempo de solidificação.
 - 1.2 Defeitos em peças fundidas.
 - 1.3 Processos de fundição.
 - 1.3.1 Fundição utilizando moldes de areia.
 - 1.3.2 Fundição em casca (Shell-mold).
 - 1.3.3 Fundição utilizando cera perdida.
 - 1.3.4. Fundição por centrifugação.
 - 1.3.5 Fundição a vácuo.
 - 1.3.6 Fundição utilizando moldes permanentes.
 - 1.3.7 Fundição sob pressão.
 - 1.3.8 Fundição contínua.
 - 1.3.9 Outros processos.
 2. Metalurgia do Pó (Sinterização).

1. Fundição

Fundição é um processo de fabricação onde um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado em um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida. A peça produzida por fundição pode ter as formas e dimensões definitivas ou não. Em muitos casos após a fundição, a peça é usinada para serem feitos ajustes dimensionais ou mesmo conformada mecanicamente (por exemplo, ser forjada), para que as formas e dimensões finais sejam obtidas. A **figura 1** ilustra o processo de vazamento de metal no estado líquido em um molde.



Figura 1. Processo de fundição. Vazamento de metal líquido em molde.

Em muitos casos os processos de fundição apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de processos de fabricação, como no caso da produção de peças complexas e com cavidade internas, como pode ser observado na **figura 2**, ou na produção de peças muito grandes. Por outro lado, as propriedades mecânicas de peças fundidas geralmente são inferiores às propriedades de peças conformadas mecanicamente. Além disso, durante o processo de solidificação pode haver formação de porosidade.

Os fatores que devem ser considerado para se escolher adequadamente o processo de fabricação são: 1. Quantidade de peças a produzir. 2. Projeto da fundição. 3. Tolerâncias requeridas. 4. Grau de complexidade. 5. Especificação do metal. 6. Acabamento superficial desejado. 7. Custo do ferramental. 8. Comparativo econômico entre usinagem e fundição. 9 Limites financeiros do custo de capital. 10 Requisitos de entrega.



Figura 2. Peças produzidas por fundição.

O material com o qual vai ser produzida a peça no processo de fundição parte do estado líquido. Logo aspectos relacionados com a solidificação de metais e ligas devem ser considerados. Esses aspectos são relacionados no próximos item.

1.1. Solidificação de Metais e Ligas

O processo de fundição envolve: 1. Fusão do metal ou liga. 2. Vazamento em um molde. 3. Solidificação da peça. 4. Remoção do metal ou liga solidificado do molde. Algumas considerações importantes devem ser feitas com respeito ao escoamento do metal líquido na cavidade do molde, o qual é influenciado pela temperatura de vazamento; taxa de resfriamento; fluidez; existência de turbulência; contração de solidificação; transferência de calor no molde; características do lingote (ou molde); que dependem do processo de fundição (item 1.3). A **figura 3** ilustra a solidificação de um metal junto à parede do molde. A **figura 4** ilustra os tipos estruturas de grãos que podem ser formar durante a solidificação de lingotes. Normalmente a estrutura de solidificação é dendrítica.

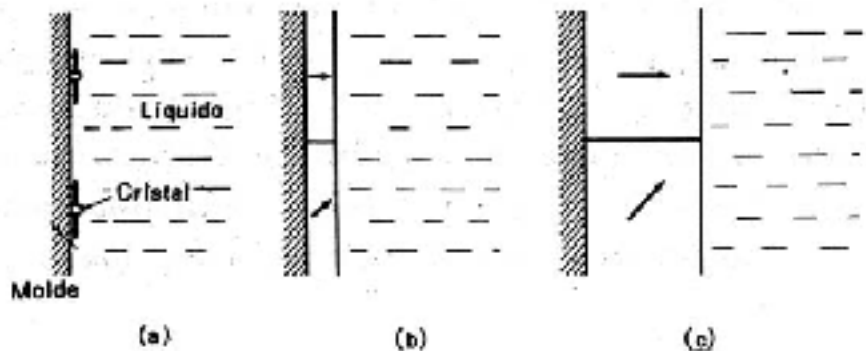


Figura 3. Solidificação de metal junto à parede do molde e interface sólido líquido.

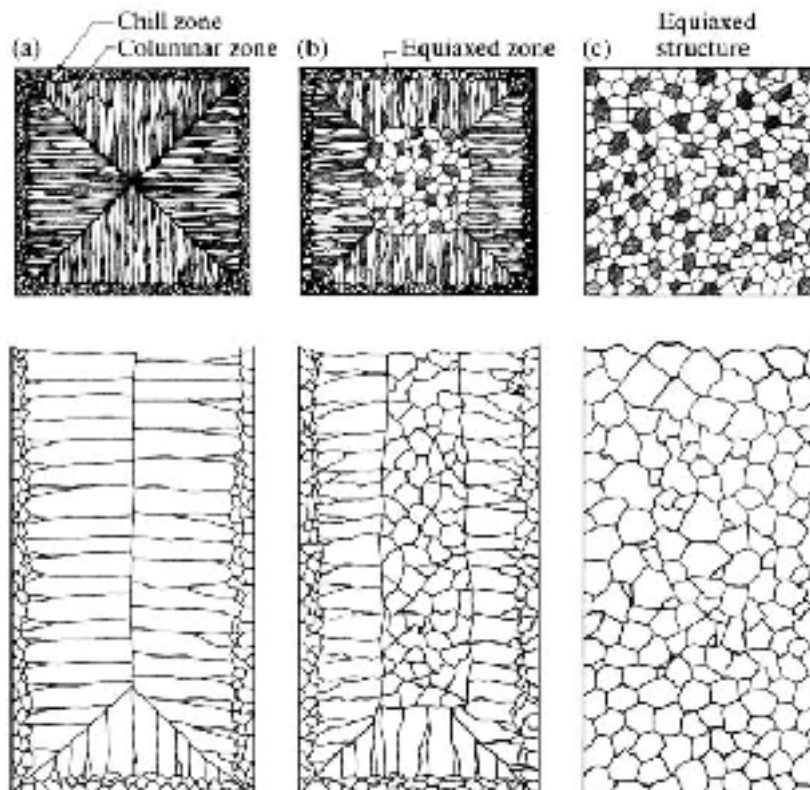
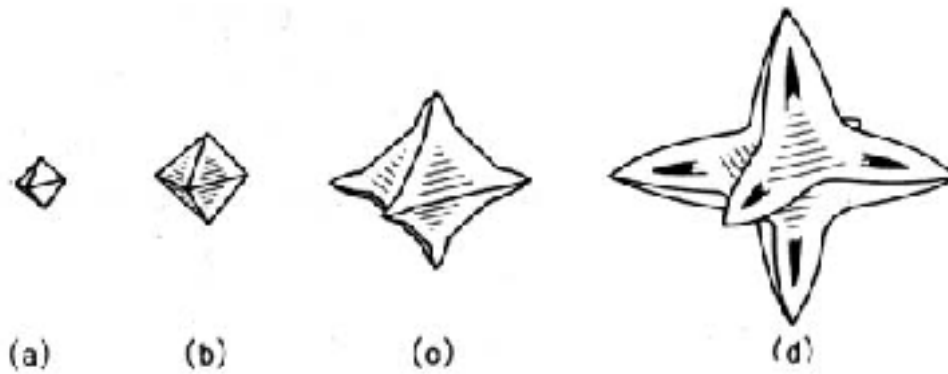
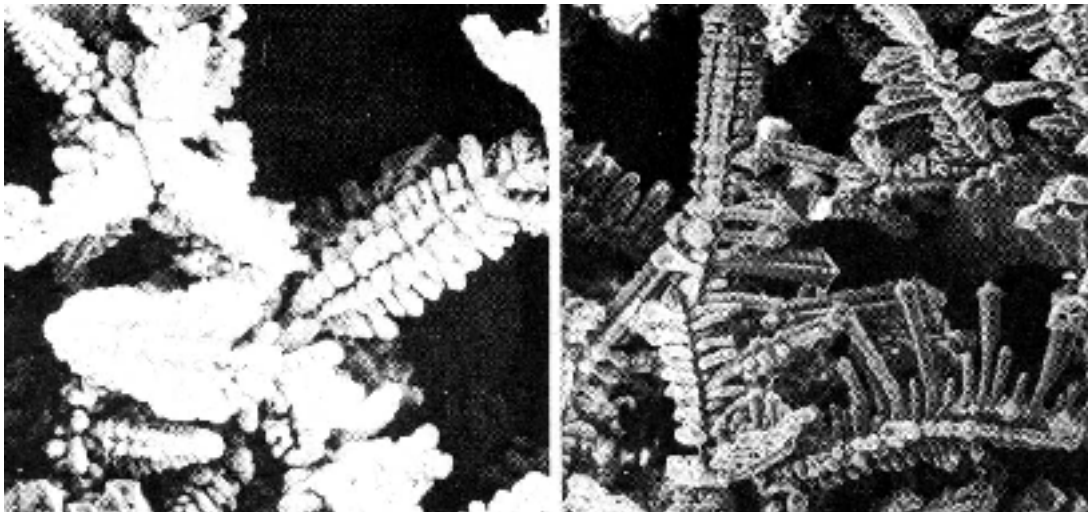


Figura 4. Ilustração esquemática da solidificação de lingotes.(a) metais puros, (b) soluções sólidas e (c) adição de inoculantes.

A estrutura típica de um material fundido é a presença de dendritas, que são ilustradas na **figura 5**.



Crescimento da dendrita a partir de (a).



Dendritas de um lingote de aço (estrutura real).

Figura 5. Estrutura dendrítica. Ilustração esquemática e real.

1.1.1 Temperatura de vazamento.

Um metal apresenta uma temperatura de fusão bem definida, isto é, ele inicia e termina o processo de solidificação em uma temperatura bem determinada. Já as ligas apresentam uma temperatura onde se inicia o processo de solidificação e uma temperatura onde termina esse processo. Isso é ilustrado na **figura 6** para o sistema cobre-níquel. Dentro da faixa de temperaturas em que ocorre a solidificação para uma liga existe sempre uma mistura de sólido e líquido. A temperatura de vazamento deve ser estar sempre acima da temperatura onde existem 100% de líquido (superaquecimento). O vazamento, no caso de ligas, dentro de uma faixa de temperaturas onde se tem sólido e líquido prejudica o preenchimento completo do molde.

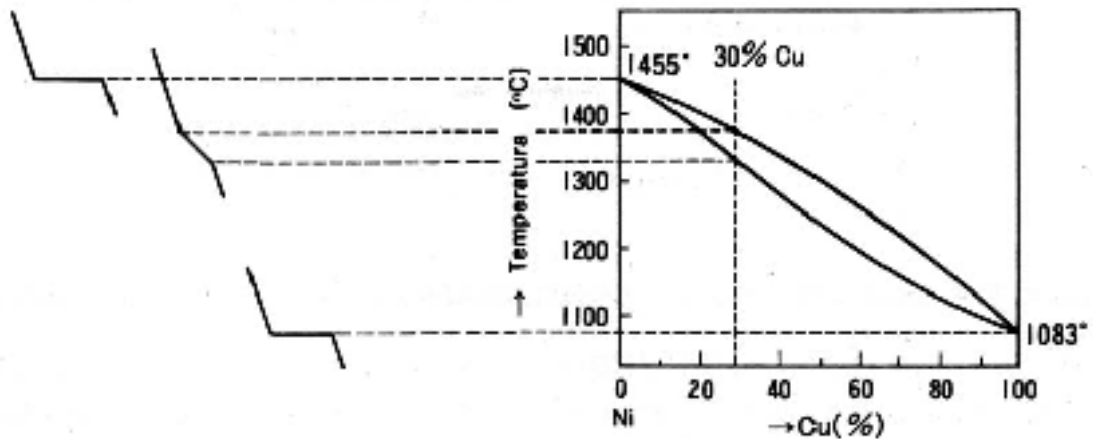


Figura 6. Curvas de resfriamento ideais para o sistema Cu-Ni.

