



Fundição

1. Introdução.

Os processos de transformação dos metais e ligas metálicas em peças para utilização em conjuntos mecânicos são inúmeros e variados: você pode fundir, conformar mecanicamente, soldar, utilizar a metalurgia do pó e usinar o metal e, assim, obter a peça desejada.

Evidentemente, vários fatores devem ser considerados quando se escolhe o processo de fabricação. Como exemplo, podemos lembrar: o formato da peça, as exigências de uso, o material a ser empregada, a quantidade de peças que devem ser produzidas, o tipo de acabamento desejado, e assim por diante.

Dentre essas várias maneiras de trabalhar o material metálico, a fundição se destaca, não só por ser um dos processos mais antigos, mas também porque é um dos mais versáteis, principalmente quando se considera o diferente formato e tamanho das peças que se pode produzir por esse processo.

Mas, afinal, o que é fundição?

É o processo de fabricação de peças metálicas que consiste essencialmente em encher com metal líquido a cavidade de um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada. A fundição é um processo de fabricação inicial, porque permite a obtenção de peças com formas praticamente definitivas, com mínimas limitações de tamanho, formato e complexidade, e também é o processo pelo qual se fabricam os lingotes.

É a partir do lingote que se realizam os processos de conformação mecânica para a obtenção de chapas, placas, perfis etc. A palavra fundição é usada para o processo enquanto o produto denomina-se fundido. O processo de fundição é a manufatura de objetos metálicos (fundidos) fundindo o metal, vertendo este no molde (caixa de areia), e permitindo o metal fundido se solidificar como um fundido cuja forma é uma reprodução da cavidade do molde (caixa de areia). Este processo é realizado em fundições, que podem ser de materiais ferrosos ou não-ferrosos.

Sempre que se fala em fundição, as pessoas logo pensam em ferro. Mas esse processo não se restringe só ao ferro, não. Ele pode ser empregado com os mais variados tipos de ligas metálicas, desde que elas apresentem as propriedades adequadas a esse processo, como por exemplo, temperatura de fusão e fluidez.

A indústria de fundição é muito difundida e encontra-se entre as seis maiores no mundo porque possibilita a produção peças complicadas. Exemplos: acessórios de tubulações, peças de um forno, bloco do motor de automóveis e aviões, pistões, anéis dos pistões, bases de máquina ferramenta, rodas, e eixos de manivela.

No começo da idade do metal, o conhecimento humano não estava avançado o suficiente para conseguir altas temperaturas para produzir metal fundido. Então, a fundição não era conhecida e os metais eram usados como eram encontrados na natureza ou aquecidos suavemente e trabalhado em formas. Os produtos daquela era são exemplificados pelo pendente de cobre encontrado na caverna de Shanidar (nordeste do Iraque) que data de 9500 A.C. e que foi moldado martelando um pedaço de metal no seu estado natural e dando acabamento com abrasivos.

Depois, técnicas de fundição de cobre foram desenvolvidas, e foram produzidos moldes de cobre na Mesopotâmia já em 3000 anos antes de Cristo. A fundição começou a ser usada pelo homem mais ou menos uns 3000 A.C. Fundiu-se primeiro o cobre, depois o bronze, e, mais recentemente, o ferro, por causa da dificuldade em alcançar as temperaturas necessárias para a realização do processo.

A arte cerâmica contribuiu bastante para isso, pois gerou as técnicas básicas para a execução dos moldes e para o uso controlado do calor já que, forneceu os materiais refratários para a construção de fornos e cadinhos.

A arte da fundição era então refinada pelos egípcios antigos que inovaram o processo de modelação em cera perdida Durante a Idade do Bronze, a prática de fundição floresceu na China onde foram produzidos peças fundidas de alta qualidade com formas complicadas. O chinês desenvolveu certas ligas de bronze e dominou o processo de cera perdida durante a Dinastia de Shang.

Mais tarde, aquela arte se difundiu para o Japão com a introdução do Budismo no sexto século. Também havia algumas realizações significantes no Oeste, onde o Colosso de Rhodes uma estátua do Deus grego Apolo que pesava 360 tons- foi considerada um das Sete Maravilhas do Mundo. Aquela estátua de bronze foi fundida em seções, que depois foram agrupadas, e tinha 31 metros de altura.