1.1.2 Taxa de resfriamento.

A taxa de resfriamento tem efeito no desenvolvimento da estrutura do fundido, como mostra a figura 7. O critério que descreve a cinética da interface sólido-líquido é dado por G/R , onde G é o gradiente térmico e R é a taxa que a interface sólido-líquido se movimenta. Valores típicos de G são 10^2 a 10^3 K/m e para R valores que vão de 10^{-4} a 10^{-3} m/s. Estruturas dendríticas apresentam valores de G/R entre 10^5 e 10^7 . Já para as frentes planas de solidificação, estes valores estão entre 10^{10} e 10^{12} .

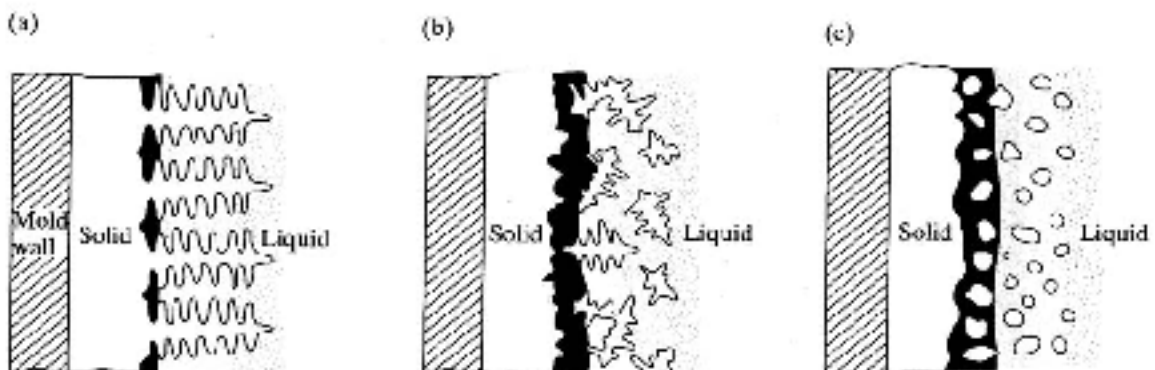


Figura 7. Ilustração esquemática de frentes de solidificação (a) dendrítica colunar, (b) dendrítica equiaxial e (c) equiaxial.

1.1.3 Fluidez

A capacidade de o metal líquido preencher as cavidades do molde é chamada de fluidez. A fluidez depende de características do metal e de parâmetros utilizados na fundição. No que se refere ao metal, a fluidez depende da viscosidade, tensão superficial, inclusões e padrão de solidificação da liga. No que se refere aos parâmetros de fundição, a fluidez depende do projeto do molde, material do molde e de seu acabamento superficial, grau de superaquecimento, taxa de vazamento e transferência de calor. A figura 8 ilustra dispositivo para teste de fluidez.

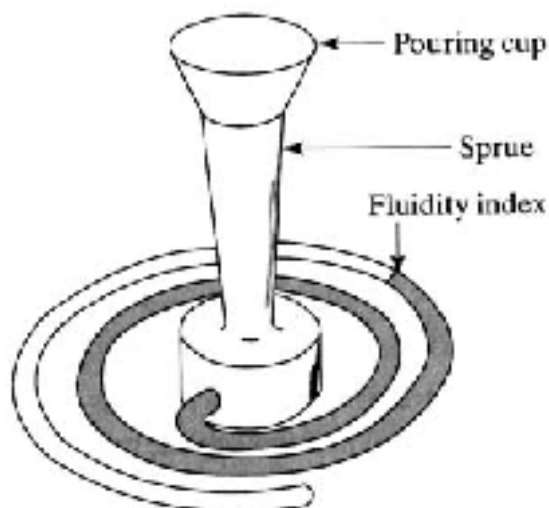


Figura 8. Teste de fluidez. A fluidez é medida pela distância que o metal percorre antes de se solidificar.

1.1.4 Características do escoamento.

A **figura 9** ilustra o sistema por onde o metal líquido flui durante o processo de fundição.

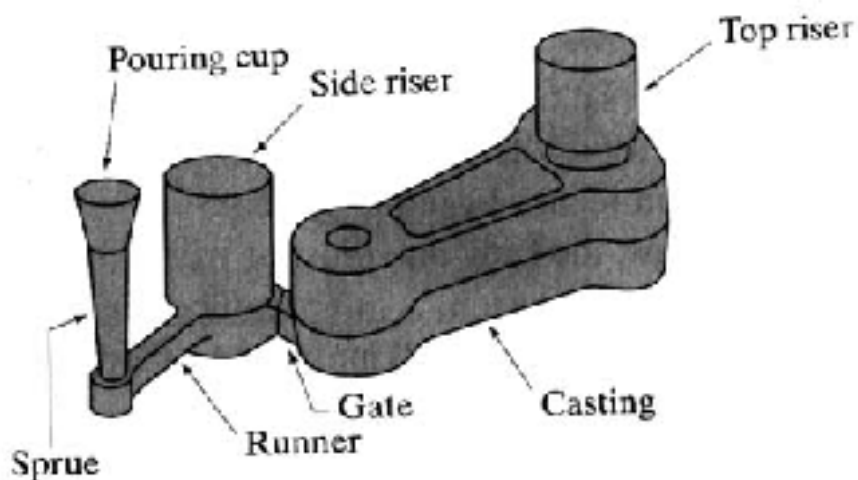


Figura 9. Funil de vazamento (pouring cup), massalote ou alimentador (riser), canal de alimentação (runner), canal de descida (sprue), canal de entrada (gate), fundido (casting).

O escoamento de metais e ligas líquidos superaquecidos é semelhante entre si e semelhante ao da água. É importante que o sistema de canais seja projetado de forma a reduzir a turbulência. Isso pode ser quantificado pelo número de Reynolds ($Re = v \cdot d / \nu$ onde v é a velocidade do fluxo, d é o diâmetro hidráulico do canal e ν é a viscosidade cinemática do líquido, que é dada pela viscosidade dinâmica dividida pela densidade do líquido. O valor de d é dado por $\frac{4 \times \text{área da seção transversal do canal}}{\text{perímetro da seção transversal}}$). Para Re até aproximadamente 2000 o fluxo é laminar. Para valores de Re entre 2000 e 20000 o fluxo apresenta uma mistura entre laminar e turbulento e acima

de 20000, o fluxo é severamente turbulento. Para a maioria dos casos reais o fluxo se aproxima do turbulento. Isso permite que ocorram mais reações do metal líquido com formação de gases, o que não é bom, pois pode haver formação de bolhas. Essas bolhas de gás podem ficar presas e constituírem defeitos nas peças fundidas.

1.1.5 Contração de solidificação.

A maioria dos metais comercialmente utilizados apresenta contração durante o processo de solidificação. Isso deve ser levado em conta na fabricação do molde, o que será discutido posteriormente. Para compensar essa contração existe no projeto do molde a adição de um recipiente para o metal líquido chamado de massalote. Esse massalote é a última parte a se solidificar e concentra a contração de solidificação. O massalote é retirado da peça após a solidificação e desmoldagem, sendo sucateado. A **figura 10** ilustra o fenômeno de contração. A **tabela 1** apresenta algumas variações de volume durante a solidificação.

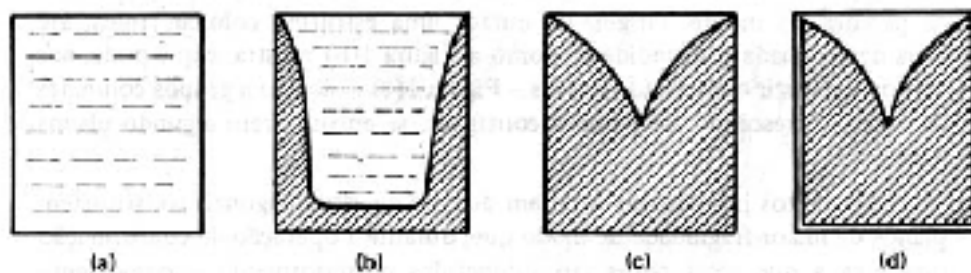


Figura 10. Ilustração esquemática do fenômeno de contração durante a solidificação.

Tabela 1. Variação de volume durante a solidificação. A maioria dos materiais metálicos apresenta redução de volume (-), mas ou apresentam expansão (+).

Metal	Variação de volume
Alumínio	-6,0
Zinco	-5,1
Ouro	-4,2
Cobre	-4,15
Magnésio	-4,1
Cádmio	-4,0
Ferro	-3,0
Estanho	-2,3
Antimônio	+0,95
Gálio	+3,2
Bismuto	+3,35
Germânio	+5,0

1.1.6 Transferência de calor no molde.

Fatores como fluidez e taxa de resfriamento dependem da temperatura e portanto também da transferência de calor do molde. A **figura 11** ilustra a distribuição de temperatura na interface da parede do molde durante a solidificação.

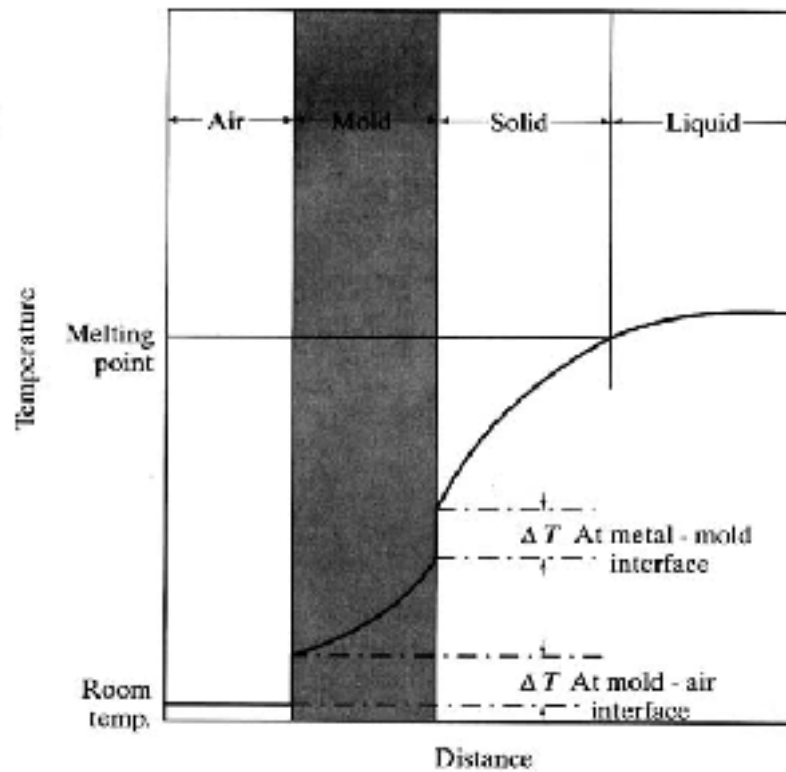


Figura 11. Distribuição de temperatura na interface da parede do molde durante a solidificação.

1.1.7 Tempo de solidificação.

O tempo de solidificação da peça no molde é função do volume do fundido e da sua área superficial e é dado por:

Tempo de solidificação = $C \left(\frac{\text{volume}}{\text{área superficial}} \right)^2$, onde C é uma constante que depende do molde, das propriedades do metal e da temperatura.

1.2 Defeitos em peças fundidas.

Existem vários defeitos ou mesmo efeitos indesejáveis que podem ocorrer em peças fundidas. Dentre eles estão:

1. Crescimento dendrítico. Formação de dendritas (observadas na **figura 5**) que se encontram em planos diagonais, como ilustra a **figura 12**. Essas diagonais formam planos de maior fragilidade, podendo aparecer fissuras ou trincas durante processos posteriores de conformação plástica.

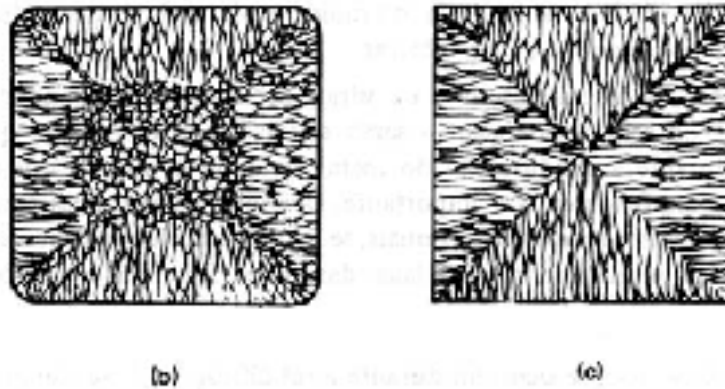


Figura 12. Dendritas se encontram em planos diagonais do lingote. (b) Aspectos típicos da seção de um lingote. (c) Crescimento dendrítico ocorrendo de forma as dendritas se encontrarem em planos diagonais.

2. Ocorrência de contração de volume. Formação de rechupe (vazio ou chupagem). A ocorrência de rechupe é ilustrada na **figura 13**. Essa região deve ser retirada da peça, em peças fundidas essa é a região do massalote ou alimentador.

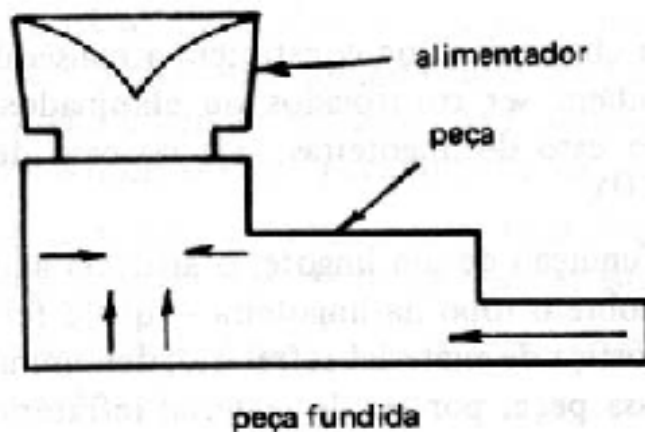


Figura 13. Ocorrência de rechupe. Alimentador é o mesmo que massalote.

A contração durante a solidificação pode causar o aparecimento de tensões residuais, que são causadas por deformações plásticas não homogêneas, e trincas a quente, como ilustra a **figura 14**. A contração de solidificação também ocorre junto as dendritas causando a ocorrência de micro-rechupes.

3. Não preenchimento completo do molde. O não preenchimento completo do molde ocasiona defeitos na peça. Isto pode ser causado por temperaturas de vazamento baixas.

4. Concentração de impurezas em algumas regiões. Isto pode ocorrer devido à segregação durante o processo de solidificação. Em ligas, os elementos com mais baixo ponto de fusão se concentram no líquido, sendo assim, a última região a solidificar a mais rica nesses elementos. A **figura 15** ilustra segregação em peças forjadas.

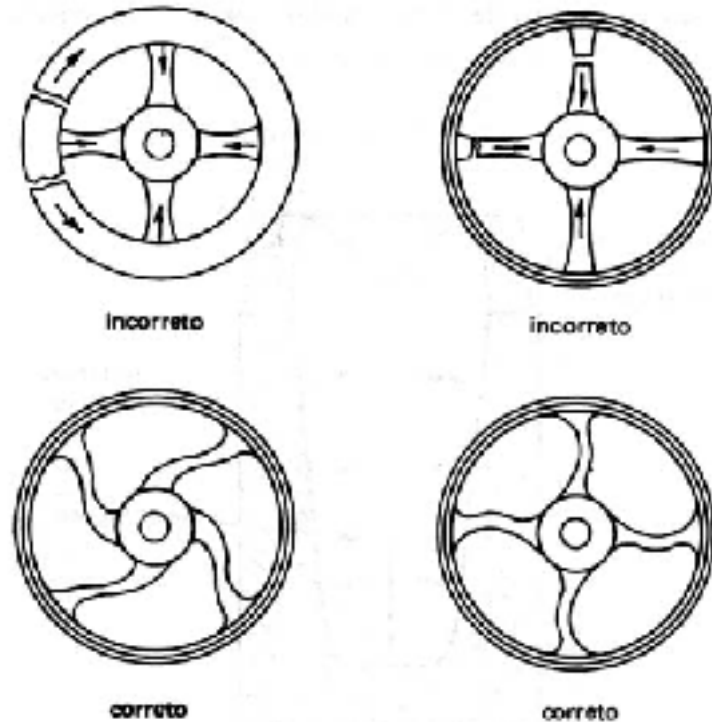


Figura 14. Ocorrência de trincas a quente.

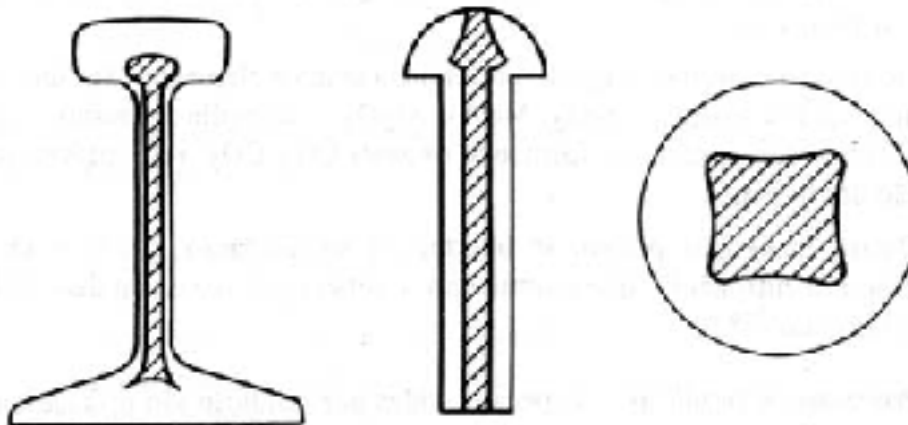


Figura 15. Segregação em peças laminadas e forjadas.

5. Gases que são formados durante o processo de fundição podem formar bolhas tanto na superfície quanto no interior das peças. No interior das peças a porosidade formada pelos gases se diferencia dos microrechupes por apresentar formas mais arredondadas.

6. Presença de inclusões, que são não metálicos como SiO_2 e MnO , causam diminuição das propriedades mecânicas das peças fundidas e podem comprometer os lingotes em processos posteriores de deformação plástica.

1.3 Processos de fundição.

Os processos de fundição podem produzir peças já em sua forma e acabamento definitivos ou constituir o processo inicial de peças que serão posteriormente conformadas e/ou usinadas. A

fundição permite a fabricação de peças com formas bastante complexas e sem limitação de dimensões. Existe uma série de processos de fundição dentre eles: fundição por gravidade, sob pressão, por centrifugação, de precisão. Devem ser consideradas as seguintes etapas dentro dos processos de fundição, independentemente do processo adotado: desenho da peça, projeto do modelo, confecção do modelo, fusão do metal, vazamento no molde, limpeza e rebarbação e controle de qualidade. O projeto de uma peça a ser fundida deve levar em conta os fenômenos que ocorrem durante a solidificação tal como contração de solidificação, estrutura dendrítica, tensões de resfriamento e espessura das paredes (paredes muito finas não são preenchidas pelo metal líquido no molde).

A **figura 16** ilustra moldes e a **figura 17** ilustra modelos para fundição, os quais são utilizados em processos de fundição onde não são utilizados moldes permanentes (ou perdidos). Os moldes podem ser feitos utilizando-se areia (não permanentes) ou mesmo ligas metálicas (permanentes). Os modelos são utilizados para dar a forma do fundido, quando são utilizados moldes não permanentes. Esses modelos podem ser feitos de madeira, de plástico ou de metal. A seleção do material do modelo depende do tamanho, forma, tolerâncias e quantidade de peças a serem produzidas. Os modelos devem ser facilmente retirados dos moldes e devem ser de tamanho que compense as contrações térmicas decorrentes da solidificação. Deve-se também deixar um sobremetal para posterior usinagem, quando for o caso. A **figura 18** apresenta esquematicamente um modelo utilizado em processos de fundição.



Figura 16. Moldes não-metálico e metálico (coquilha).

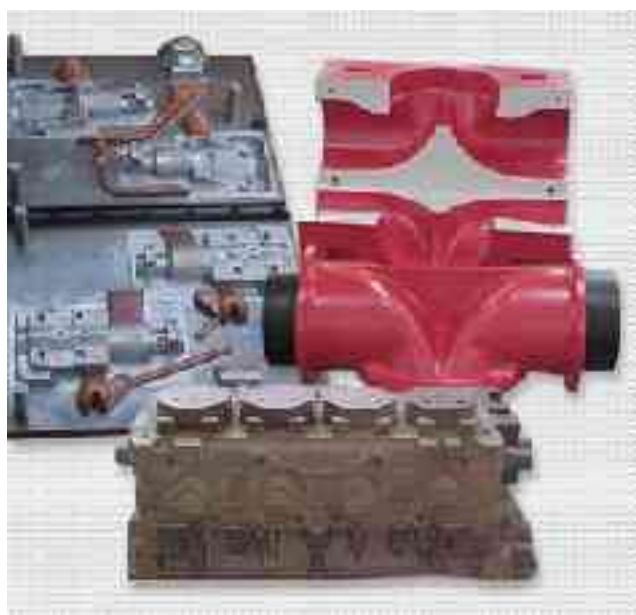


Figura 17. Modelos para fundição

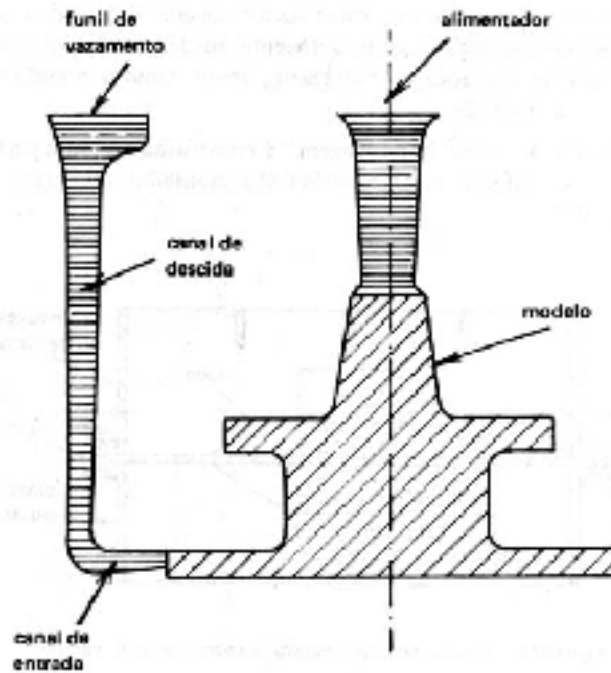


Figura 18. Representação esquemática de modelo e os respectivos canais.

Outros componentes importantes em fundição são os machos. Os machos são utilizados para preencher cavidades ou passagens da peça. O macho é colocado no molde antes do vazamento do metal líquido. Os machos, como os moldes, devem apresentar certa resistência, permeabilidade e devem ser quebradiços para poderem ser retirados com facilidade. Para se obter essas características, os machos são confeccionados a base de areia e aglomerados. A **figura 19** ilustra esquematicamente a função de um macho em fundição. Os machos são normalmente secos em estufa em temperaturas entre 150 e 250°C.