Embora o ferro fosse conhecido no Egito já em 4000 A.C. o uso do ferro fundido era impossível devido à alta temperatura de fundição, e a falta de vasilhas de cerâmica (cadinho) capazes de conter o ferro fundido. A idade do ferro fundido chegou finalmente em 1340, quando o forno de fluxo foi construído em Marche-Les- Dames na Bélgica. Era capaz de produzir um volume contínuo de ferro fundido.

A prática de fundição de materiais ferrosos desenvolveu mais adiante com a invenção do forno de cúpula por John Wilkenson na Inglaterra. Isto foi seguido pela produção de ferro maleável em 1826 por Seth Boyden e o desenvolvimento da metalografia por Henry Sorby da Inglaterra.

Sem dúvida, as descobertas da Revolução Industrial, como os fornos Cubilô, os fornos elétricos, e a mecanização do processo, muito contribuíram para o desenvolvimento da fundição do ferro e, conseqüentemente, do aço.

A maioria dos equipamentos de fundição foi concebida basicamente nesse período, quando surgiram também os vários métodos de fundição centrífuga. Ao século XX coube a tarefa de aperfeiçoar tudo isso. A relação entre as propriedades e a microestrutura das ligas foram entendidas. O controle completo do processo de fundição ficou possível baseado no conhecimento e controle da microestrutura. No entanto, os processos de conformação tiveram um desenvolvimento mais rápido do que a fundição porque as ligas forjadas tinham um desempenho melhor e um campo mais largo de aplicações.

O ferro nodular, que possui a fundibilidade do ferro fundido e a resistência ao impacto do aço, foi introduzido em 1948, e favoreceu a difusão do ferro para competir mais favoravelmente com ligas forjadas.

2. Fenômenos que ocorrem durante a solidificação.

Esses fenômenos são: cristalização, contração de volume, concentração de impurezas e desprendimento de gases.

2.1 Cristalização.

Essa particularidade dos metais, durante sua solidificação, já foi estudada, sob o ponto de vista geral. Consiste, como se viu, no aparecimento das primeiras células cristalinas unitárias, que servem como núcleos para o posterior desenvolvimento ou crescimento dos cristais, dando, finalmente, origem aos grãos definitivos e à estrutura granular típica dos metais. Esse crescimento dos cristais não se dá, na realidade, de maneira uniforme, ou seja, a velocidade de crescimento não é a mesma em todas as direções, variando de acordo com os diferentes eixos cristalográficos, além disso, no interior dos moldes, o crescimento é limitado pelas paredes destes. Como resultado, os núcleos metálicos e os grãos cristalinos originados adquirem os aspectos representados na Figura 1.

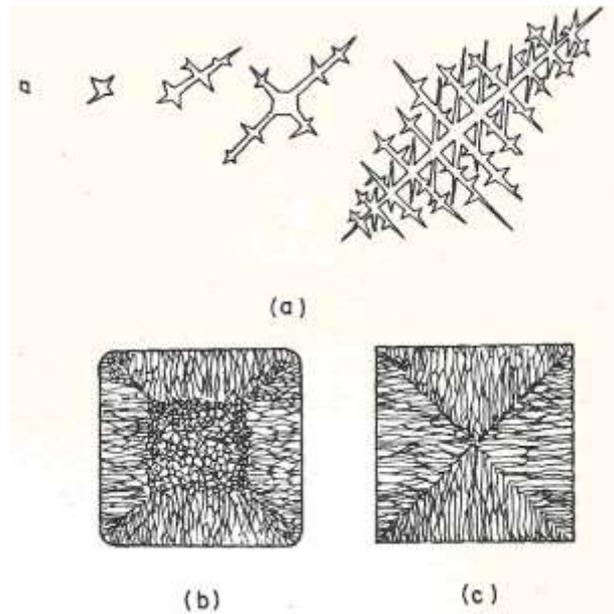


Figura 1. Figura esquemática da solidificação de um lingote. a) início da solidificação através de cristais formando uma dendrita, b) aspecto da seção de um lingote, mostrando a estrutura de solidificação típica num lingote, c) aspecto da estrutura de solidificação de lingote de cantos retos.