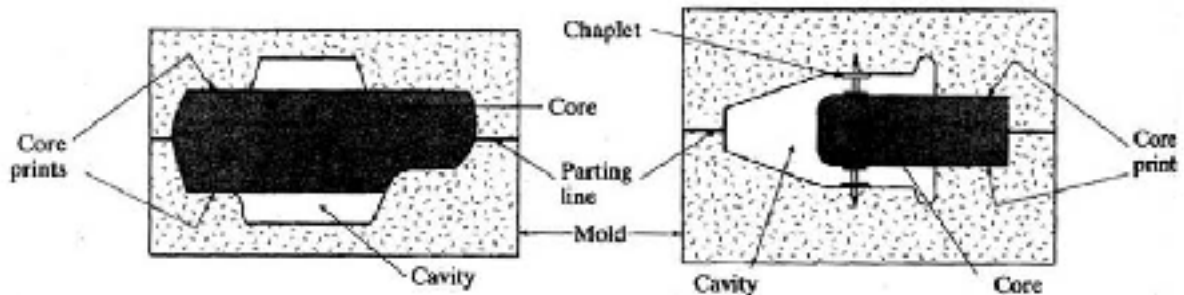


Figura 19. Ilustração esquemática de machos (cores).

Os processos de fundição podem ser divididos, de uma forma bastante geral, em processos em que são utilizados moldes permanentes e moldes não permanentes. Os moldes não permanentes, ou moldes perdidos ou ainda temporários, são os moldes feitos de areia ou cerâmica. A fundição utilizando moldes de areia é apresentada na seqüência.

1.3.1 Fundição utilizando moldes de areia.

O método mais tradicional utilizado em fundição é o de moldes de areia. Este processo consiste em assentar o modelo na areia, de forma a se obter a forma da peça a ser fundida no molde. Essa areia é disposta em caixas utilizadas em fundição, como mostra a **figura 20**. No molde em

areia são também colocados os machos. Após a solidificação do metal ou liga no estado líquido vazado, o molde e os machos são quebrados. São também cortados os massalotes e canais de alimentação e feita a rebarbação. Esses processos são ilustrados nas **figuras 21 e 22**.

Moldadoras Pneumáticas Capacidade 180 Moldes/dia

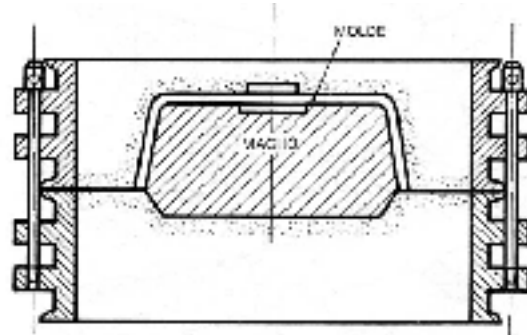


Figura 20. Caixas utilizadas em fundição.

A moldagem em areia pode utilizar dois tipos de areia: a areia comum ou a areia sintética. Dentre as areias comuns está a areia verde. A areia verde é composta essencialmente de areia silicosa, de argila e de água. A areia sintética tem a seguinte composição em porcentagem em peso: 80% de areia, 16% de argila e 4% de água. As areias de fundição são preparadas em misturadores, onde inicialmente são adicionados os componentes secos e posteriormente a água até a total homogeneização da mistura. Essa areia é colocada ou montada sobre o modelo, colocado na caixa de moldar. A **figura 23** ilustra a adição de areia na caixa de modelar. Na areia para confecção de machos são também adicionados aglomerantes como silicato de sódio, cimento, resinas etc. A **figura 24** ilustra a fundição utilizando areia verde. A areia utilizada nos processos de fundição é reaproveitada. Após a fundição a areia passa por um peneiramento e em seguida é levada novamente para o misturador.

Quando se deseja melhor acabamento e estabilidade dimensional pode ser utilizada areia seca. Essa areia contém aditivos orgânicos para melhorar suas propriedades. Os moldes são secos em estufas em temperaturas que variam de 150 a 300°C. Para peças médias e grandes, a moldagem em areia e cimento pode ser a mais adequada. Sua composição em porcentagem em peso é de 90% de areia silicosa, 10% de cimento portland e 8% de água.

Outro processo de fundição que utiliza areia é o processo com CO₂. Esse processo consiste na passagem de CO₂ pela areia compactada e aglomerada com silicato de sódio. O CO₂ reage com o silicato formando sílica gel, carbonato de sódio e água. Essa reação propicia endurecimento do molde em tempo relativamente curto.

Existe ainda outro processo que utiliza moldes perdidos é o processo de moldagem plena. Nesse processo são utilizados como modelos espuma de poliestireno. A espuma de poliestireno pode ser facilmente cortada e podem ser obtidos com facilidade modelos bastante complexos. A moldagem é conduzida do mesmo modo que no processo de fundição em areia, mas o modelo não é retirado, pois durante o vazamento o poliestireno vaporiza, sendo substituído pelo metal. Existem grandes vantagens na confecção de peças. Embora a grande quantidade de gás gerado leva a um acabamento superficial ruim. A **figura 25** ilustra esse processo.

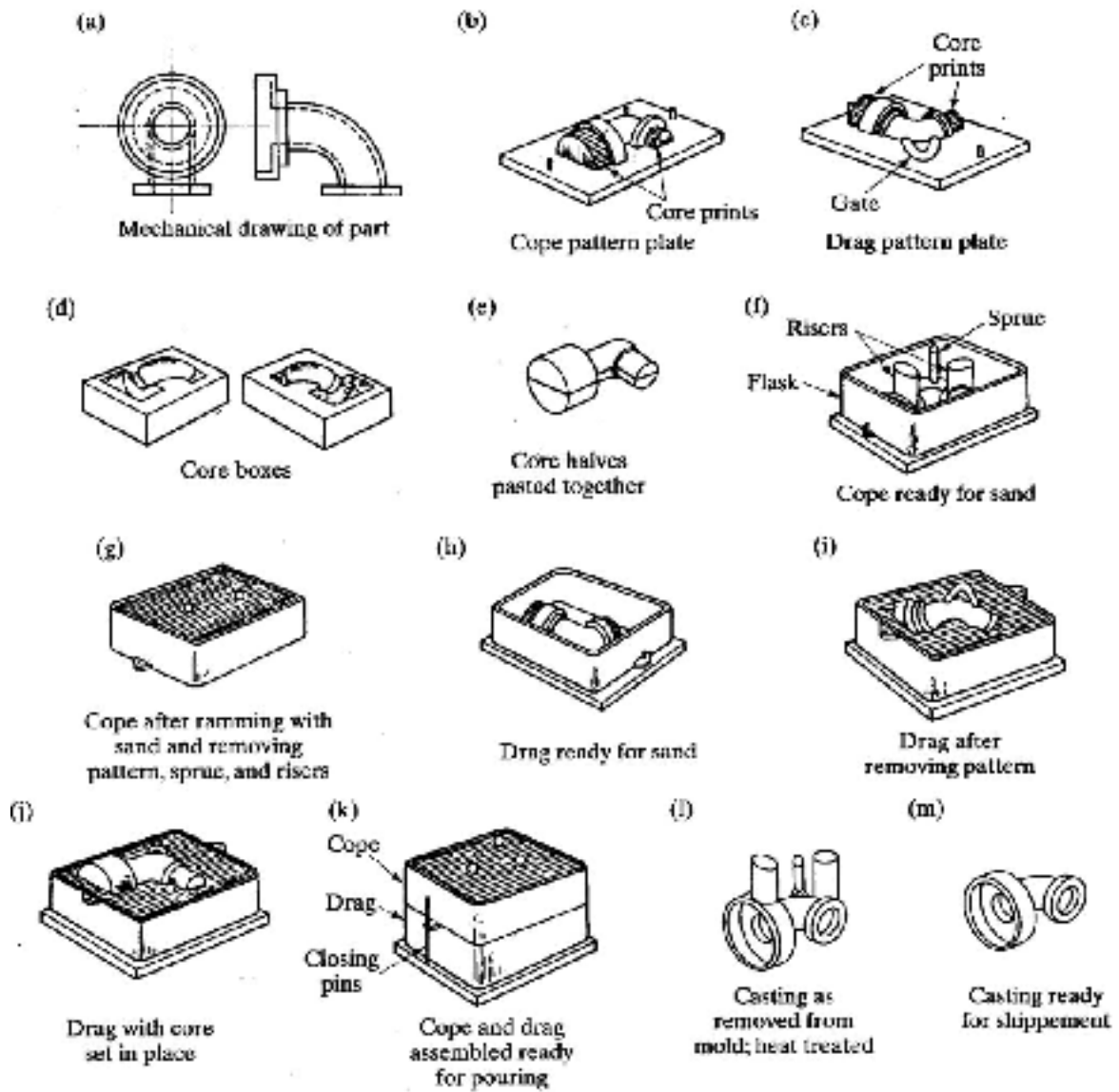


Figura 21. Ilustração esquemática do processo de fundição em areia.

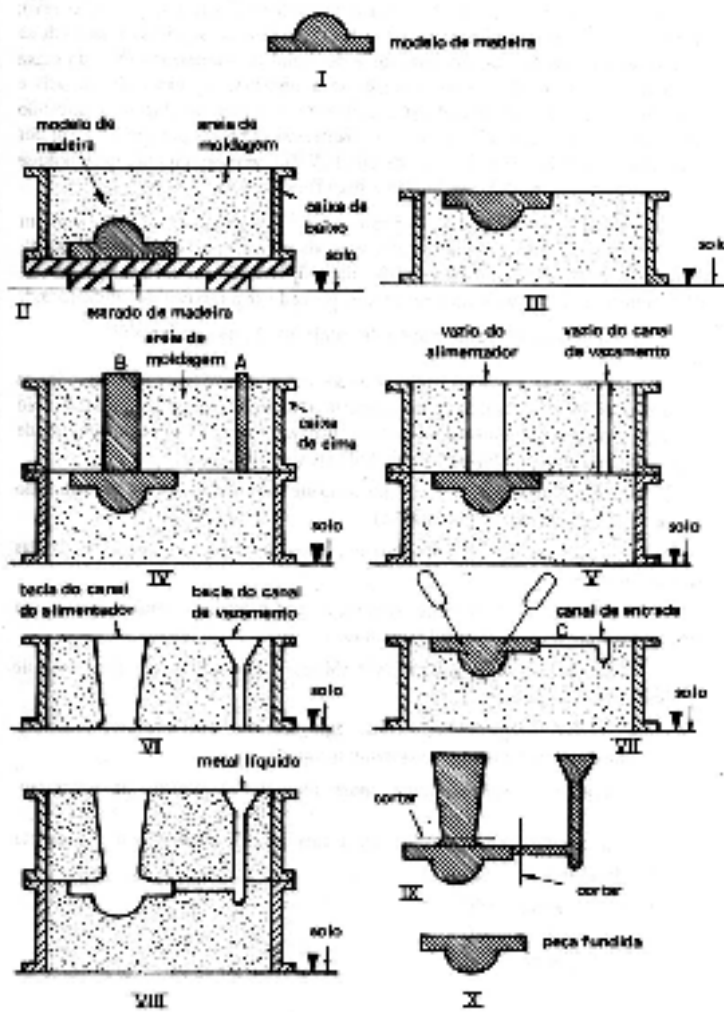


Figura 22. Ilustração esquemática do processo de fundição em areia.

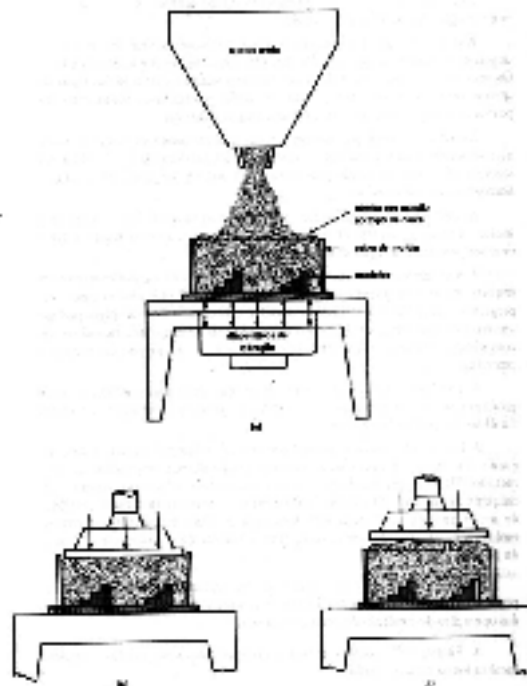


Figura 23. Compactação de areia na caixa de modelar.



Figura 24. Fundição em areia verde.

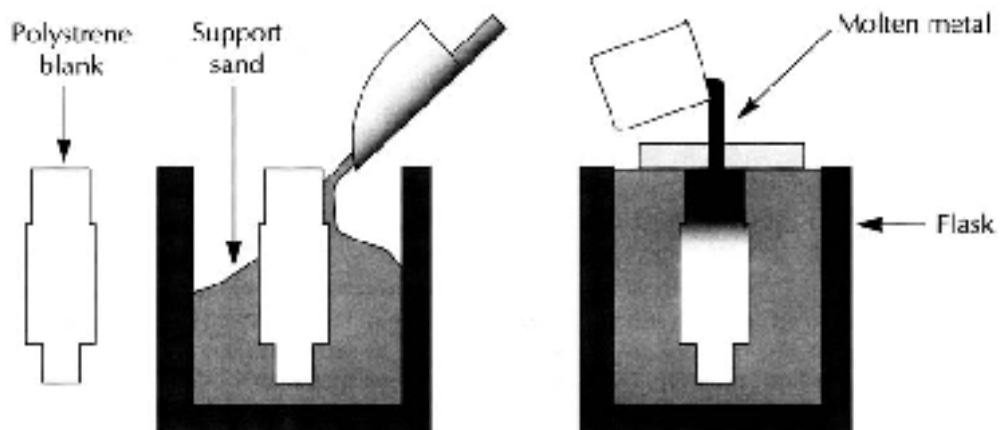


Figura 25. Ilustração esquemática do processo de moldagem plena.

1.3.2 Fundição em casca (Shell-mold).

Existe ainda um outro processo importante, que utiliza areia, é o processo Shell ou fundição em casca. Esse processo consiste em utilizar um modelo de material metálico ferroso ou alumínio, que é aquecido entre 175 e 370°C. Sobre o modelo é feito um recobrimento de um material como o silicone. Esse modelo é então colocado dentro de uma caixa com areia e 2,5 a 4% de uma resina. A caixa é então movimentada, como mostra a **figura 26**. A areia fica então aderida à superfície do modelo. Essa “casca” (Shell) é curada por um período curto de tempo e será o molde para a posterior fundição da peça. O processo Shell tem grande aplicação na produção de peças como engrenagens, onde grande precisão e bom acabamento superficial são necessários.

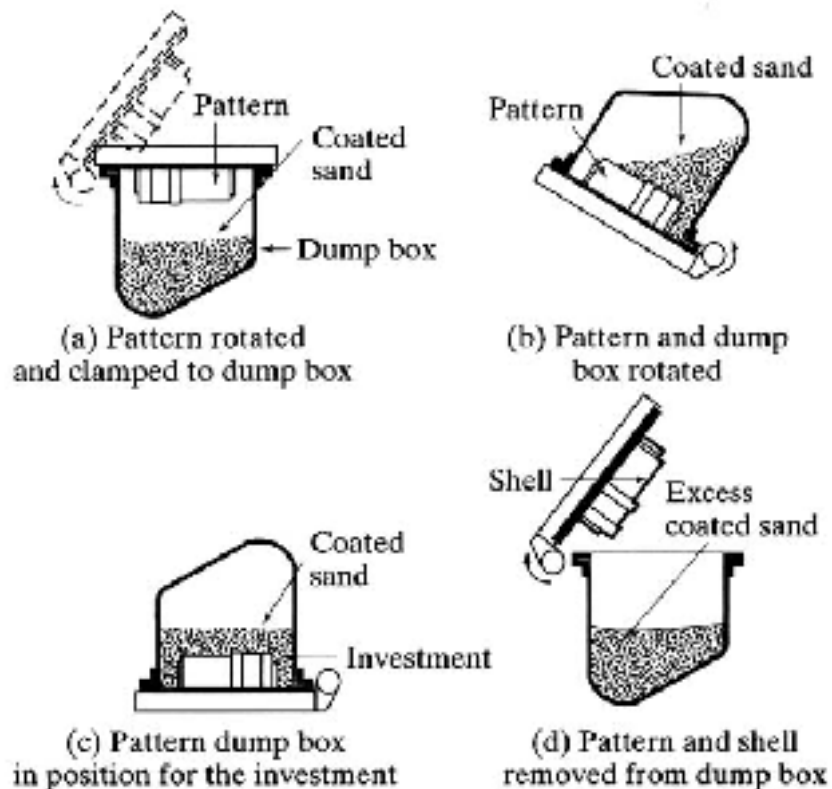


Figura 26. Fundição “Shell-mold” – fundição em casca.

1.3.3 Fundição utilizando cera perdida.

O processo de utilizando cera perdida é ilustrado na **figura 27**. A primeira etapa desse processo consiste em injetar cera na matriz para a confecção dos modelos. Esses modelos de cera são conectados a um canal central. Sobre os modelos é depositada uma pasta refratária, que pode ser constituída por várias camadas, formando o molde. Quando o molde endurece, ele é aquecido para que a cera derreta e seja retirada do molde. Após a retirada da cera, o metal líquido é vazado no molde. Após a solidificação do metal ou liga, o molde é quebrado e são retiradas as peças, as quais são separadas do canal central e feito o acabamento final. A **figura 28** apresenta o modelo de cera a as peças produzidas.

1.3.4 Fundição por centrifugação.

Nesse processo o molde tem um movimento de rotação. A força centrífuga faz com que o metal líquido vá de encontro às paredes do molde, onde solidifica. O cilindro que atua como molde é rodeado por uma camisa de água. A **figura 29** ilustra o processo de fundição por centrifugação. Tubos de ferro fundido, utilizados em suprimento de água, são produzidos dessa forma.

1.3.5 Fundição a vácuo.

O processo de fundição a vácuo é ilustrado na **figura 30**. Esse processo é semelhante ao de fundição com areia verde. A diferença está na existência de vácuo que facilita o preenchimento do molde.

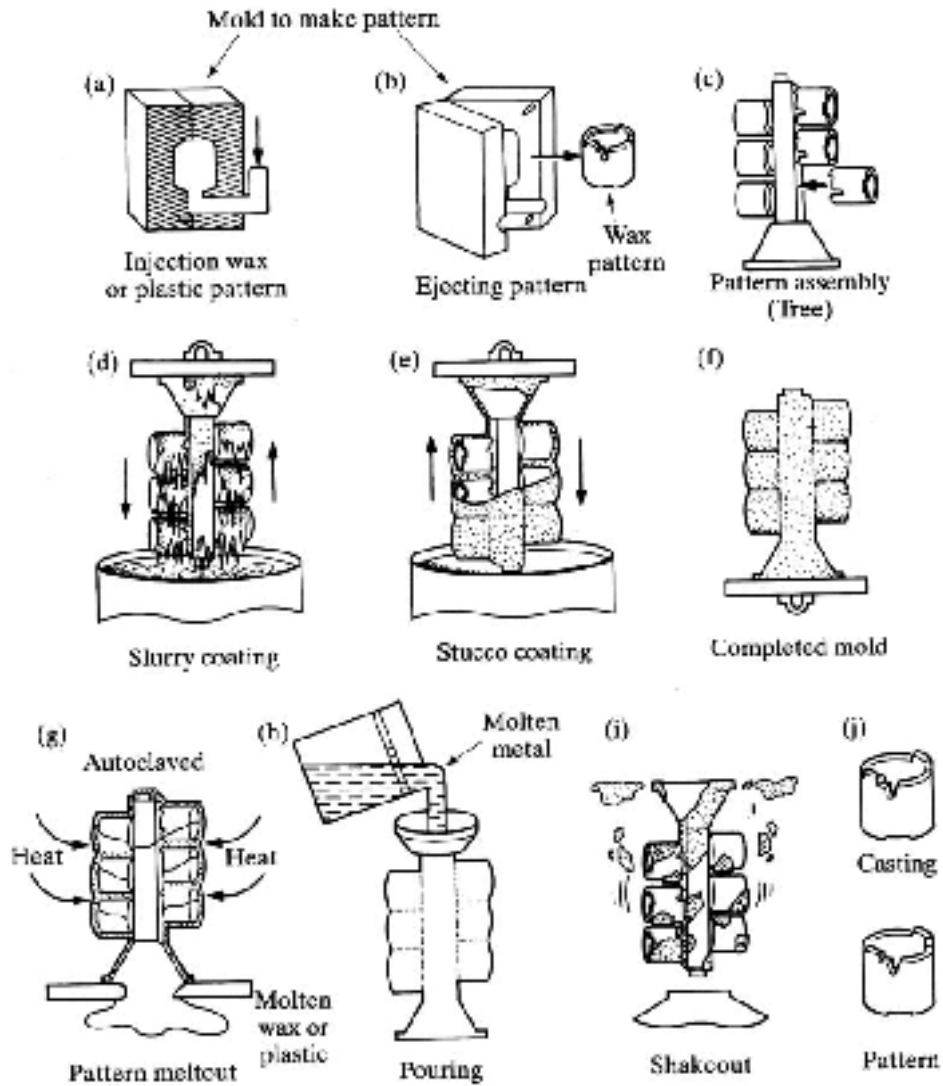


Figura 27. Etapas da fundição por cera perdida.



Figura 28. Modelo de cera (vermelho) e as peças produzidas.

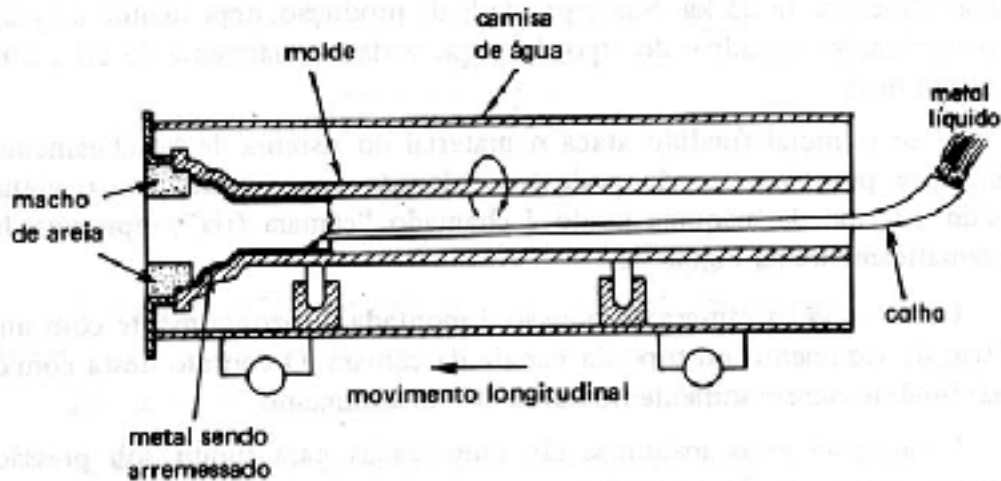


Figura 29. Sistema de fundição centrífuga para produção de tubos de ferro fundido.