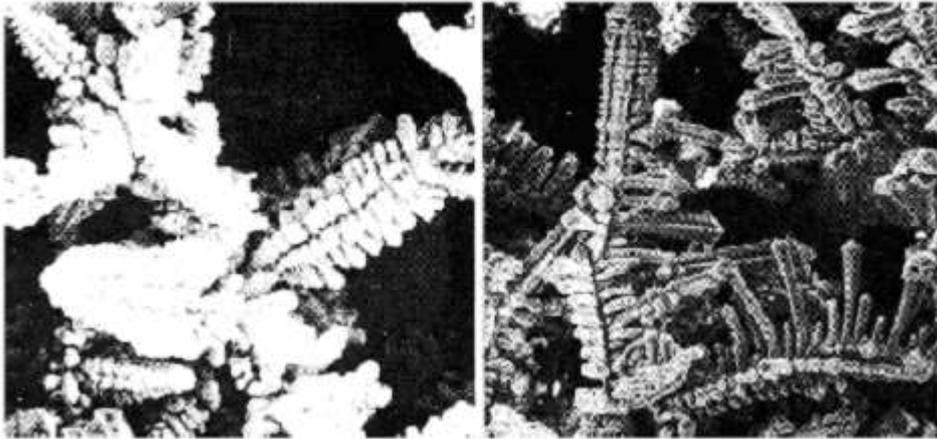


Figura 2. Dendritas formadas na solidificação de um aço carbono.

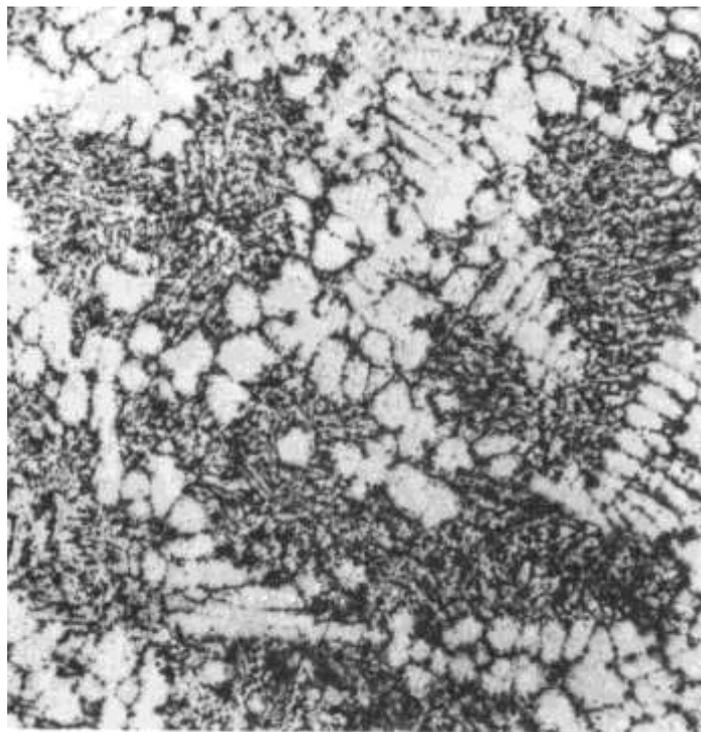


Figura 3. Dendritas de solidificação do Cobre

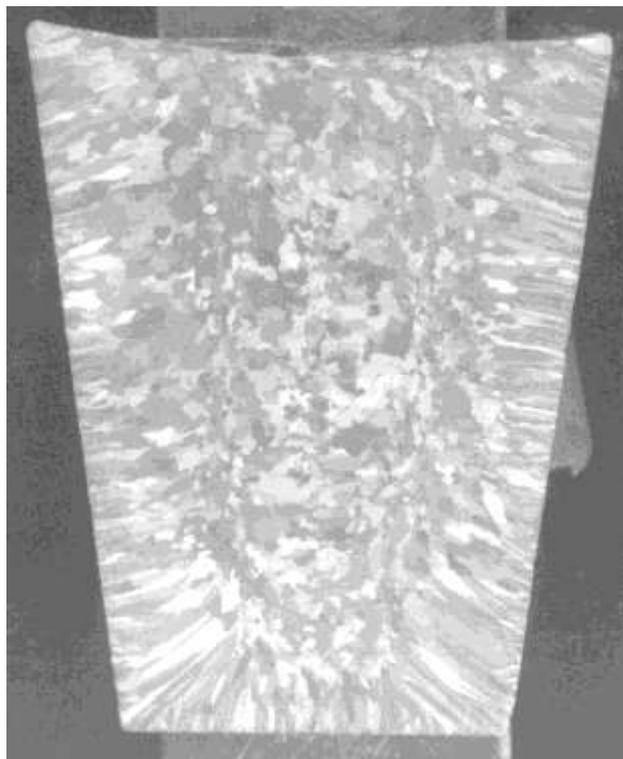


Figura . Estrutura de solidificação de um lingote

A Figura 1(a) mostra o desenvolvimento e a expansão de cada núcleo de cristalização, originando um tipo de cristal que poderia ser assimilado a uma árvore

com suas ramas, a esse tipo de cristal dá-se o nome de dendrita. As dendritas formam-se em quantidades cada vez maiores até se encontrarem o seu crescimento é, então, impedido pelo encontro das dendritas vizinhas, originando-se os grãos e os contornos de grãos, que delimitam cada grão cristalino, formando a massa sólida.