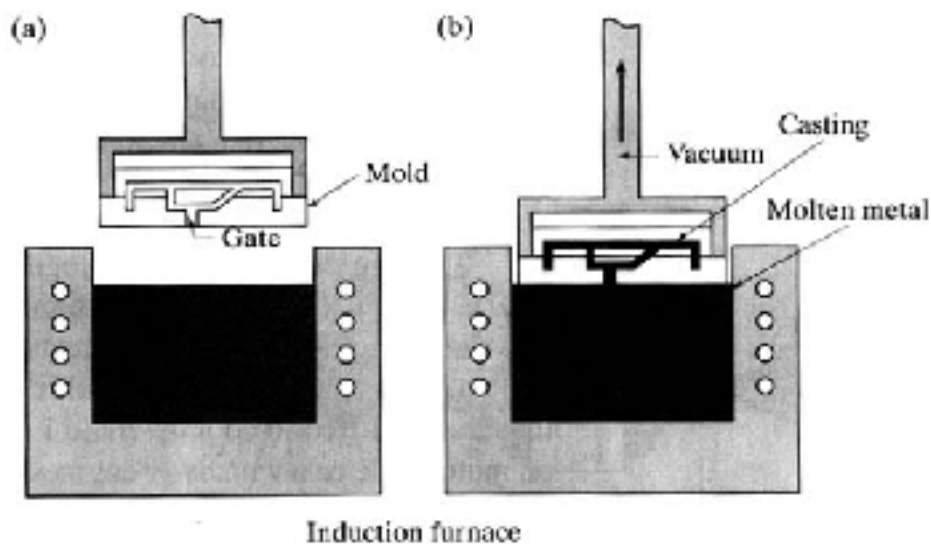


Figura 30. Ilustração esquemática do processo de fundição a vácuo.

1.3.6 Fundição utilizando moldes permanentes.

Uma das aplicações mais importantes de moldes permanentes, que são moldes metálicos, é na produção de lingotes. Lingotes são fundidos de forma cilíndrica ou prismática, os quais são processados termomecanicamente. A **figura 31** ilustra esquematicamente alguns desses moldes metálicos para a produção de lingotes, os quais são chamados de lingoteiras.

Podem ser também produzidos moldes metálicos para a produção de peças, como no caso dos processos apresentados anteriormente. A **figura 32** apresenta um molde metálico utilizado em fundição. A utilização desses moldes apresenta vantagens, pois as peças apresentarem maior uniformidade, melhor acabamento superficial, tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhores propriedades mecânicas. No entanto, a utilização de moldes permanentes é limitada à fabricação de peças pequenas, devido ao elevado custo dos mesmos.

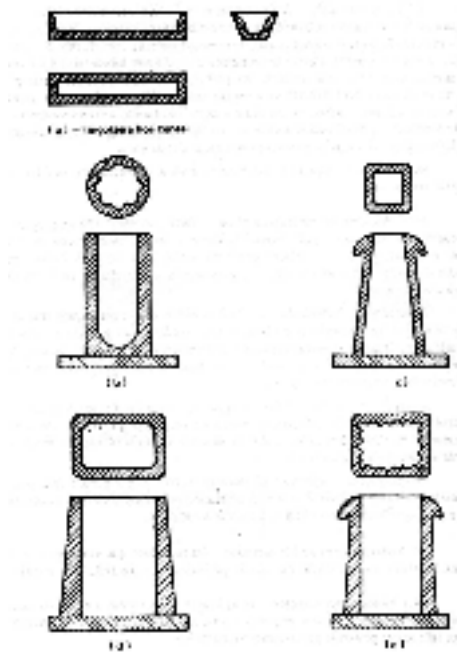


Figura 31. Ilustração esquemática de lingoteiras (moldes permanentes para a produção de lingotes).



Figura 32. Moldes metálicos para a produção de peças.

1.3.7 Fundição sob pressão.

Os moldes metálicos utilizados em fundição sob pressão são chamados de matrizes. A matriz, feita de aço ferramenta tratado termicamente, é geralmente construída em duas partes que são fechadas hermeticamente no momento do vazamento do metal líquido. O metal é bombeado na cavidade da matriz sob pressão suficiente para o preenchimento total de todos os seus espaços e cavidades. A pressão é mantida até que o metal se solidifique. Então, a matriz é aberta e a peça ejetada por meio de pinos acionados hidráulicamente. Muitas matrizes são refrigeradas a água. Isso é importante para evitar superaquecimento da matriz, aumentando sua vida útil e evitando defeitos nas peças.

A fundição sob pressão é automatizada e realizada em máquina de câmara quente, que é ilustrada na **figura 33** e máquina de câmara fria, que é ilustrada na **figura 34**.

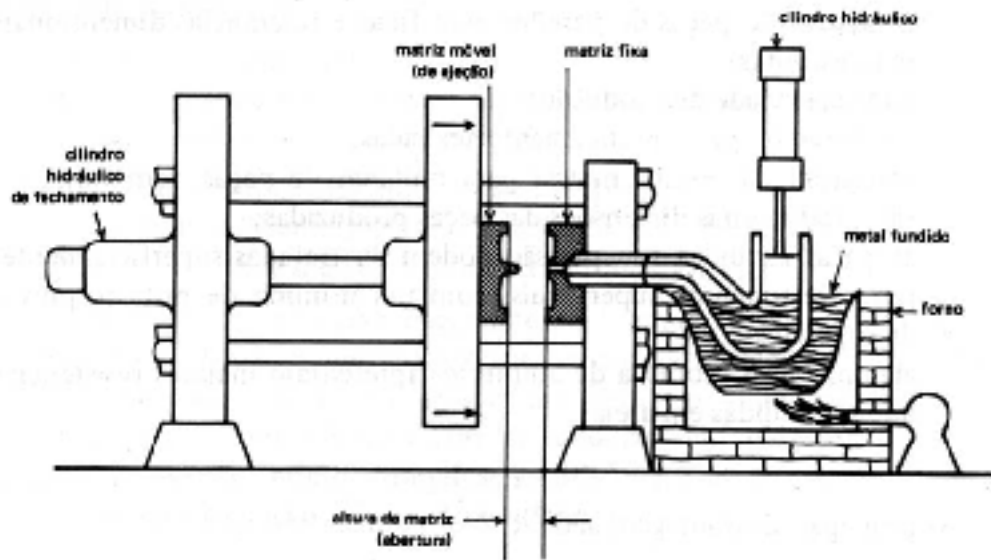


Figura 33. Representação esquemática do processo de fundição sob pressão em câmara quente.

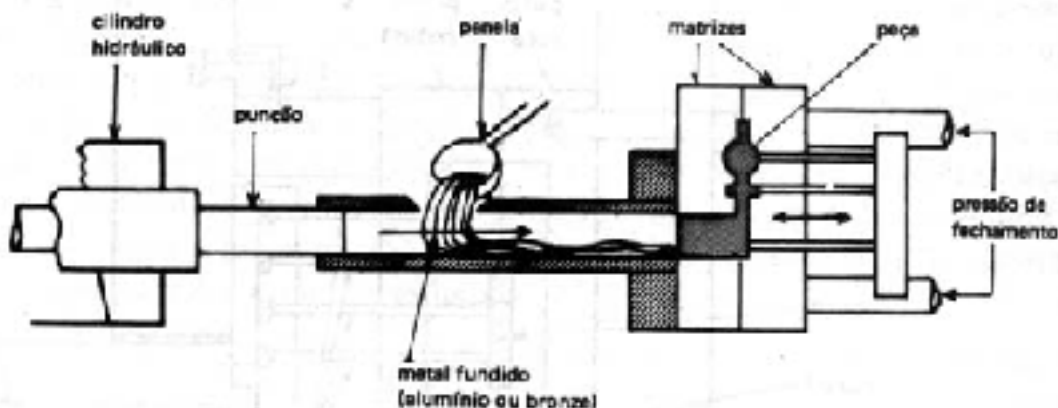


Figura 34. Representação esquemática do processo de fundição sob pressão em câmara fria.

O processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara quente utiliza um equipamento no qual existe um recipiente aquecido (forno), onde o metal líquido está depositado. No seu interior está um pistão hidráulico que, ao descer, força o metal líquido a entrar em um canal que o leva diretamente à matriz. A pressão exercida pelo pistão faz com que todas as cavidades da matriz sejam preenchidas, formando-se assim a peça após a solidificação. Logo após a solidificação do metal, o pistão retorna à sua posição inicial, mais metal líquido entra na câmara, por meio de um orifício, e o processo reinicia. Já a máquina de fundição sob pressão de câmara fria é utilizada, quando a liga apresenta ponto de fusão elevado, prejudicando o sistema de bombeamento (cilindro e pistão). Este processo é empregado principalmente para fundir ligas de alumínio, magnésio e cobre. O princípio de funcionamento desse equipamento é o mesmo do equipamento que utiliza câmara quente. A diferença é que o forno que contém o metal líquido é uma unidade independente, de modo que o sistema de injeção não fica dentro do banho de metal.

Como todo o processo de fabricação, a fundição sob pressão tem uma série de vantagens e desvantagens. As vantagens são: 1. peças de ligas como as de alumínio, fundidas sob pressão, apresentam maiores resistências do que as fundidas em areia; 2. as peças fundidas sob pressão podem receber tratamento de superfície com um mínimo de preparo prévio da superfície; 3. possibilidade de produção de peças com formas mais complexas; 4. possibilidade de produção de peças com paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas; 5. alta capacidade de produção; alta durabilidade das matrizes. As desvantagens são: 1. limitações no emprego do processo: ele é usado para ligas não-ferrosas, com poucas exceções; 2. limitação no peso das peças (raramente superiores a 5 kg.); 3. retenção de ar no interior das matrizes, originando peças incompletas e porosidade na peça fundida; 4. alto custo do equipamento e dos acessórios, o que limita seu emprego a grandes volumes de produção.

A indústria automobilística utiliza uma grande quantidade de peças fundidas sob pressão: tampas de válvulas, fechaduras, carcaças de motor de arranque, maçanetas, caixas de câmbio de máquinas agrícolas. O mesmo acontece com a indústria aeronáutica, que utiliza peças fundidas principalmente de ligas de alumínio e magnésio. Essa variedade de produtos indica a importância desse processo de fabricação dentro do setor de indústria metal-mecânica.

1.3.8 Fundição contínua.

O esquema apresentado na **figura 35** ilustra um sistema de fundição contínua. Nesse processo o metal (ou liga) fundido escoam em matrizes, resfriadas com água. Durante o escoamento esse metal solidifica no formato dessas matrizes (quadrada, retangular, etc.)

1.3.9 Outros processos.

1. Solidificação direcional. Exemplo de aplicação: palhetas de turbina. Isso trás uma otimização da microestrutura, aumentando a resistência em fluência. A **figura 36** ilustra a solidificação direcional.

2. Melt spinning é um processo onde a liga é solidificada de forma tão rápida, que o sólido formado não tem estrutura cristalina definida, ele é amorfo. Isso gera um aumento do limite de solubilidade e redução da micro-segregação. A **figura 37** ilustra o processo de melt spinning.

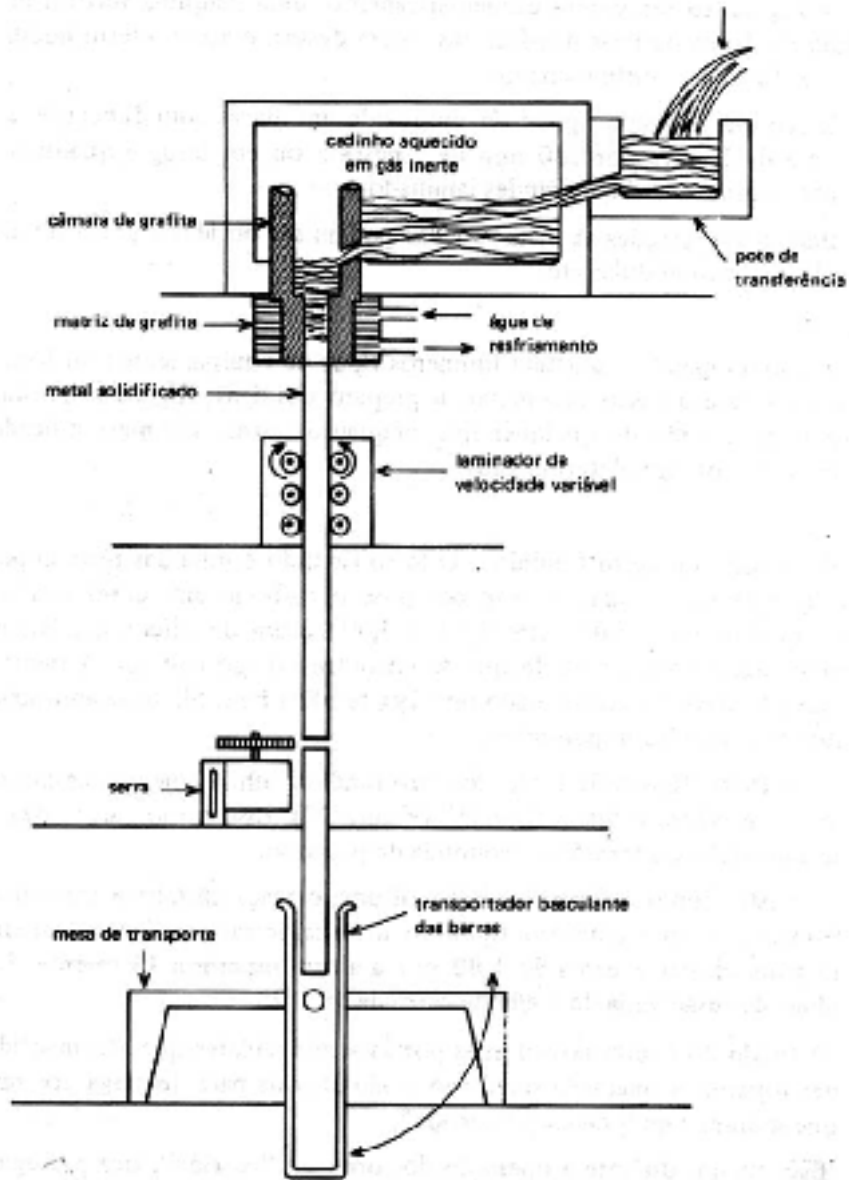


Figura 35. Sistema de fundição contínua.

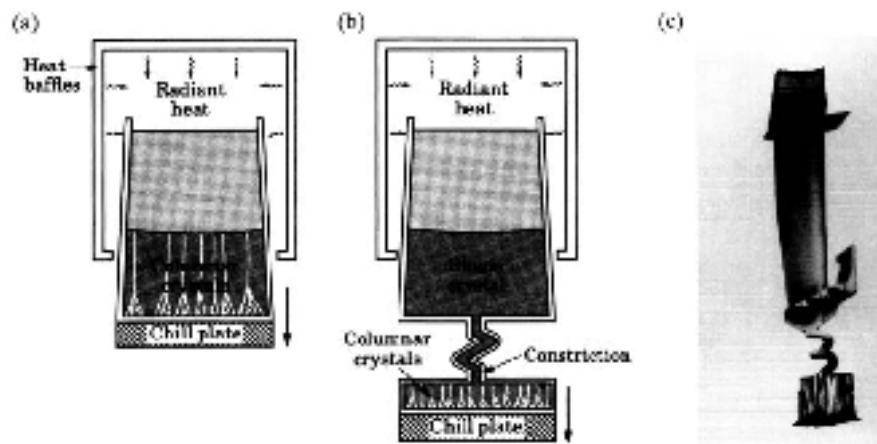


Figura 36. Ilustra a solidificação direcional.

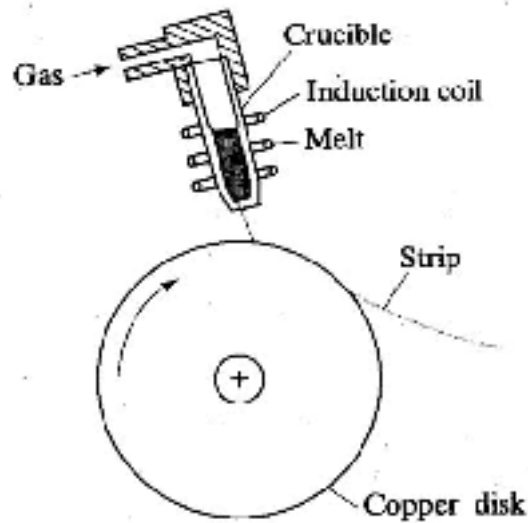


Figura 37. Ilustra o processo de mel spinning.

2. Metalurgia do Pó (Sinterização).

No processo de metalurgia do pó parte-se de um pó, que geralmente é metálico ou cerâmico. Esse pó é compactado em uma matriz e aquecido, produzindo a peça. Não existe fusão. A **figura 38** ilustra peças que são produzidas por metalurgia do pó.



Figura 38. Peças que são produzidas por metalurgia do pó.

No processo de metalurgia do pó a primeira etapa é a produção do pó. Esse pó pode ser produzido de várias formas e com diferentes características. A **figura 39** ilustra algumas características que esse pó pode ter. Existem vários processos de se produzir pó. Um deles é o processo de atomização. No processo de atomização, apresentado na **figura 40**, o metal líquido passa por um orifício e é bombardeado por um gás inerte, ar ou água, produzindo um pó.

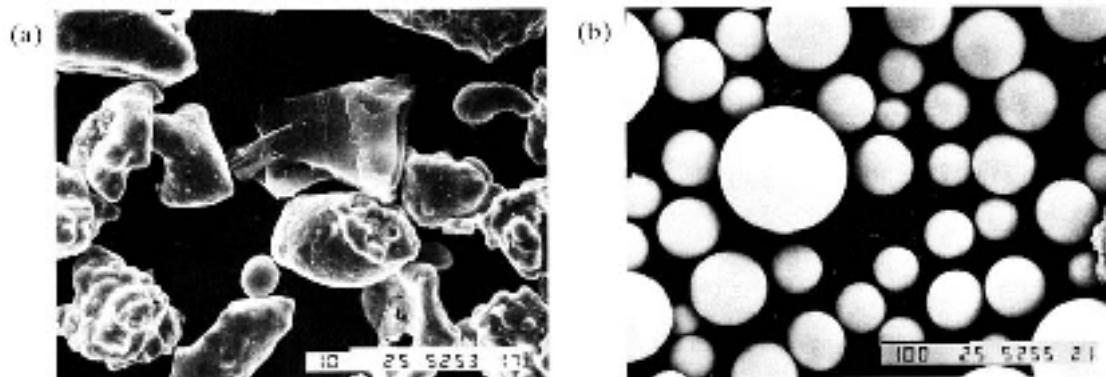


Figura 39. Diferentes tipos de pó utilizados em metalurgia do pó.

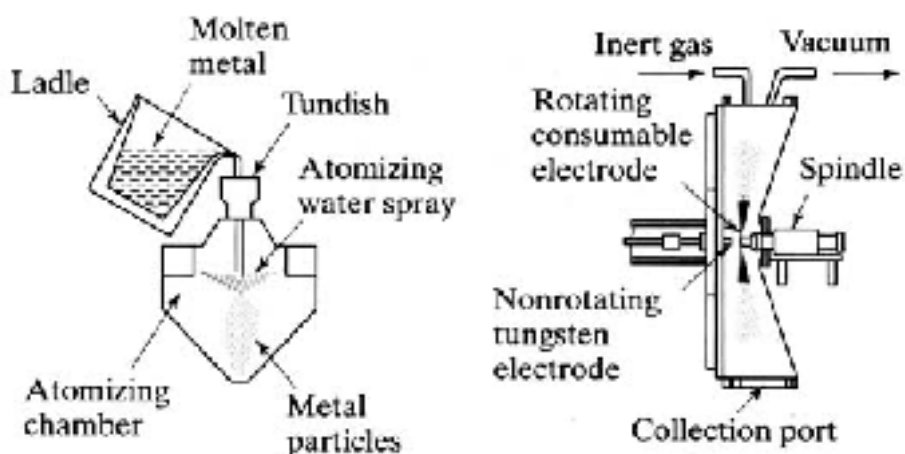


Figura 40. Processo de atomização.

Esse pó pode ser também produzido por redução de óxidos, utilizando gases como hidrogênio e monóxido de carbono. Os pós produzidos por esse método são porosos e de tamanho uniforme. Outro processo de produção de pós é o eletrolítico. Nesse processo há deposição do pó metálico em um dos eletrodos.

Existem também processos de produção de pós que são mecânicos. No processo de cominuição, por exemplo, o metal ou liga é moído até a produção do pó. A **figura 41** ilustra o processo de cominuição. Um processo semelhante ao de cominuição, mas que utiliza diferentes tipos de metais é o “mechanical alloying”. Durante a moagem os diferentes metais reagem, produzindo uma liga na forma de pó. Embora existam outros processos esses são dos mais importantes.

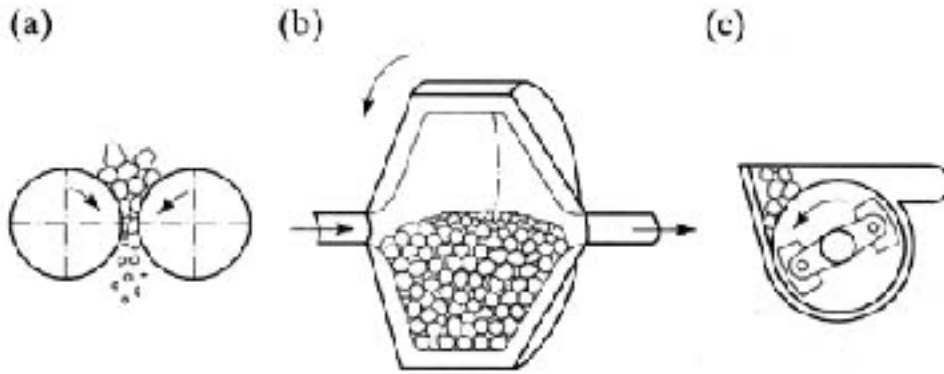


Figura 41. Processo de cominuição.

Outra etapa do processo de metalurgia do pó a compactação. Os pós metálicos ou cerâmicos são compactados em matrizes, sendo prensados na forma desejada. Essa etapa é muito importante, pois além da forma, o prensado deve ter densidade alta, isto é, as partículas devem estar todas em contato umas com as outras. Quanto mais elevada a densidade do compactado melhor. Esse prensado é chamado de compactado verde. A **figura 42** ilustra a influencia da densidade nas propriedades da peça (sinterizado).

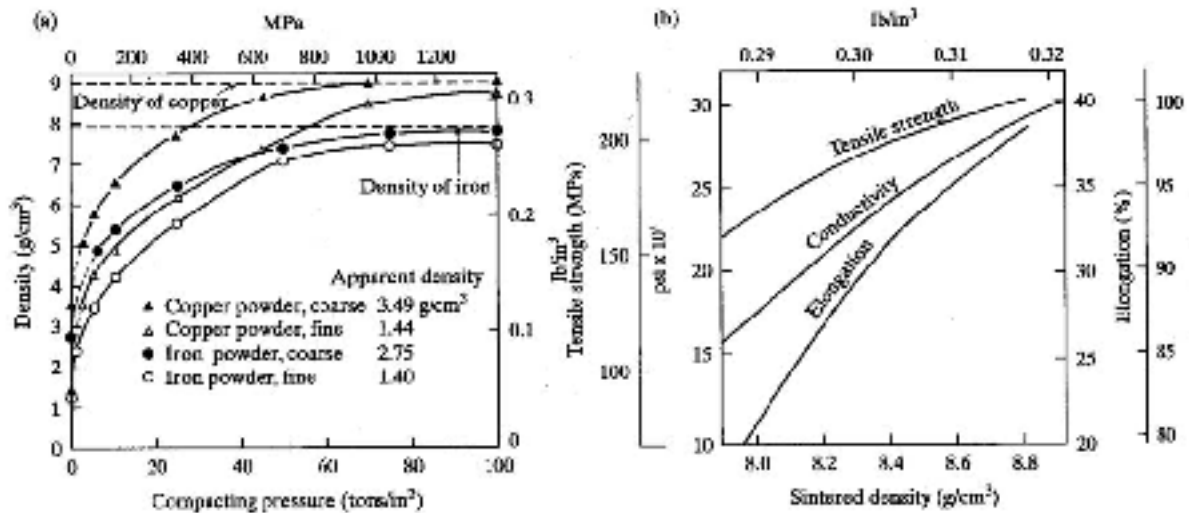


Figura 42. Influencia da densidade nas propriedades da peça (sinterizado).