A Figura 1(b) mostra o caso particular da solidificação de um metal no interior de um molde metálico, de forma prismática, chamado lingote, o qual vai originar uma peça fundida chamada lingote. Nesse caso, a solidificação tem início nas paredes com as quais o metal líquido entra imediatamente em contato os cristais formados e em crescimento sofrem a interferência das paredes do molde e dos cristais vizinhos, de modo que eles tendem a crescer mais rapidamente na direção perpendicular às paredes do molde. Origina-se, então, uma estrutura colunar típica, até uma determinada profundidade, como a Figura 1(b) mostra, e que pode, nos cantos, produzir efeitos indesejáveis Figura 1(c) devido a grupos colunares de cristais, crescendo de paredes contíguas, se encontrarem segundo planos diagonais.

Os efeitos indesejáveis resultam do fato de essas diagonais constituírem planos de maior fragilidade de modo que, durante a operação de conformação mecânica a que essas peças são submetidas posteriormente como laminação podem surgir fissuras que inutilizam o material. Esse inconveniente é evitado arredondando-se os cantos

2.2 Contração de volume.

Os metais, ao solidificarem, sofrem uma contração. Na realidade do estado líquido ao sólido três contrações são verificadas:

- **contração líquida** correspondente ao abaixamento da temperatura até o início da solidificação
- **contração de solidificação** correspondente à variação de volume que ocorre durante a mudança do estado líquido para o sólido

- **contração sólida** correspondente à variação de volume que ocorre já no estado sólido, desde a temperatura de fim de solidificação até a temperatura ambiente. A contração é expressa em porcentagem de volume.

No caso da contração sólida, entretanto, a mesma é expressa linearmente, pois desse modo é mais fácil projetar-se os modelos. A contração sólida varia de acordo com a liga considerada.

No caso dos aços fundidos, por exemplo, a contração linear devida à variação de volume no estado sólido, varia de 2,18 a 2,47%, o valor menor correspondendo ao aço de mais alto carbono (0,90%).

No caso dos ferros fundidos uma das mais importantes ligas para fundição de peças a contração sólida linear varia de 1 a 1,5%, o valor de 1% correspondendo ao ferro fundido cinzento comum e o valor 1,5% (mais precisamente de 1,3 a 1,5%) ao ferro nodular.

Para os outros metais e ligas a contração linear é muito variada, podendo atingir valores de 8 a 9% para níquel e ligas cobre-níquel. A contração dá origem a uma heterogeneidade conhecida por vazio ou rechupe, ilustrada na Figura 2.

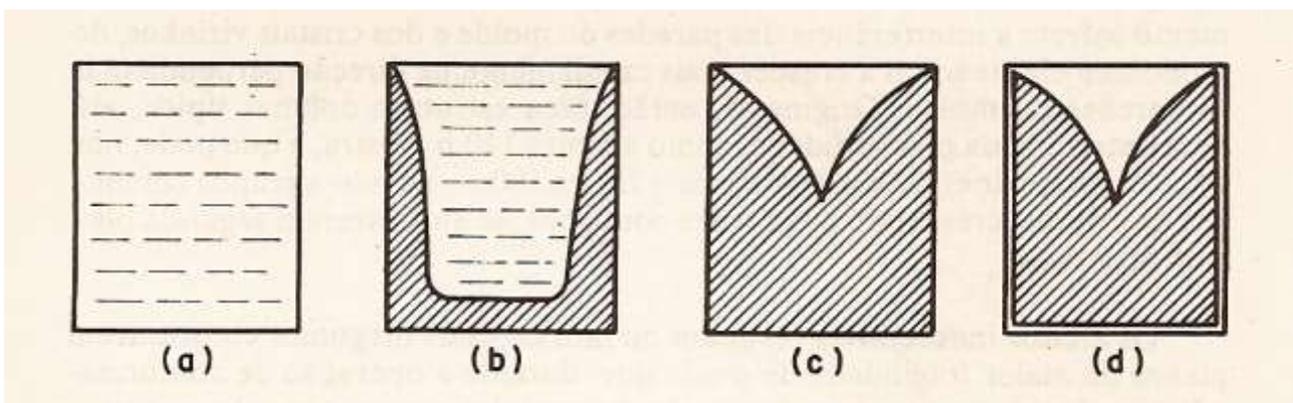


Figura 2. Figura esquemática mostrando o efeito da contração do metal líquido até sua solidificação.

Inicialmente, tem-se (a) o metal inteiramente no estado líquido (b) a solidificação tem início na periferia, onde a temperatura é mais baixa e caminha em direção ao centro (c) fim da solidificação e (d) contração sólida. A diferença entre os volumes no estado líquido e no estado sólido final dá como consequência o vazio ou rechupe, indicados nas partes (c) e (d) da figura. A parte (d) dá a entender também que a contração sólida ocasiona uma diminuição geral das dimensões da peça solidificada.

Os vazios citados podem eventualmente ficar localizados na parte interna das peças, próximos da superfície porém, invisíveis externamente. Além dessa consequência vazio ou rechupe, a contração verificada na solidificação pode ocasionar:

- aparecimento de trincas a quente (Figura 3)
- aparecimento de tensões residuais. As tensões residuais podem ser controladas por um adequado projeto da peça, como se verá, e podem ser eliminadas pelo tratamento térmico de alívio de tensões.

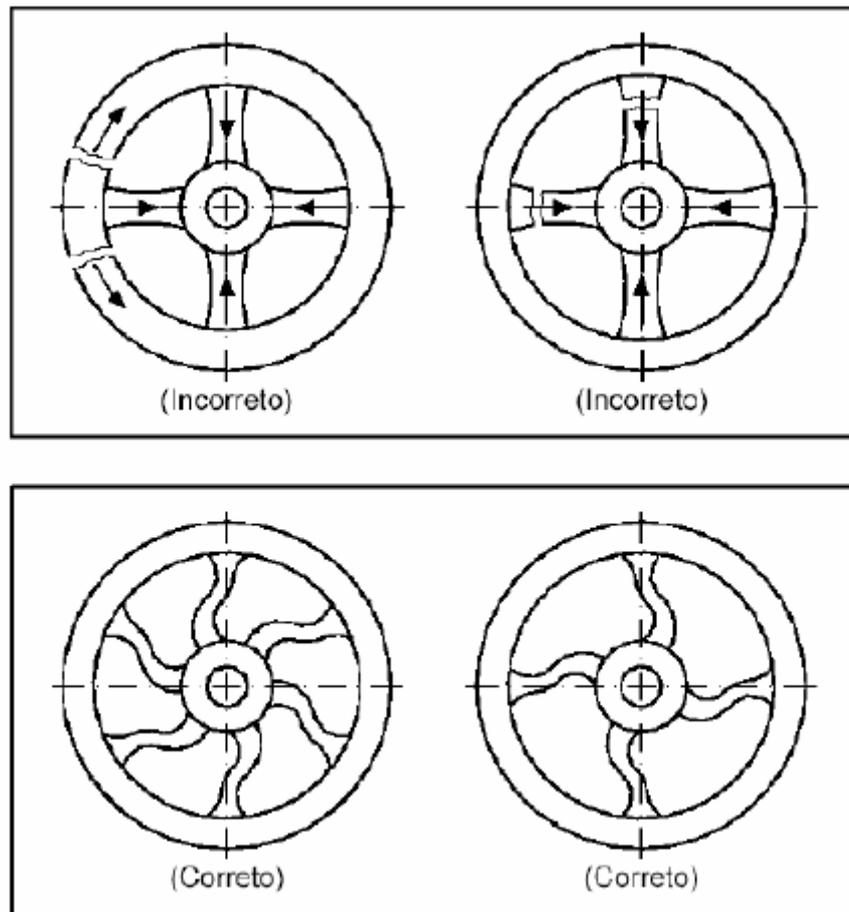


Figura 3. Efeito das tensões de contração em uma roda fundida.

Os vazios ou rechupes que constituem a consequência direta da contração podem também ser controlados ou eliminados, mediante recursos adequados, seja no caso de lingoteiras, seja no caso de moldes para peças fundidas (Figura 4).

No caso da fundição de um lingote, o artifício adotado para controlar o vazio é colocar sobre o topo da lingoteira que é feita de material metálico uma peça postiça de material refratário, denominada cabeça quente ou massalote essa peça, por ser de material refratário, retém o calor por um tempo mais longo e corresponderá à seção que solidifica por último nela, portanto, vai se concentrar o vazio. Resulta assim um lingote pela eliminação de sua cabeça superior.