A compactação pode ser feita de várias formas. Uma das maneiras de se obter homogeneidade no prensado é se fazer uma compactação isostática. Essa compactação pode ser feita a frio (CIP-cold isostatic pressure), utilizando água, ou a quente (HIP-hot isostatic pressure), utilizando um gás ou outro fluido. Esses processos são apresentados esquematicamente nas **figuras 43 e 44**, respectivamente. Outras formas de se compactar os pós é por laminação, como mostra a **figura 45**, ou por processos de extrusão.

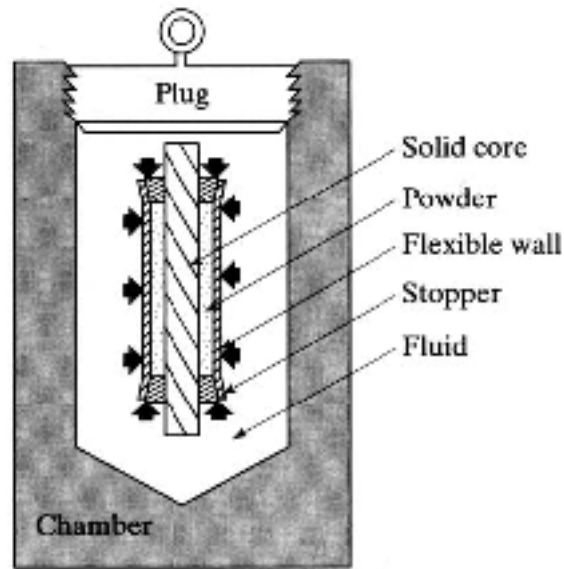


Figura 43. Compactação isostática a frio (CIP).

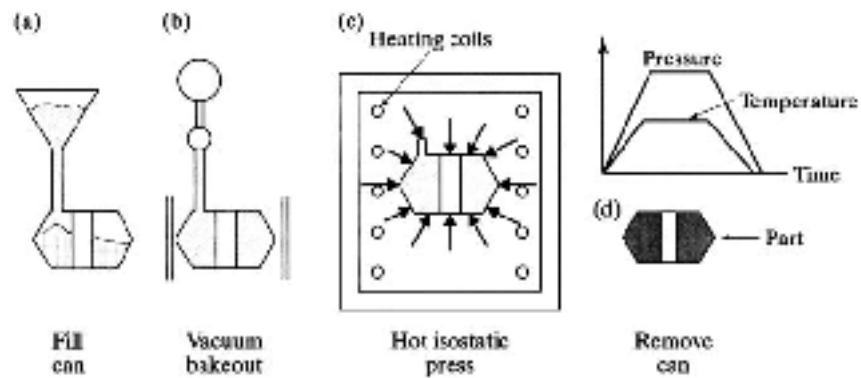


Figura 44. Compactação isostática a quente (HIP).

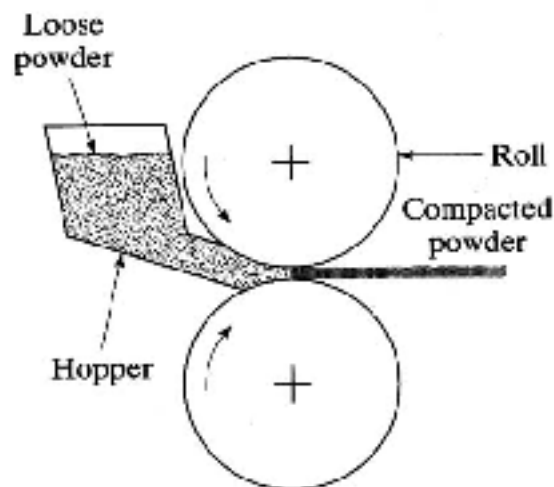


Figura 45. Laminação de pós.

A etapa final do processo de metalurgia do pó é a sinterização. A sinterização consiste em aquecer em temperatura, abaixo da temperatura de fusão do metal ou liga (cerca de 70 a 90% da temperatura de fusão), e atmosfera controlada, o compactado verde (prensado). Além da temperatura e da atmosfera utilizada, o tempo de sinterização também é muito importante. Esse tempo pode variar de minutos a horas. A **tabela 2** apresenta temperaturas e tempos de sinterização para vários metais.

Tabela 2. Temperaturas e tempos de sinterização para vários metais.

Material	Temperature (° C)	Time (Min)
Copper, brass, and bronze	760–900	10–45
Iron and iron-graphite	1000–1150	8–45
Nickel	1000–1150	30–45
Stainless steels	1100–1290	30–60
Alnico alloys (for permanent magnets)	1200–1300	120–150
Ferrites	1200–1500	10–600
Tungsten carbide	1430–1500	20–30
Molybdenum	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalum	2400	480

A **figura 47** ilustra o que pode ocorrer durante o processo de sinterização e que causa a união entre as partículas de pó metálico ou cerâmico.

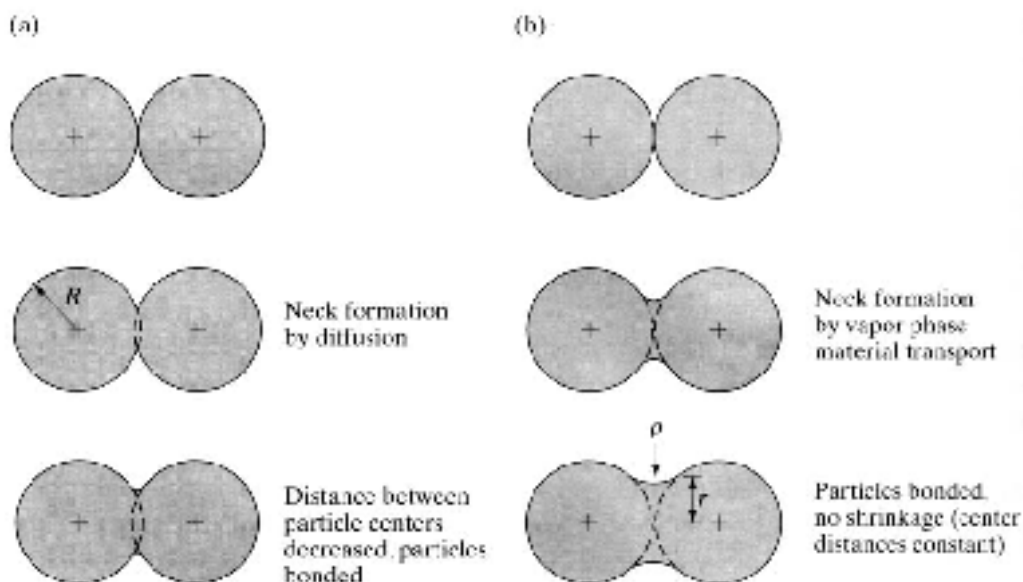


Figura 47. Ilustração do que pode ocorrer durante o processo de sinterização e que causa a união entre as partículas de pó.

A **tabela 3** apresenta as propriedades mecânicas de alguns materiais produzidos por metalurgia do pó e a **tabela 4** as propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V, produzida por diferentes métodos.

Tabela 3. Propriedades mecânicas de alguns materiais produzidos por metalurgia do pó.

Designation	MPIF type	Condition	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness	Elongation in 25 mm (%)	Elastic modulus (GPa)
Ferrous							
FC-0205	N	AS	225	205	45 HRH	<0.5	70
		HT	295	—	95 HRH	<0.5	70
	R	AS	415	330	70 HRB	1	110
		HT	550	—	35 HRC	<0.5	110
FN-0405	S	AS	550	395	80 HRB	1.5	130
		HT	690	655	40 HRC	<0.5	130
	T	AS	475	240	72 HRB	4.5	145
		HT	1060	880	39 HRC	1	145
Aluminum							
601 AB, pressed bar		AS	110	48	60 HRH	6	—
		HT	252	241	75 HRH	2	—
Brass							
CZP-0220	T	—	165	76	55 HRH	13	—
	U	—	193	89	68 HRH	19	—
	W	—	221	105	75 HRH	23	—
Titanium							
Ti-6Al-4V		HIP	917	827	—	13	—
Superalloys							
Stellite 15		—	1035	—	49 HRC	<1	—

MPIF: Metal Powder Industries Federation, AS: as sintered, HT: heat treated, HIP: hot isostatically pressed.

Tabela 4. Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V, produzida por diferentes métodos.

Process(*)	Density (%)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Cast	100	840	930	7	15
Cast and forged	100	875	965	14	40
Blended elemental (P+S)	98	786	875	8	14
Blended elemental (HIP)	>99	805	875	9	17
Prealloyed (HIP)	100	880	975	14	26

(*) P+S = pressed and sintered, HIP = hot isostatically pressed.

Source: R.M. German.

Após a sinterização para obtenção de melhores propriedades ou ajuste de dimensões, os sinterizados podem ser prensados, forjados, tratados termicamente ou mesmo usinados.

3. Bibliografia

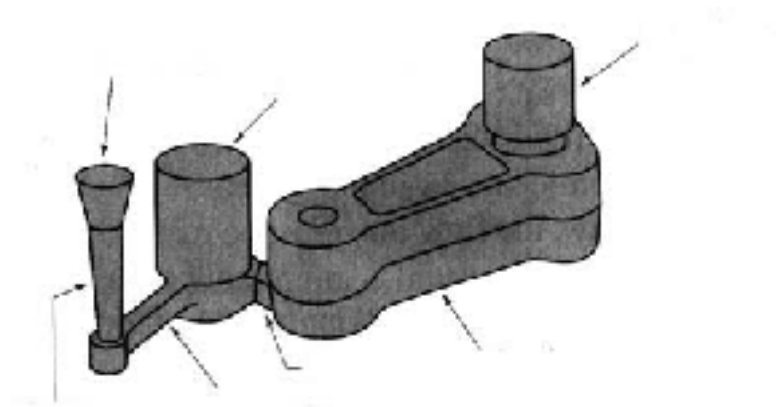
1. Kalpakjian, S. et al. **Manufacturing Engineering and Technology**. USA. Prentice Hall. 2000.
2. Ohno, A. **Solidificação dos Metais**. São Paulo. Livraria Ciência e Tecnologia Ltda.
3. Chiaverini, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de fabricação e tratamento**. São Paulo. Makron. 1986. 2ª edição.
4. Torre, J. **Manual de Fundição**. São Paulo. Hemus. 1975.

4. Leitura complementar

1. Campbell, J. **Castings**. UK. Butterworth-Heinemann. 1991.

5. Exercícios

1. Na ilustração apresentada identifique os elementos indicados.



2. Como é o processo de fundição em casca.
3. Como é o processo de fundição por cera perdida.
4. O que rechupe?
5. Qual a diferença entre uma lingoteira e um molde metálico?
6. Qual a diferença entre uma matriz e um molde?
7. Explique de maneira simplificada o processamento por metalurgia do pó.
8. Relacione os principais defeitos que ocorrem em peças fundidas.
9. Quais os fatores que influenciam no vazamento do metal líquido e no total preenchimento do molde?