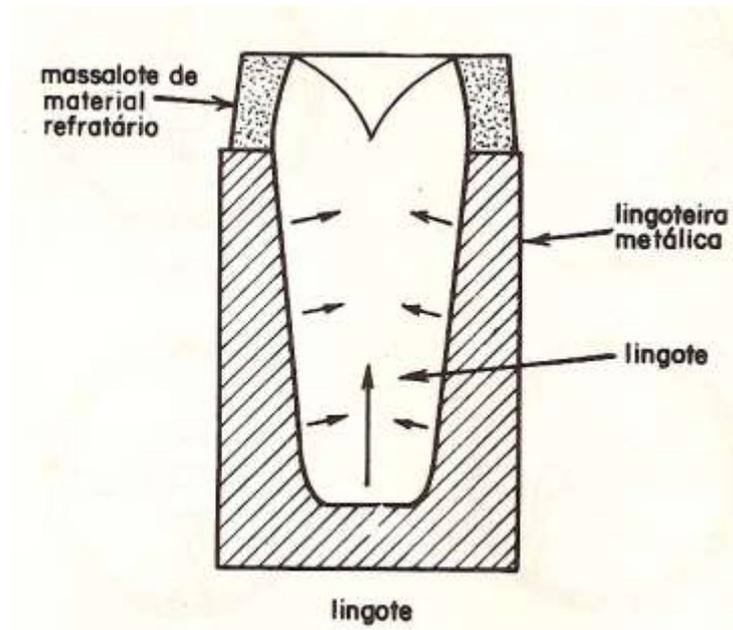


Figura 4. Forma típica de cabeça quente ou massalote num molde tipo lingoteira.

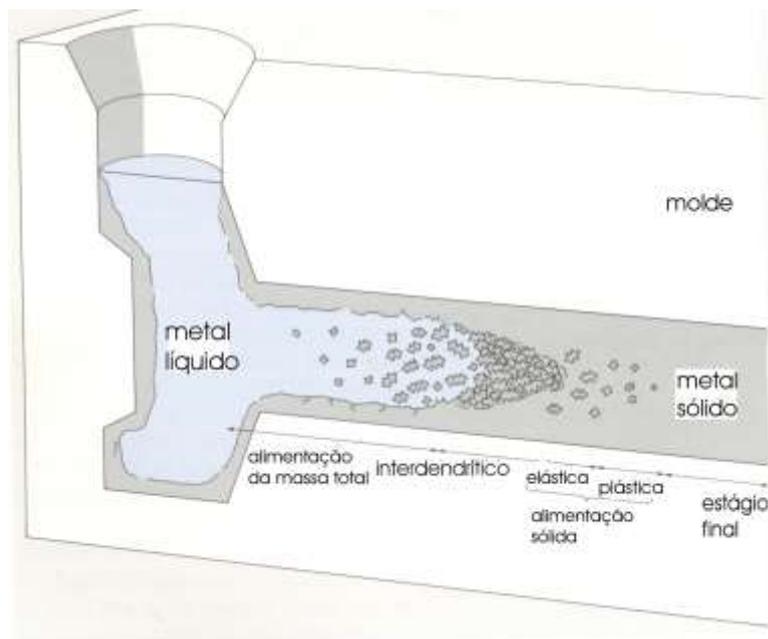


Figura 5. Escoamento e solidificação durante o vazamento de metal fundido líquido no interior de um molde

No caso de peças fundidas, utiliza-se um alimentador. No exemplo apresentado na Figura 4, o molde foi projetado de tal maneira que a entrada do metal líquido, através de canais, é feita na seção mais grossa que alimenta as menos espessas ao mesmo

tempo, o alimentador ficará convenientemente suprido de excesso de metal líquido, nele se concentrando o vazio.

2.3 Concentração de impurezas:

Algumas ligas metálicas contêm impurezas normais, que se comportam de modo diferente, conforme a liga esteja no estado líquido ou sólido. O caso mais geral é o das ligas ferro-carbono que contêm, como impurezas normais, o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o próprio carbono. Quando essas ligas estão no estado líquido as impurezas estão totalmente dissolvidas no líquido, formando um todo homogêneo. Ao solidificar, entretanto, algumas das impurezas são menos solúveis no estado sólido: P e S, por exemplo, nas ligas mencionadas. Assim sendo, à medida que a liga solidifica, esses elementos vão acompanhando o metal líquido remanescente, indo acumular-se, pois, na última parte sólida formada. Nessas regiões, a concentração de impurezas constitui o que se chama segregação (3).

A Figura 5 representa esquematicamente como a segregação pode se dispor em peças laminadas e forjadas. O inconveniente dessa segregação é que o material acaba apresentando composição química não uniforme, conforme a seção considerada, e conseqüentes propriedades mecânicas diferentes. Como as zonas segregadas se localizam no interior das peças, onde as tensões são mais baixas, as suas conseqüências não são muito perniciosas, devendo-se de qualquer modo, evitar uma grande concentração de impurezas, quer pelo controle mais rigoroso da composição química das ligas, quer pelo controle da própria velocidade de resfriamento.

2.4 Desprendimento de gases.

Esse fenômeno ocorre, como no caso anterior, principalmente nas ligas ferro-carbono. O oxigênio dissolvido no ferro, por exemplo, tende a combinar-se com o carbono dessas ligas, formando os gases CO e CO₂ que escapam facilmente à atmosfera, enquanto a liga estiver no estado líquido. À medida, entretanto, que a

viscosidade da massa líquida diminui, devido à queda de temperatura, fica mais difícil a fuga desses gases, os quais acabam ficando retidos nas proximidades da superfície das peças ou lingotes, na forma de bolhas.

Em aços de baixo carbono, na forma de lingotes a serem forjados ou laminados, as bolhas não são prejudiciais, pois elas, às temperaturas de conformação mecânica, principalmente para a fabricação de chapas, têm suas paredes soldadas. A rigor, essas bolhas podem ser até mesmo desejáveis.

As bolhas devem ser evitadas, contudo, em aços de alto carbono isso pode ser feito adicionando-se ao metal líquido substâncias chamadas desoxidantes, tais como alguns tipos de ferro-ligas (**ferro-silício e ferro-manganês**) ou **alumínio**. De fato, o oxigênio reage de preferência com os elementos Si, Mn e Al, formando óxidos sólidos SiO_2 , MnO e Al_2O_3 impedindo, assim, que o oxigênio reaja com o carbono formando os gases CO e CO_2 , responsáveis pela produção das bolhas. Outros gases que podem se libertar na solidificação dos aços são o hidrogênio e o nitrogênio, que comumente também se encontram dissolvidos no metal líquido.

3. Fundição por areia - Etapas.

A matéria-prima metálica para a produção de peças fundidas é constituída pelas ligas metálicas ferrosas (ligas de ferro e carbono) e não-ferrosas (ligas de cobre, alumínio, zinco e magnésio). O processo de fabricação dessas peças por meio de fundição pode ser resumido nas seguintes operações:

1. Confecção do modelo.

Essa etapa consiste em construir um modelo com o formato aproximado da peça a ser fundida. Esse modelo vai servir para a construção do molde e suas dimensões devem prever a contração do metal quando ele se solidificar bem como um eventual sobremetal para posterior usinagem da peça.

O modelo pode ser feito de madeira, alumínio, aço, resina plástica e até isopor.

2.Confecção do molde.

O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é colocado para que se obtenha a peça desejada. Ele é feito de material refratário composto de areia e aglomerante. Esse material é moldado sobre o modelo que, após retirado, deixa uma cavidade com o formato da peça a ser fundida.

3.Confecção dos machos.

Macho é um dispositivo, feito também de areia, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. Eles são colocados nos moldes antes que eles sejam fechados para receber o metal líquido.

4. Fusão.

Etapa em que acontece a fusão do metal.

5. Vazamento.

O vazamento é o enchimento do molde com metal líquido.

6. Desmoldagem.

Após determinado período de tempo em que a peça se solidifica dentro do molde, e que depende do tipo de peça, do tipo de molde e do metal (ou liga metálica), ela é retirada do molde (desmoldagem) manualmente ou por processos mecânicos.

7. Rebarbação.

A rebarbação é a retirada dos canais de alimentação, massalotes e rebarbas que se formam durante a fundição. Ela é realizada quando a peça atinge temperaturas próximas às do ambiente.

8. Limpeza.

A limpeza é necessária porque a peça apresenta uma série de incrustações da areia usada na confecção do molde. Geralmente ela é feita por meio de jatos abrasivos.

Essa seqüência de etapas é a que normalmente é seguida no processo de fundição por gravidade em areia, que é o mais utilizado.

Um exemplo bem comum de produto fabricado por esse processo é o bloco dos motores de automóveis e caminhões.

O processo de fundição por gravidade com moldagem em areia apresenta variações. As principais são:

- fundição com moldagem em areia aglomerada com argila,
- fundição com moldagem em areia aglomerada com resinas.

A fundição por gravidade usa também moldes cerâmicos. Esse processo recebe o nome de fundição de precisão.

Existe ainda um outro processo de fundição por gravidade que usa moldes metálicos. Quando são usados moldes metálicos, não são necessárias as etapas de confecção do modelo e dos moldes, descritas acima.

Outro processo que usa molde metálico é o processo de fundição sob pressão.

4- Características e defeitos das peças fabricadas.

Com relação aos processos de fabricação mecânica, esses processos utilizam sempre produtos semi-acabados, ou seja, chapas, barras, perfis, tubos, fios e arames, como matéria-prima. Quer dizer, existem várias etapas de fabricação que devem ser realizadas antes que o material metálico se transforme em uma peça.

Por outro lado, a fundição parte diretamente do metal líquido e, no mínimo, economiza etapas dentro do processo de fabricação.

Vamos, então, ver mais algumas vantagens desse processo. As peças fundidas podem apresentar formas externas e internas desde as mais simples até as bem complicadas, com formatos impossíveis de serem obtidos por outros processos. As peças fundidas podem apresentar dimensões limitadas somente pelas restrições das instalações onde são produzidas. Isso quer dizer que é possível produzir peças de poucos gramas de peso e com espessura de parede de apenas alguns milímetros ou pesando muitas toneladas.

A fundição permite um alto grau de automatização e, com isso, a produção rápida e em série de grandes quantidades de peças. As peças fundidas podem ser produzidas dentro de padrões variados de acabamento (mais liso ou mais áspero) e tolerância dimensional (entre 0,2 mm e 6 mm) em função do processo de fundição usado. Por causa disso, há uma grande economia em operações de usinagem.

A peça fundida possibilita grande economia de peso, porque permite a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas. Essas vantagens demonstram a grande diversidade de peças que podem ser produzidas por esse processo e que os outros não conseguem alcançar. Para você ter uma idéia, um automóvel não poderia sair do lugar senão fosse o motor. Nele, a maioria das peças é feita por meio de processos de fundição.

Quando um novo produto é criado, ou quando se quer aperfeiçoar algo que já existe, a engenharia geralmente tem alguns critérios que ajudam a escolher o tipo de processo de fabricação para as peças projetadas. No caso da fundição, vários fatores podem ser considerados: formato e complexidade da peça, tamanho da peça, quantidade de peças a serem produzidas, material que será usado. Além disso, as peças fundidas apresentam características que estão estreitamente ligadas ao processo de fabricação como por exemplo: acréscimo de sobre-metal, ou seja, a camada extra

de metal que será desbastada por processo de usinagem, furos pequenos e detalhes complexos não são feitos na peça porque dificultam o processo de fundição, embora apareçam no desenho. Esses detalhes são depois executados também por meio de usinagem, assim como arredondamento de cantos.

No projeto de fundição considera-se também o engrossamento das paredes da peça para evitar defeitos como trincas e melhorar o preenchimento com o metal líquido. Defeitos dos produtos fundidos também ocorrem, como em todo o processo, alguma coisa sai errado e aparecem os defeitos. Alguns defeitos comuns das peças fundidas são:

- inclusão da areia do molde nas paredes internas ou externas da peça. Isso causa problemas de usinagem: os grãos de areia são abrasivos e, por isso, estragam a ferramenta. Além disso, causam defeitos na superfície da peça usinada.
- defeitos de composição da liga metálica que causam o aparecimento de partículas duras indesejáveis no material. Isso também causa desgaste da ferramenta de usinagem.
- rechupe, ou seja, falta de material devido ao processo de solidificação, causado por projeto de massalote malfeito.
- porosidade, ou seja, a existência de buraquinhos dentro de peça. Eles se originam quando os gases que existem dentro do metal líquido não são eliminados durante o processo de vazamento e solidificação. Isso causa fragilidade e defeitos superficiais na peça usinada.

formando à medida que a peça vai solidificando e se contraindo.

Tolerância dimensional é a faixa dentro da qual uma medida qualquer pode variar. Por exemplo, o desenho especifica uma medida de 10 mm, com uma tolerância dimensional de 1. Isso quer dizer que essa medida pode variar entre 9 e 11 mm.